Gestão Ótima do Fluxo de Tráfego Aéreo nas Zonas Terminais de Voo com Base em Redes Dinâmicas

Cátia Salomé Azevedo Simão

Tese para obtenção do Grau de Doutor em
Engenharia Aeronáutica
(3º ciclo de estudos)

Orientador: Prof. Doutor Kouamana Bousson

Júri:
Prof. Doutor Joaquim Mateus Paulo Serra
Prof. Doutor Afzal Suleman
Prof. Doutor Francisco Miguel Ribeiro Proença Brójo
Profa. Doutora Maria Emília da Silva Baltazar
Prof. Doutor Carlos Miguel Nóbrega Velosa
Prof. Doutor José Alexandre Tavares Guerreiro Fregnani

10 de abril de 2025

Folha em branco

Declaração de Integridade

Eu, Cátia Salomé Azevedo Simão, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição D1836 do Doutoramento em Engenharia Aeronáutica da Faculdade de Engenharia, declaro ter desenvolvido o presente trabalho e elaborado o presente texto em total consonância com o **Código de Integridades da Universidade da Beira Interior**.

Mais concretamente afirmo não ter incorrido em qualquer das variedades de Fraude Académica, e que aqui declaro conhecer, que em particular atendi à exigida referenciação de frases, extratos, imagens e outras formas de trabalho intelectual, e assumindo assim na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 07 /05 /2025

(assinatura conforme Cartão de Cidadão ou preferencialmente
assinatura digital no documento original se naquele mesmo formato)

Folha em branco

Dedicatória

Aos que amo, que me apoiam, que me acarinham, que me respeitam e que me acompanham, independentemente do caminho que escolho em cada fase da minha vida.

Aos meus pais, por tudo o que fizeram, fazem e continuarão a fazer por mim por muitos mais anos. Espero que eu possa estar ao vosso lado em todos os momentos e ser o vosso porto seguro sempre que precisarem.

Por fim, e não menos importante, ao meu avô cujo sonho seria estar presente na prova pública deste ciclo de estudos e que, infelizmente, nos deixou em novembro de 2019.

Folha em branco

Agradecimentos

Tal como qualquer outra etapa, seja ela académica e/ou profissional, esta tese de doutoramento é o resultado de um longo e árduo percurso de trabalho e de dedicação que, por inúmeros motivos, se estendeu por diversos anos repletos de obstáculos e de vitórias. No decorrer desta jornada foi notório o impacto positivo que senti devido à confiança que várias pessoas depositaram no desenvolvimento desta etapa académica e, acima de tudo, o apoio e a compreensão demonstrado(a) pelas pessoas que me são mais próximas. Assim sendo, com o culminar deste ciclo de estudos, surge então a oportunidade de agradecer formalmente a todas as pessoas que contribuíram de forma positiva para que conseguisse concretizar este desejo académico.

Em primeiro lugar gostaria de destacar o Professor Doutor Kouamana Bousson, por todo(a) o acompanhamento e a orientação prestado(a) desde o convite para integrar a família da Universidade da Beira Interior (UBI), passando pela definição e a atribuição de um tema extremamente pertinente e de elevado interesse na atualidade do setor do transporte aéreo e, por fim, mas não menos importante, por incentivar e por potencializar o desenvolvimento das minhas capacidades e competências. Agradeço também pela sua experiência e sabedoria que permitiu a transmissão de conhecimentos valiosos e cuja aprendizagem se tornou muito mais interessante e cativante através de conversas, reflexões, discussões e críticas construtivas, permitindo um desenvolvimento intelectual que não teria sido possível somente através da leitura de bibliografia de renome. Por outro lado, agradeço também a sua metodologia de orientação que impulsionou a minha proatividade e a tomada de decisões que proporcionaram uma reflexão científica autónoma, independente e imprescindível para alcançar os objetivos a que me propus inicialmente.

Em segundo lugar gostaria de realçar a amabilidade e a disponibilidade do Sr. Oleg Rakhimov, vice-presidente da AirNav Systems e responsável pelo desenvolvimento de negócios e de vendas na região dos Estados Unidos da América (EUA), com quem foi estabelecido contacto durante vários meses para a definição e a preparação de uma amostra de dados personalizada que foi utilizada para o desenvolvimento da modelação analisada ao longo deste trabalho de investigação.

Em terceiro lugar gostaria de enaltecer as pessoas mais importantes da minha vida, os meus pais. Agradeço pelo companheirismo ao longo de toda a minha vida e mais concretamente no término deste ciclo de estudos, desde a sua companhia em longas e frequentes viagens de comboio entre Lisboa e Covilhã, pela disponibilidade, paciência e compreensão em inúmeros momentos, pelas palavras que transmitiram motivação nos momentos de tensão, frustração, cansaço e receio e, por fim, pelo amor que se reflete em cada passo que dou na minha vida. Agradeço também pelo incentivo constante que contribuiu, e continuará a ser um fator imprescindível, para o meu crescimento efetivo, tanto a nível académico como profissional e, acima de tudo, pessoal.

Provavelmente o espaço em questão seria demasiado formal para listar e apresentar os merecidos e devidos agradecimentos a todas as pessoas que, de alguma forma, contribuíram de forma direita ou indireta, para a decisão de iniciar este ciclo de estudos e concluí-lo com sucesso. De qualquer forma, o meu agradecimento ficará impresso nesta página para todos(as) aqueles(as) que tiverem o privilégio de ler o fruto desta etapa da minha vida e espero que, de alguma forma, possa incentivar pelo menos uma pessoa a procurar saber um pouco mais sobre a temática em análise.

O trabalho de investigação desenvolvido decorreu na Unidade de Investigação LAETA-UBI/AeroG (Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica), pertencente ao Departamento de Ciências Aeroespaciais (DCA) da Universidade da Beira Interior (UBI) e apoiada pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

laeta laboratório associado AeroG

DCA DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS AEROESPACIAIS

UBI UNIVERSIDADE BEIRA INTERIOR

FCT Fundação para a Ciência e a Tecnologia
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO E CIÊNCIA

Resumo

O aumento da procura sentido no setor do transporte aéreo refletiu-se no aumento da densidade do fluxo de aeronaves principalmente nas zonas terminais, sendo estas áreas designadas em inglês por Terminal Maneuvering Area (TMA) e fundamentais para a correta realização das aterragens e das descolagens. Esta sobrecarga foi gerida por inúmeros(as) agentes que observaram, controlaram e tomaram as decisões adequadas em cada momento, aliando essas tarefas com o(a) correto(a) tratamento e análise dos dados obtidos através de inúmeras fontes relevantes e dos programas computacionais que têm sido criados, desenvolvidos e implementados nas últimas décadas. Tendo por base esta problemática, pretendeu-se com o presente trabalho de investigação analisar, de forma concreta e crítica, a complexidade da otimização da gestão da capacidade das TMAs e propor medidas corretivas, obtendo uma estimativa preditiva do nível de ocupação das mesmas, em um determinado momento futuro, evitando a ocorrência de congestionamentos.

O desejo de garantir e até mesmo de aumentar os níveis da segurança operacional motivaram a constante procura por métodos e metodologias, aliados(as) a programas computacionais. Por esse motivo, a recolha obtida através da revisão bibliográfica permitiu enunciar, descrever e exemplificar as principais medidas utilizadas até aos dias de hoje para gerir o fluxo de tráfego aéreo. Foi possível, dessa forma, evidenciar aspetos que poderão ser analisados, de forma mais detalhada, em trabalhos futuros, proporcionando sugestões de melhoria que beneficiem todos(as) os(as) utilizadores(as) deste setor. Desta forma, e através da modelação realizada com o suporte e a aplicação de redes dinâmicas, foi possível detetar o padrão de funcionamento do fluxo de tráfego aéreo na TMA do Aeroporto Humberto Delgado e sugerir as medidas adequadas que permitirão melhorar a gestão diária do fluxo de tráfego aéreo e que auxiliarão na previsão do mesmo e do nível de ocupação da TMA em análise, com o intuito de implementar essas medidas de forma atempada e segura.

A modelação do fluxo de tráfego aéreo efetuada através da aplicação da Teoria das Cadeias de Markov permitiu a criação de um algoritmo cujo principal objetivo incidiu na otimização e na gestão entre a capacidade da TMA e a procura de aeronaves em cada momento, tendo em conta os inúmeros recursos existentes e podendo o mesmo ser extrapolado para outras TMAs.

A metodologia selecionada representa um processo de otimização pois tem a capacidade de, através de um procedimento matemático, definir uma solução ótima para a gestão do nível de ocupação da TMA em estudo, maximizando o fluxo de tráfego aéreo com o intuito de satisfazer a procura registada, mas salvaguardando o nível de segurança operacional pretendido a qualquer momento e, simultaneamente, minimizando os atrasos verificados nas operações de tráfego aéreo. Esta otimização é conseguida através da análise da dinâmica verificada no fluxo de tráfego aéreo registado e da identificação de padrões de procura, sendo possível, dessa forma, analisar a variação do congestionamento do fluxo de tráfego aéreo ao longo do tempo. Salienta-se que esta abordagem nunca foi implementada no contexto do presente trabalho de investigação, revelando o seu carácter de originalidade.

Através dos modelos criados foi possível identificar o grau de saturação da TMA selecionada e a necessidade de adaptação de medidas e/ou políticas já instauradas, tendo em conta as limitações físicas existentes e que restringem o aumento da procura do fluxo de tráfego aéreo. Desta forma verificou-se o elevado grau de constrangimento vivenciado, durante os períodos analisados, tendo um impacto direto na segurança das operações de tráfego aéreo. Assim sendo, é notória a necessidade da implementação de medidas que consigam minimizar os períodos de saturação, podendo ser tomadas pelas companhias de transporte aéreo através, por exemplo, da disponibilização de diferentes horários de planeamentos de voos e/ou rotas de voo alternativas que, de alguma forma, evitem as situações de constrangimento ou, por outro lado, de medidas tomadas pelas infraestruturas aeroportuárias e pelos(as) agentes que colaboram com o intuito de minimizarem os atrasos verificados nos diferentes voos e, dessa forma, evitando a aglomeração de aeronaves nas TMAs, salvaguardando e garantindo margem para lidarem com situações de emergência e/ou inesperadas.

Por fim, mas não menos importante, salienta-se a importante capacidade de previsão obtida a partir dos modelos criados, permitindo dessa forma, e através do conhecimento do comportamento presente de uma determinada rede dinâmica, antever o seu comportamento num momento futuro e auxiliar na otimização da gestão do fluxo de tráfego aéreo. Esta característica é fundamental e de extrema utilidade não só para o conhecimento dos(as) agentes como também para os(as) estudiosos(as) empenhados(as) no desenvolvimento de programas computacionais que pretendem ser instrumentos indispensáveis neste processo.

Palavras-chave

Gestão do Tráfego Aéreo; TMA; Otimização do Fluxo Aéreo; Redes Dinâmicas; Cadeias de Markov

Folha em branco

Abstract

The increase in demand felt in the air transport sector was reflected in the increase in the air traffic flow density, mainly in the Terminal Maneuvering Area (TMA), and essential for the correct performance of landings and take-offs. This overload was managed by numerous agents who observed, controlled and took the appropriate decisions at each moment, combining these tasks with the correct treatment and analysis of data obtained through numerous relevant sources and softwares that have been created, developed and implemented in recent decades. Based on this problem, this reseach work intended to analyze, in a concrete and critical way, the complexity of optimizing the TMAs capacity management, obtaining a predictive estimate of its occupancy level, at a certain future moment, avoiding the occurrence of congestion.

The desire to guarantee and even increase the safety levels motivated the constant search for methods and methodologies, allied to softwares. For this reason, the collection obtained through bibliographic review allowed us to enunciate, describe and exemplify the main measures used until today to manage the air traffic flow. In this way, it was possible to highlight aspects that could be analyzed in more detail in future work, providing suggestions for improvements that benefit all users of this sector. In this way, and through the modeling carried out with the support and application of dynamic networks, it was possible to detect the operating pattern of the air traffic flow at the Humberto Delgado Airport TMA and suggest the appropriate measures that will improve the daily air traffic flow management and that will help in predicting the same and the occupation level of this TMA, with the aim of implementing these measures in a timely and safe manner.

The modeling of the air traffic flow carried out through the application of the Markov Chain Theory allowed the creation of an algorithm whose main objective focused on the optimization and management between the TMAs capacity and the aircraft demand at each moment, considering the numerous existing resources and which can be extrapolated to other TMAs.

The selected methodology represents an optimization process as it has the ability, through a mathematical procedure, to define an optimal solution for managing the TMA occupancy level under study, maximizing the air traffic flow to satisfy registered demand, but safeguarding the desired safety level at any time and, simultaneously, minimizing delays in air traffic operations.

This optimization is achieved through the analysis of the dynamics observed in the recorded air traffic flow and the identification of demand patterns, making it possible to analyze the variation in air traffic flow congestion over time. It should be noted that this approach has never been implemented in the context of this research work, revealing its original nature.

Through the models created, it was possible to identify the degree of saturation of the selected TMA and the need to adapt measures and/or policies already in place, considering the physical limitations that restrict the increase in demand for air traffic flow. In this way, the high degree of constraint experienced during the analyzed periods was verified, having a direct impact on the safety of air traffic operations. Therefore, there is a clear need to implement measures that can minimize saturation periods, which can be taken by airlines through, for example, the availability of different flight schedules and/or alternative flight routes that, somehow, avoid the observed constraints or, on the other hand, measures taken by the airports and by the agents that collaborate in order to minimize the delays verified in the different flights and, in this way, avoiding the agglomeration of aircraft in the TMAs, safeguarding and guaranteeing margin to deal with emergency and/or unexpected situations.

Last but not least, the important predictive capacity obtained from the created models is highlighted, thus allowing, through knowledge of the present behavior of a given dynamic network, to predict its behavior in the future and help in the optimization of air traffic flow management. This characteristic is fundamental and extremely useful not only for the knowledge of agents but also for the scholars engaged in the development of softwares that intend to be indispensable instruments in this process.

Keywords

Air Traffic Management; TMA; Air Traffic Flow Optimization; Dynamic Networks; Markov Chains

Índice

1 Introdução 01
1.1 Considerações Gerais 03
1.2 Contextualização da ATFM 09
1.3 Principais Agentes 11
1.4 Problemática da Gestão da Capacidade das TMAs 12
1.5 Principais Objetivos 12
1.6 Estrutura da Tese 18

2 Estrutura e Capacidade de uma TMA 21
2.1 Definição de Capacidade 22
2.2 Contextualização da TMA de Lisboa 24
2.2.1 Espaço Aéreo 24
2.2.2 Regiões de Informação de Voo 25
2.2.3 TMA de Lisboa 26
2.2.4 Aeroporto de Lisboa 28
2.2.5 SID e STAR 29
2.3 Impacto do Congestionamento 30
2.4 Variáveis que Afetam a Capacidade 34
2.5 Tipos de Capacidade 36
2.6 Solução da Modelação 39
2.7 Discussão 40

3 Princípios de Análise do Fluxo de Tráfego Aéreo 43
3.1 Conceitos Relativos ao Fluxo de Tráfego Aéreo 43
3.1.1 Métodos 44
3.1.2 Metodologias 44
3.1.3 Modelos 45
3.1.4 Abordagens 47
3.1.4.1 Abordagem Baseada em Modelos Estatísticos 47
3.1.4.2 Abordagem Baseada em Sistemas Multiagentes 50
3.2 Medidas 54
3.2.1 Programas que Geram Diferentes Medidas 55
3.2.1.1 AFP 55
3.2.1.2 GDP 57

3.2.2 Gestão da Relação entre a Procura e a Oferta numa Infraestrutura Aeroportuária 60
3.2.2.1 AAR 60
3.2.2.2 AC 61
3.2.2.3 ADL 62
3.2.2.4 TBFM 63
3.2.3 Gestão da Separação entre Aeronaves nas Diversas Fases de Voo 65
3.2.3.1 MINIT 65
3.2.3.2 MIT 66
3.2.4 Gestão de Rotas de Aeronaves 67
3.2.4.1 ICR 67
3.2.4.2 TMA 68
3.2.5 Gestão dos Níveis de Voo nas Diversas Fases de Voo 69
3.2.5.1 *Airborne Holding* 70
3.2.6 Gestão Temporal das Operações das Aeronaves 72
3.2.6.1 EDCT 73
3.2.6.2 GS 74
3.3 Programas Computacionais 75
3.3.1 ATFMGS 76
3.3.2 CARAT 78
3.3.3 CARPAT 78
3.3.4 CASA 79
3.3.5 FACET 80
3.3.6 ISA 81
3.3.7 P2 82
3.3.8 SWAP 83
3.4 Projetos 84
3.4.1 Air MIDAS 85
3.4.2 CASSIOPEIA 85
3.5 Sistemas 86
3.5.1 SISCONFLUX 87
3.5.2 STVD 89
3.5.3 SYNCROMAX 90
3.6 Análise e Síntese das Medidas Implementadas 91
3.7 Discussão 94

4 Modelação pelas Cadeias de Markov 97
4.1 Princípios das Cadeias de Markov 98
4.2 Descrição dos Tipos de Cadeias de Markov 105
4.3 Fundamentos da Metodologia de Previsão 107
4.4 Aplicabilidade na Gestão de TMA 109
4.5 Modelação do Fluxo 111
4.5.1 Tratamento dos Dados 113
4.5.2 Estados 118
4.5.3 Probabilidades de Transição 121
4.5.3.1 RD-A 123
4.5.3.2 RD-B 124
4.5.3.3 RD-C 124
4.5.3.4 RD-D 124
4.5.3.5 RD-E 125
4.5.3.6 RD-F 125
4.5.3.7 RD-G 126
4.5.3.8 RD-H 126
4.5.3.9 RD-I 127
4.5.4 Rede Dinâmica 127
4.5.4.1 RD-A 128
4.5.4.2 RD-B 129
4.5.4.3 RD-C 129
4.5.4.4 RD-D 130
4.5.4.5 RD-E 131
4.5.4.6 RD-F 131
4.5.4.7 RD-G 132
4.5.4.8 RD-H 133
4.5.4.9 RD-I 133
4.6 Discussão 134

5 Análise Numérica das Redes Markovianas 137
5.1 Apresentação e Análise dos Dados 139
5.1.1 Tipos de Aeronaves 139
5.1.2 Impacto das Variáveis 140
5.1.3 Taxa de Ocupação 142
5.1.3.1 RD-A 142
5.1.3.2 RD-B 143

5.1.3.3 RD-C 144
5.1.3.4 RD-D 145
5.1.3.5 RD-E 146
5.1.3.6 RD-F 147
5.1.3.7 RD-G 148
5.1.3.8 RD-H 149
5.1.3.9 RD-I 150
5.1.4 Análise das Redes Dinâmicas 151
5.1.4.1 RD-A 152
5.1.4.2 RD-B 155
5.1.4.3 RD-C 157
5.1.4.4 RD-D 160
5.1.4.5 RD-E 162
5.1.4.6 RD-F 164
5.1.4.7 RD-G 167
5.1.4.8 RD-H 170
5.1.4.9 RD-I 173
5.2 Discussão de Resultados 175
5.2.1 Resultados Transversais às Redes Dinâmicas 176
5.2.1.1 Caracterização da Rede Dinâmica 176
5.2.1.2 Distribuição de Probabilidades Estacionária 176
5.2.1.3 Estados 178
5.2.1.4 Tempo Médio de Recorrência Esperado 178
5.2.1.5 Tempo Médio de Transição Entre Dois Estados 179
5.2.1.6 Reversibilidade 180
5.2.1.7 Movimento da Rede Dinâmica 180
5.2.1.8 Ação dos(as) Agentes 182
5.2.2 Seleção de Variáveis 183
5.3 Discussão 183

6 Conclusões, Discussões e Trabalhos Futuros 187
6.1 Análise do Cumprimento dos Objetivos 187
6.2 Metodologia Utilizada 188
6.3 Principais Conclusões Relativas aos Resultados Obtidos 189
6.4 Trabalhos Futuros 191

Referências Bibliográficas 195

Anexos 219
Anexo A – Outras Medidas e Ferramentas 221
Anexo B – Dados Iniciais das Redes Dinâmicas 237
Anexo C – Tipos de Aeronaves 243

Folha em branco

Lista de Equações

Equação 2.1 – Relação entre os Quatro Tipos de Capacidade 38
Equação 4.1 – Variáveis das Cadeias de Markov 98
Equação 4.2 – Estados de uma Rede Dinâmica 99
Equação 4.3 – Distribuição Inicial de uma Cadeia de Markov 99
Equação 4.4 – Probabilidade de Transição entre Dois Estados 99
Equação 4.5 – Particularidades da Probabilidade de Transição 100
Equação 4.6 – Matriz de Probabilidade de Transição 100
Equação 4.7 – Probabilidade de Transição entre Dois Estados em *N* Passos 101
Equação 4.8 – Matriz de Transição de Estados 101
Equação 4.9 – Representação da Equação de Chapman-Kolmogorov 101
Equação 4.10 – Aplicação Particular da Equação de Chapman-Kolmogorov 101
Equação 4.11 – Distribuição de Probabilidades Estacionária 102
Equação 4.12 – Particularidade da Distribuição de Probabilidades Estacionária 102
Equação 4.13 – Previsão do Comportamento da Rede Dinâmica 102
Equação 4.14 – Representação de um Estado Alcancável ou Acessível 102
Equação 4.15 – Representação de um Estado Comunicável com Ele Próprio 102
Equação 4.16 – Representação do Desrespeito da Condição Simétrica 103
Equação 4.17 – Representação de um Estado Recorrente ou Persistente 103
Equação 4.18 – Representação do Tempo Médio de Recorrência Esperado 103
Equação 4.19 – Representação de um Estado Transiente 103
Equação 4.20 – Representação de um Estado Absorvente 103
Equação 4.21 – Representação da Primeira Definição de Estado Periódico 104
Equação 4.22 – Representação da Segunda Definição de Estado Periódico 104
Equação 4.23 – Apresentação dos Estados da Rede Dinâmica 119
Equação 4.24 – Cálculo da Probabilidade de Transição entre Dois Estados 123
Equação 4.25 – Matriz de Transição de Estados da RD-A 123
Equação 4.26 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-A 123
Equação 4.27 – Matriz de Transição de Estados da RD-B 124
Equação 4.28 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-B 124
Equação 4.29 – Matriz de Transição de Estados da RD-C 124
Equação 4.30 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-C 124
Equação 4.31 – Matriz de Transição de Estados da RD-D 125

Equação 4.32 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-D 125
Equação 4.33 – Matriz de Transição de Estados da RD-E 125
Equação 4.34 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-E 125
Equação 4.35 – Matriz de Transição de Estados da RD-F 125
Equação 4.36 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-F 126
Equação 4.37 – Matriz de Transição de Estados da RD-G 126
Equação 4.38 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-G 126
Equação 4.39 – Matriz de Transição de Estados da RD-H 126
Equação 4.40 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-H 126
Equação 4.41 – Matriz de Transição de Estados da RD-I 127
Equação 4.42 – Matriz de Probabilidade de Transição da RD-I 127
Equação 5.1 – Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica 140
Equação 5.2 – Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica 140
Equação 5.3 – Matriz de Distribuição de Probabilidades Estacionária – Versão Inicial 152
Equação 5.4 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-A – Versão Inicial 152
Equação 5.5 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados 153
Equação 5.6 – Reversibilidade da Rede Dinâmica 154
Equação 5.7 – Matriz de Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-A – Versão Final 154
Equação 5.8 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-A – Versão Final 154
Equação 5.9 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-B 156
Equação 5.10 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-C – Versão Inicial 158
Equação 5.11 – Matriz de Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-C – Versão Final 159
Equação 5.12 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-C – Versão Final 159
Equação 5.13 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-D 160
Equação 5.14 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-E – Versão Inicial 162
Equação 5.15 – Matriz de Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-E – Versão Final 164
Equação 5.16 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-E – Versão Final 164

Equação 5.17 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-F – Versão Inicial 165
Equação 5.18 – Matriz de Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-F – Versão Final 167
Equação 5.19 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-F – Versão Final 167
Equação 5.20 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-G – Versão Inicial 168
Equação 5.21 – Matriz de Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-G – Versão Final 170
Equação 5.22 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-G – Versão Final 170
Equação 5.23 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-H – Versão Inicial 171
Equação 5.24 – Matriz de Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-H – Versão Final 173
Equação 5.25 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-H – Versão Final 173
Equação 5.26 – Distribuição de Probabilidades Estacionária da RD-I 174

Folha em branco

Lista de Figuras

Figura 2.1 – RIV de Lisboa 25
Figura 2.2 – TMA de Lisboa 26
Figura 2.3 – CTR de Lisboa 27
Figura 2.4 – Áreas Não Geridas 27
Figura 2.5 – Áreas Geridas 27
Figura 2.6 – Rotas de Descolagem do Aeroporto de Lisboa 29
Figura 2.7 – Rotas de Aterragem no Aeroporto de Lisboa 29
Figura 4.1 – Algoritmo de Previsão do Fenómeno 107
Figura 4.2 – Grafo do Fenómeno 122
Figura 4.3 – Grafo da RD-A 128
Figura 4.4 – Grafo da RD-B 129
Figura 4.5 – Grafo da RD-C 129
Figura 4.6 – Grafo da RD-D 130
Figura 4.7 – Grafo da RD-E 131
Figura 4.8 – Grafo da RD-F 131
Figura 4.9 – Grafo da RD-G 132
Figura 4.10 – Grafo da RD-H 133
Figura 4.11 – Grafo da RD-I 133
Figura 5.1 – Exemplo de Rede Europeia 138
Figura 5.2 – Grafo da Rede Dinâmica 141

Folha em branco

Lista de Gráficos

Gráfico 1.1 – Aeronaves 04
Gráfico 1.2 – Descolagens 05
Gráfico 1.3 – Carga 06
Gráfico 1.4 – Passageiros(as) 06
Gráfico 1.5 – Ocorrências 07
Gráfico 1.6 – Fatalidades 07
Gráfico 1.7 – Receitas 08
Gráfico 1.8 – Despesas 09
Gráfico 5.1 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-A 143
Gráfico 5.2 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-B 144
Gráfico 5.3 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-C 145
Gráfico 5.4 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-D 146
Gráfico 5.5 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-E 147
Gráfico 5.6 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-F 148
Gráfico 5.7 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-G 149
Gráfico 5.8 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-H 150
Gráfico 5.9 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-I 151

Folha em branco

Lista de Tabelas

Tabela 1.1 – Principais Indicadores do Setor do Transporte Aéreo 03
Tabela 1.2 – Pilares Fundamentais da ATFM 10
Tabela 1.3 – Objetivos da ATFM 15
Tabela 1.4 – Princípios da ATFM 15
Tabela 1.5 – Benefícios Operacionais da ATFM 16
Tabela 1.6 – Benefícios Sociais da ATFM 16
Tabela 2.1 – Classificação do Espaço Aéreo 24
Tabela 2.2 – Apresentação do Aeroporto de Lisboa 28
Tabela 2.3 – Apresentação das Rotas de Descolagem do Aeroporto de Lisboa 29
Tabela 2.4 – Apresentação das Rotas de Aterragem no Aeroporto de Lisboa 30
Tabela 2.5 – Indicadores de Transporte Aéreo 33
Tabela 2.6 – Variáveis que Afetam a Capacidade 35
Tabela 3.1 – Medidas Macro – Programas que Geram Diferentes Medidas 55
Tabela 3.2 – Medidas Micro – Gestão da Relação entre a Procura e a Oferta numa Infraestrutura Aeroportuária 60
Tabela 3.3 – Medidas Micro – Gestão da Separação entre Aeronaves nas Diversas Fases do Voo 65
Tabela 3.4 – Medidas Micro – Gestão de Rotas de Aeronaves 67
Tabela 3.5 – Medidas Micro – Gestão dos Níveis de Voo nas Diversas Fases do Voo 70
Tabela 3.6 – Diferenças dos Níveis de Voo 70
Tabela 3.7 – Medidas Micro – Gestão Temporal das Operações das Aeronaves 73
Tabela 3.8 – Programas Computacionais 75
Tabela 3.9 – Características Benéficas do SESAR 84
Tabela 3.10 – Projetos 85
Tabela 3.11 – Sistemas 86
Tabela 3.12 – Pontos Fortes e Pontos Fracos do SISCONFLUX 89
Tabela 3.13 – Pontos Fortes e Pontos Fracos do STVD 90
Tabela 3.14 – Pontos Fortes e Pontos Fracos do SYNCROMAX 91
Tabela 4.1 – Tipos de Cadeias de Markov 105
Tabela 4.2 – Utilidade dos Diferentes Tipos de Cadeias de Markov 106
Tabela 4.3 – Limitações das Cadeias de Markov 107
Tabela 4.4 – Características dos Dados Enviados pela AirNav Systems 112

Tabela 4.5 – Análise Genérica dos Voos ao Longo de 366 Dias 115
Tabela 4.6 – Apresentação das Redes Dinâmicas Provisórias 116
Tabela 4.7 – Apresentação das Redes Dinâmicas Definitivas 118
Tabela 4.8 – Análise da Definição dos Estados 119
Tabela 4.9 – Explicação da Apresentação dos Dados Iniciais das Redes Dinâmicas 120
Tabela 4.10 – Análise Preliminar de Situações de Congestionamento das Redes Dinâmicas 121
Tabela 5.1 – Principais Voos com Prioridade 137
Tabela 5.2 – Estados da RD-A 152
Tabela 5.3 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-A – Versão Inicial 153
Tabela 5.4 - Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-A 153
Tabela 5.5 – Reversibilidade da RD-A – Versão Inicial 154
Tabela 5.6 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-A – Versão Final 155
Tabela 5.7 – Reversibilidade da RD-A – Versão Final 155
Tabela 5.8 – Estados da RD-B 155
Tabela 5.9 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-B 156
Tabela 5.10 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-B 156
Tabela 5.11 – Reversibilidade da RD-B 157
Tabela 5.12 – Estados da RD-C 157
Tabela 5.13 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-C – Versão Inicial 158
Tabela 5.14 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-C 158
Tabela 5.15 – Reversibilidade da RD-C – Versão Inicial 159
Tabela 5.16 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-C – Versão Final 159
Tabela 5.17 – Reversibilidade da RD-C – Versão Final 160
Tabela 5.18 – Estados da RD-D 160
Tabela 5.19 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-D 160
Tabela 5.20 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-D 161
Tabela 5.21 – Reversibilidade da RD-D 161
Tabela 5.22 – Estados da RD-E 162
Tabela 5.23 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-E – Versão Inicial 162
Tabela 5.24 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-E 163
Tabela 5.25 – Reversibilidade da RD-E – Versão Inicial 163

Tabela 5.26 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-E – Versão Final 164
Tabela 5.27 – Reversibilidade da RD-E – Versão Final 164
Tabela 5.28 – Estados da RD-F 165
Tabela 5.29 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-F – Versão Inicial 165
Tabela 5.30 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-F 166
Tabela 5.31 – Reversibilidade da RD-F – Versão Inicial 166
Tabela 5.32 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-F – Versão Final 167
Tabela 5.33 – Reversibilidade da RD-F – Versão Final 167
Tabela 5.34 – Estados da RD-G 168
Tabela 5.35 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-G – Versão Inicial 168
Tabela 5.36 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-G 169
Tabela 5.37 – Reversibilidade da RD-G – Versão Inicial 169
Tabela 5.38 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-G – Versão Final 170
Tabela 5.39 – Reversibilidade da RD-G – Versão Final 170
Tabela 5.40 – Estados da RD-H 171
Tabela 5.41 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-H – Versão Inicial 171
Tabela 5.42 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-H 172
Tabela 5.43 – Reversibilidade da RD-H – Versão Inicial 172
Tabela 5.44 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-H – Versão Final 173
Tabela 5.45 – Reversibilidade da RD-H – Versão Final 173
Tabela 5.46 – Estados da RD-I 174
Tabela 5.47 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-I 174
Tabela 5.48 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-I 175
Tabela 5.49 – Reversibilidade da RD-I 175
Tabela 5.50 – Tendência de Comportamento da Rede Dinâmica 180

Folha em branco

Lista de Acrónimos

(As siglas que possuem um asterisco (*) encontram-se descritas no Anexo A deste trabalho de investigação.)

3DPAM*	Three-Dimensional Path Arrival Management
4D*	Quatro Dimensões
A-SMGCS*	Advanced Surface Movement, Guidance and Control System
AAC*	Advanced Airspace Concept
AACR*	Automated Airborne Congestion Resolution
AACS*	Automated Airspace Computer System
AAR	Airport Acceptance Rate
AARP*	Automated Airspace Restriction Planner
AATMS*	Advanced Air Traffic Management System
AATT*	Advanced Air Transportation Technologies
ABNA*	Airspace BottleNeck Analyzer
AC	Adaptive Compression
ACAS*	Airborne Collision Avoidance System
ACES*	Airspace Concept Evaluation System
ACIM*	Air Carrier Investment Model
ACM*	Airfield Capacity Model
ADL	Aggregate Demand List
ADM*	Aggregate Demand Model
ADR	Airport Departure Rate
ADSIM*	Airfield Delay SImulation Model
AESA	Agência Europeia para a Segurança da Aviação
AFA	Administração Federal de Aviação
aFAST*	Active Final Approach Spacing Tool
AFP	Airspace Flow Program
AFT*	Airport Flow Tool
AH	Airborne Holding
AIM*	Aeronautical Information Management
Air MIDAS	Air Man-Machine Integrated Design and Analysis System
AIS	Aeronautical Information Service
AITA	Associação Internacional de Transportes Aéreos
AM*	Arrival Manager
AMAN*	Arrival Management AutomatioNs
AMOC*	ATFM MOdeling Capability
ANAE	Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço
AND*	Approximate Network Delays
ARC 2000*	Automatic Radar Control 2000
ARMS*	Aviation Resource Management System
ARP*	Airspace Restriction Planner
ASAC*	Aviation Systems Analysis Capability
ASAS*	Airborne Separation Assistance System
ASCENT*	ATFM System Concept Evaluator for New Technologies
ASEP*	Airborne Self sEParation
ASIM*	Airspace SIMulation
ASMT*	Automatic Safety Monitoring Tool
ASP*	Arrival Sequencing Program
ASRS*	Aviation Safety Reporting System

ATAC*	Airspace Traffic dAta Capture
ATC	Air Traffic Control
ATFCMS*	Air Traffic Flow and Capacity Management Strategy
ATFM	Air Traffic Flow Management
ATFMGS	ATFM Gride Service
ATFMP	Air Traffic Flow Management Problem
ATFMRP	Air Traffic Flow Management Rerouting Problem
ATIDS*	Airport Surface Target IDentification System
ATMS*	Advanced Traffic Management System
AVOSS*	Advanced VOrtex Spacing System
BADA*	Base of Aircraft DAta
BDT*	Banc De Test
B_m	Management-Induced Backlog
B_w	Weather-Induced Backlog
CAASD*	Center for Advanced Aviation System Development
CADEO*	Controller Assistance for DEparture Optimization
CAISS*	Common ATM Information State Space
CAP*	Collaborative Arrival Planning
CAPAN*	CAPacity ANalyzer
CARAT	Computer Aided Route Allocation Tool
CARPAT	Computational Appliance for Rapid Prediction of Aircraft Trajectories
CARTS*	Common Automated Radar Terminal System
CASA	Computer Assisted/Aided Slot Allocation
CASSIOPEIA	Complex Adaptive Systems for Optimization of Performance in ATM
CAT*	Constrained Airspace Tool
CAUTRA*	Coordinateur AUtomatisé du TRafic Aérien
CCD*	Continuous Climb Departure
CCFP*	Collaborative Convective Forecast Product
CDA*	Constinuous Descent Approaches
CDM	Collaborative Decision Making
CDQM*	Collaborative Departure Queue Management
CDR*	Coded Departure Routes
CDSAA*	Centro de Desenvolvimento de Sistemas Avançados de Aviação
CENA*	Centre d'Etudes de la Navigation AÈrienne
CENA*	Centro de Estudos de Navegação Aérea
CFMU*	Central Flow Management Unit
CHAMAN*	CHAotic Situation MANagement
CIWS*	Corridor Integrated Weather System
COCA*	COmplexity and CApacity
CODAS*	Consolidated Operations and Delay Analysis System
CoDMAN*	Collaborative Departure MANagement
COMPAS*	Computer Oriented Metering Planning and Advisory System
COP25	Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
COSAAC*	COmmon Simulator to Assess ATFM Concepts
COVID-19	Coronavirus Disease 2019
CPN*	Coloured Petri Net
CPS*	Constrained Position Shifteded
CPTP*	Conflict Prediction and Trial Planning
CSV	Comma Separated Values
CTA*	Controlled Time of Arrival
CTAS*	Center/TRACON Automation System
CTOP*	Collaborative Trajectory Options Program

CTR	Control Zone
CWAM*	Convective Weather Avoidance Model
D2*	Direct-To
DA*	Delay Assignment
DA*	Descent Advisor
DAG-TM*	Distributed Air-Ground Traffic Management
DAR*	Dynamic Arrival Routes
DART*	Data-driven AiRcraft Trajectory prediction Research
DATS*	Durable Aviation Trainer Solutions
DAVINCI*	Departure and ArriVal INtegrated Management System for Cooperative Improvement of Airport Traffic Flow
DCA	Departamento de Ciências Aeroespaciais
DDTC*	Datalink Delivery of Expected Taxi Clearances
DEPCOS*	DEParture Co-ordination System
DFD	Delay according to Flight Duration
DFM*	Departure Flow Management
DM*	Departure Manager
DMAN*	Departure Management AutomatioNs
DMEAN*	Dynamic Management of the European Airspace Network
DNM*	Directorate Network Management
DRAW*	Dynamic Routing for Arrivals in Weather
DRSG*	Dynamic Rerouting Static Ground holding
DSP*	Departure Sequencing Program
DWR*	Dynamic Weather Routes
E	Este
EASA	European Union Aviation Safety Agency
EATMS*	European Air Traffic Management System
EDA*	Efficient Descent Advisor
EDA*	En-route Descent Advisor
EDCT	Expect Departure Clearance Time
EDP*	Expedite Departure Path
ERAM*	En Route Automation Modernization
ERM*	En Route Metering
ESP*	En Route Sequencing Program
ETFMS*	Enhanced Tactical Flow Management System
ETMS*	Enhanced Traffic Management System
EUA	Estados Unidos da América
EUROCONTROL*	European Organization for the Safety of Air Navigation
FAA	Federal Aviation Administration
FACET	Future Air Traffic Management Concepts Evaluation Tool
FAME*	FAst Modifier Environment
FAP*	Future ATM Profile
FAST*	Final Approach Spacing Tool
FCA*	Flow Constrained Area
FCFS	First Come, First Serve
FCT	Fundação para a Ciência e a Tecnologia
FEP*	Flight Efficiency Plan
FIFO	First In, First Out
FIR	Flight Information Region
FL	Flight Level
FMP*	Flow Management Positions
FMS*	Flight Management System
FRA*	Free Route Concept

FSM*	Flight Schedule Monitor
ft	Feet
GAAP*	General Aviation Airport Program
GDP	Ground Delay Program
GRACE*	Generic Resolution Advisor and Conflict Evaluator
GRM*	Geometric Recourse Model
GS	Ground Stop
h	Hora
h	Hour
HERMES*	HEuristic Runway Movement Event Simulation
IACM	Integrated Airport Capacity Model
IATA	International Air Transport Association
ICAO	International Civil Aviation Organization
ICR	Integrated Collaborative Rerouting
IDAC*	Integrated Departure Arrival Capability
IFR	Instrument Flight Rules
IIAC*	Integrated Impact Assessment Capability
IMC	Instrument Meteorological Conditions
IMPACT*	Intelligent agent-based Model for Policy Analysis of Collaborative Traffic flow management
INE	Instituto Nacional de Estatística
INM*	Integrated Noise Model
IPMA	Instituto Português do Mar e da Atmosfera
ISA	Innovative Slot Allocation
ISAC*	Information Sharing Analysis Center
ITWS*	Integrated Terminal Weather System
LAADR*	Low Altitude Arrival and Departure Routing
LAETA	Laboratório Associado de Energia, Transportes e Aeronáutica
LCC	Low-Cost Carriers
LOC*	Landing Order Calculator
m	Metro
MAESTRO*	Means to Aid Expedition and Sequencing of Traffic with Research of Optimisation
MAGHP	Multi-Airport Ground Holding Program
MAP*	Monitor Alert Program
MBF	Módulo de Balanceamento de Fluxo
McTMA*	Multi-Center Traffic Management Advisor
MFCR*	Multi-Flight Common Routes
MIDAS*	Man-Machine Integration, Design, and Analysis System
MINIT	Minutes-In-Train
MIT	Miles-In-Train
MLM*	Mid-Level Model
MVMC	Marginal Visual Meteorological Conditions
N	Norte
N	North
N/A	Não Aplicável
NARIM*	National Airspace Resource Investment Model
NARSIM*	NLR ATC Research SIMulator
NAS-ADAPT*	NAS Airspace Dynamics Analysis and ParTitioning
NASA	National Aeronautics and Space Administration

NASCENT*	NAS Constraint Evaluation and Notification Tool
NASPAC*	National Airspace System Performance Analysis Capability
NEST*	NEtwork Strategic modelling Tool
NEVAC*	Network Estimation & Visualisation of ACC Capacity
NextGen	Next Generation Air Transportation System
NFM*	National Flow Model
NRP*	North American Route Program
NRSG*	No Rerouting Static Ground holding
NTML*	National Traffic Management Log
O	Oeste
OACI	Organização da Aviação Civil Internacional
OASIS*	Optimal Aircraft Sequencing using Intelligent Scheduling
OESNA*	Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea
OPTICON*	OPTImise CONfiguration
ORC*	Optimized Route Capability
P2	Progressive Planning
PACER*	Probabilistic Automation-Assisted Congestion Management for En Route
PARO*	Package for Analysis of Runway Operations
PAS*	Pseudo Aircraft System
PATCAS*	Predictive Approach Control Tactical Advisory System
PBA	Padrão de Balanceamento do Aeroporto
PCM*	Probabilistic Collocation Model
PDARS*	Performance Data Analysis and Reporting System
PDRC*	Precision Departure Release Capability
pFAST*	Passive Final Approach Spacing Tool
PHARE*	Program for Harmonized Air Traffic Management Research in Eurocontrol
PR*	Program Rate
PROMAS*	PROcess MAnagement Simulator
RAMS*	Re-organized ATC Mathematical Simulator
RATSG*	Robust Air Traffic Situation Generator
RBAc	Ration By Aircraft Size
RBPax	Ration By Passengers
RBS	Ration By Schedule
RD	Rede Dinâmica
RDS	Reduce Delay per Seat
RIV	Região de Informação de Voo
ROD	Reduce Overall Delay
RWY	Runway
S	Estado
S	State
SAAM*	System for Traffic Assignment and Analysis on a Macroscopic
SAGHP	Single-Airport Ground Holding Program
SALS*	Separate Access Landing System
SARA*	Speed And Route Advisor
SARDA*	Spot And Runway Departure Advisor
SART*	Situation Awareness Rating Tool
SCA*	Speed Control Advisor
SCS*	Slot Credit Substitution
SDAT*	Sector Design Analysis Tool
SDTF*	Surface Development and Test Facility

SESAR	Single European Sky ATM Research
SID	Standard Instrument Departure
SIM-C*	Strategy for Information Management and Collaboration
SISCONFLUX	System of the Application and Management of the Decision Support Air Traffic Flow Control
SISTRASAG*	SIStema de TRAnsmissão da Situação Aérea Geral
SMA*	Surface Movement Advisor
SMS*	Surface Management System
SODAA*	Surface Operations Data Analysis and Adaptation
SOSS*	Surface Operations Simulator and Scheduler
SP*	Sequencing Programs
SRS*	Standard Route Scheme
SRSG*	Static Rerouting Static Ground holding
STA*	Scheduled Time of Arrival
STAR	Standard Arrival Route
STARS*	Standard Terminal Automation Replacement System
STASS*	Stochastic Terminal Arrival Scheduling Software
STMP*	Special Traffic Management Program
STVD	Sistema de Tratamento e Visualização de Dados
SWAP	Severe Weather Avoidance Plan
SWIM*	System Wide Information Management
SYNCROMAX	Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo
T-TSAFE*	Terminal Tactical Separation Assurance Flight Environment
TAAM*	Total Airspace and Airport Modeller
TACEC*	Terminal Area Capacity Enhancing Concept
TACOT*	TACtical Operational Tool
TAF*	Terminal Area Forecasts
TAME*	Trajectory Analysis and Modeling Environment
TAP*	Terminal Area Productivity
TAPSS*	Terminal Area Precision Scheduling and Spacing
TATCA*	Terminal ATC Automation
TBFM	Time-Based Flow Management
TCA*	Tactical Customer Advocate
TCSDG*	Terminal Control Systems Development Group
TER*	Tower-En-Route
TFAS*	Traffic Flow Automation System
TFDM*	Terminal Flight Data Management
TFDM*	Tower Flight Data Manager
TFM*	Tactical Flow Manager
TFMS*	Traffic Flow Management System
TMA	Terminal Maneuvering Area
TMA	Traffic Management Advisor
TMI	Traffic Management Initiatives
TOPAZ*	Traffic Organization and Perturbation AnalyZer
TRACC*	Taxi Routing for Aircraft: Creation and Controlling
TS*	Trajectory Synthesizer
TSAFE*	Tactical Separation Assisted Flight Environment
TSDI*	TFM Surface Data Integration
TSS*	Terminal Sequencing and Spacing
TSSIM*	Traffic-Sensitive Sector Impedance Model
TWC	Trail World Championships
UAV*	Unmanned Aerial Vehicles
UBI	Universidade da Beira Interior
UEFA	Union of European Football Associations

URET*	User Request Evaluation Tool
VANT*	Veículos Aéreos Não Tripulado
VAST*	Virtual Airspace Simulation Technology
VFR	Visual Flight Rules
VMC	Visual Meteorological Conditions
VNAS*	Virtual National Airspace Simulation
VS	Versus
W	West
XXI	Número 21 (Numeração Romana)

Folha em branco

Lista de Símbolos

Símbolo	Descrição
$d(i)$	Período do Estado i
f_i	Frequência de, partindo do Estado i, voltar ao Estado i
f_{ij}	Frequência de, partindo do Estado i, chegar ao Estado j
i	Estado i
j	Estado j
k	Estado k
m	Etapa/Transição 2
M	Conjunto Total de Estados da Rede Dinâmica
n	Estados
n	Etapa/Transição 1
n	Instante Inicial
$n+1$	Instante Seguinte
$n-m$	Diferença entre as Etapas/Transições
N	Matriz de Transição de Estados
N	Transições
n_{00}	Frequência de Transição do Estado 0 para o Estado 0
n_{01}	Frequência de Transição do Estado 0 para o Estado 1
n_{10}	Frequência de Transição do Estado 1 para o Estado 0
n_{11}	Frequência de Transição do Estado 1 para o Estado 1
n_{ij}	Frequência de Transição do Estado i para o Estado j
N_{RD}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD
N_{RD-A}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-A
N_{RD-B}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-B
N_{RD-C}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-C
N_{RD-D}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-D
N_{RD-E}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-E
N_{RD-F}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-F
N_{RD-G}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-G
N_{RD-H}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-H
N_{RD-I}	Matriz de Transição de Estados da Rede Dinâmica RD-I

Símbolo	Descrição
P	Matriz de Probabilidade de Transição
P	Probabilidades
P^2	Probabilidade de Transição na Etapa 2
P^n	Probabilidade de Transição na Etapa n
P_{00}	Probabilidade de Transição do Estado 0 para o Estado 0
P_{01}	Probabilidade de Transição do Estado 0 para o Estado 1
P_{02}	Probabilidade de Transição do Estado 0 para o Estado 2
P_{03}	Probabilidade de Transição do Estado 0 para o Estado 3
P_{04}	Probabilidade de Transição do Estado 0 para o Estado 4
P_{10}	Probabilidade de Transição do Estado 1 para o Estado 0
P_{11}	Probabilidade de Transição do Estado 1 para o Estado 1
P_{12}	Probabilidade de Transição do Estado 1 para o Estado 2
P_{13}	Probabilidade de Transição do Estado 1 para o Estado 3
P_{14}	Probabilidade de Transição do Estado 1 para o Estado 4
P_{20}	Probabilidade de Transição do Estado 2 para o Estado 0
P_{21}	Probabilidade de Transição do Estado 2 para o Estado 1
P_{22}	Probabilidade de Transição do Estado 2 para o Estado 2
P_{23}	Probabilidade de Transição do Estado 2 para o Estado 3
P_{24}	Probabilidade de Transição do Estado 2 para o Estado 4
P_{30}	Probabilidade de Transição do Estado 3 para o Estado 0
P_{31}	Probabilidade de Transição do Estado 3 para o Estado 1
P_{32}	Probabilidade de Transição do Estado 3 para o Estado 2
P_{33}	Probabilidade de Transição do Estado 3 para o Estado 3
P_{34}	Probabilidade de Transição do Estado 3 para o Estado 4
P_{40}	Probabilidade de Transição do Estado 4 para o Estado 0
P_{41}	Probabilidade de Transição do Estado 4 para o Estado 1
P_{42}	Probabilidade de Transição do Estado 4 para o Estado 2
P_{43}	Probabilidade de Transição do Estado 4 para o Estado 3
P_{44}	Probabilidade de Transição do Estado 4 para o Estado 4
P_{ii}	Probabilidade de Transição do Estado i para o Estado i
P_{ij}	Probabilidade de Transição do Estado i para o Estado j
P_{ik}	Probabilidade de Transição do Estado i para o Estado k
P_{ji}	Probabilidade de Transição do Estado j para o Estado i

Símbolo	Descrição
P_{jj}	Probabilidade de Transição do Estado j para o Estado j
P_{jk}	Probabilidade de Transição do Estado j para o Estado k
P_{ki}	Probabilidade de Transição do Estado k para o Estado i
P_{kj}	Probabilidade de Transição do Estado k para o Estado j
P_{RD}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD
P_{RD-A}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-A
P_{RD-B}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-B
P_{RD-C}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-C
P_{RD-D}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-D
P_{RD-E}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-E
P_{RD-F}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-F
P_{RD-G}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-G
P_{RD-H}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-H
P_{RD-I}	Matriz de Probabilidade de Transição da Rede Dinâmica RD-I
RD	Rede Dinâmica
S	Conjunto Total de Estados da Rede Dinâmica
S	Estado da Rede Dinâmica
S_0	Estado 0
S_1	Estado 1
S_2	Estado 2
S_3	Estado 3
S_4	Estado 4
X_0	Variável Inicial/Passo ou Observação Inicial
X_n	Conjunto de Variáveis/Passos ou Observações
X_{n+1}	Variável/Passo/Observação Seguinte à Inicial
$\sum_{i=0}^{\infty}$	Somatório de Todos os Estados
π^0	Distribuição Inicial/Distribuição de Probabilidades Estacionária no Instante 0
π^n	Distribuição de Probabilidades Estacionária no Instante n
π_0	Distribuição de Probabilidades Estacionária do Estado 0
π_1	Distribuição de Probabilidades Estacionária do Estado 1
π_2	Distribuição de Probabilidades Estacionária do Estado 2
π_3	Distribuição de Probabilidades Estacionária do Estado 3

Símbolo	Descrição
π_4	Distribuição de Probabilidades Estacionária do Estado 4
π_i	Distribuição de Probabilidades Estacionária do Estado i
π_j	Distribuição de Probabilidades Estacionária do Estado j
μ_{ii}	Tempo Médio de Recorrência Esperado no Estado i
μ_{00}	Tempo Médio de Recorrência Esperado no Estado 0
μ_{11}	Tempo Médio de Recorrência Esperado no Estado 1
μ_{22}	Tempo Médio de Recorrência Esperado no Estado 2
μ_{33}	Tempo Médio de Recorrência Esperado no Estado 3
μ_{44}	Tempo Médio de Recorrência Esperado no Estado 4

Observação:

Salienta-se que poderão existir símbolos cuja representação poderá retratar diferentes grandezas de acordo com as fontes bibliográficas consultadas e, consequentemente, dependendo do(a) autor(a) responsável pela sua redação. Por esse motivo, e com o intuito de minimizar algum erro de interpretação, todos os símbolos utilizados ao longo do trabalho de investigação estão descritos na tabela acima e encontrar-se-ão associados a diferentes equações.

Capítulo 1

Introdução

Ao contrário do que muitas pessoas possam ter pensado nos últimos anos e, em muitos casos, ainda continuam a pensar, baseando as suas opiniões em um vasto conjunto de informações recebidas e/ou reunidas através de inúmeras fontes, o maior problema existente, e persistente, nos dias de hoje no setor do transporte aéreo não são os custos associados a este meio de transporte e nem tão pouco a morosidade proveniente dos procedimentos burocráticos e/ou a exigência e o carácter demasiado restritivo da regulamentação em vigor. Na realidade, o maior problema identificado, descrito e confirmado através da observação e do acompanhamento do normal funcionamento deste setor, centra-se na relação inversamente proporcional entre a variação da procura e da quantidade de recursos existentes. Tal como seria expectável, é visível o forte crescimento da utilização deste meio de transporte para a deslocação de carga, correio e/ou passageiros(as) mas, em contrapartida, os recursos, sejam eles físicos e/ou humanos, são invariavelmente limitados. A complexidade presente na relação anteriormente citada torna a procura e a expectativa de encontrar o equilíbrio pretendido numa tarefa diariamente desafiante para todos(as) os(as) envolvidos(as), doravante designados(as) por agentes.

Apesar dos esforços contínuos das autoridades aeronáuticas e dos(as) agentes, de forma a impulsionarem a procura e/ou o desenvolvimento de métodos e metodologias que permitam a realização de uma melhor gestão da capacidade das infraestruturas aeroportuárias assim como do movimento das aeronaves, o problema ainda se encontra presente nos dias de hoje. Por esse facto, surge a necessidade de analisar previamente as medidas existentes, detetando possíveis lacunas de forma a melhorá-las e/ou despoletando a necessidade da criação de novas ferramentas que consigam ir de encontro à resolução deste problema.

Por mais simples que pareça este problema, a verdade é que o mesmo possui um elevado nível de complexidade, pelo facto de interligar inúmeros(as) agentes, de afetar diferentes áreas do setor e de necessitar de uma atenção e de uma implementação particular consoante um vasto conjunto de fatores internos e/ou externos às operações de tráfego aéreo e a toda a sua envolvente. À medida que esta complexidade é analisada, é percetível que o seu tratamento deverá ser cuidadoso e específico para cada situação, tornando todo este processo demasiado moroso para o ritmo exigido pela rotina vivenciada pelo normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. Por este facto, surge a necessidade de desenvolver um modelo matemático que consiga lidar de forma atempada e adequada com as especificidades com que os(as) agentes lidam diariamente, permitindo uma tomada de decisão ponderada, aliando as competências tecnológicas e as humanas, sem nunca esquecer o impacto dessas decisões para a segurança de todos(as) os(as) envolvidos(as) e para a economia do setor.

Salienta-se, porém, que o modelo matemático anteriormente referido terá como principal objetivo auxiliar na modelação do fluxo de tráfego aéreo com o intuito de proporcionar a criação de um ou mais modelos de previsão da saturação desse mesmo fluxo e, como tal, não foi contemplada uma análise de sensibilidade dos modelos em causa.

O presente capítulo é constituído por seis subcapítulos, sendo que cada um deles será apresentado de forma resumida. O subcapítulo 1.1 contextualiza a importância deste setor para os(as) agentes e a relevância imposta por toda a sua envolvente para uma gestão apropriada do fluxo de tráfego aéreo. O subcapítulo 1.2 contextualiza a necessidade e a relevância da introdução de uma abordagem metodológica com o intuito de analisar cuidadosamente a gestão do fluxo de tráfego aéreo, nomeadamente, em situações críticas e/ou restritivas cujas circunstâncias poderão despoletar a ocorrência de situações indesejáveis. O subcapítulo 1.3 lista os(as) principais agentes cujas opiniões e atitudes afetam direta ou indiretamente o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo e cujo empenho é também ele decisivo para o sucesso do setor, impulsionando o estudo e/ou a proposta de novas metodologias e/ou tecnologias com o intuito de auxiliarem as suas tarefas complexas e com elevado teor de perigosidade para todos(as). O subcapítulo 1.4 identifica a problemática vivenciada na gestão do fluxo de tráfego aéreo nas zonas terminais das infraestruturas aeroportuárias, designadas em inglês por Terminal Maneuvering Area (TMA), evidenciando o seu carácter prejudicial e as consequências dos desequilíbrios registados entre a capacidade das TMAs e a procura por parte das aeronaves. O subcapítulo 1.5 apresenta as principais questões que envolvem a temática da gestão do fluxo de tráfego aéreo, designada em inglês por Air Traffic Flow Management (ATFM) e os objetivos que se pretendem ver cumpridos através da implementação de métodos e/ou metodologias adequados(as), de acordo com as circunstâncias e as restrições existentes em cada momento. Adicionalmente, será apresentada a ferramenta utilizada para a construção dos modelos estudados neste trabalho de investigação e, apesar de se encontrarem numa fase elementar, permitirão a realização de diversas análises, de acordo com as inúmeras variáveis que poderão ser selecionadas em cada caso, usufruindo das particularidades da Teoria das Cadeias de Markov. O subcapítulo 1.6 apresenta os capítulos que compõem este trabalho de investigação, referindo de forma resumida o seu conteúdo e realçando a sua importância para o cumprimento dos objetivos definidos anteriormente.

1.1 Considerações Gerais

O aumento significativo da quantidade de aeronaves que atravessam os céus de inúmeros continentes e oceanos de forma contínua despertou o interesse de vários(as) apaixonados(as) e estudiosos(as) pelo/do setor do transporte aéreo de modo a que fossem planeadas, criadas e/ou desenvolvidas abordagens adequadas para que a segurança de todas estas operações de tráfego aéreo não sofresse qualquer impacto negativo, garantindo também que as mesmas pudessem decorrer da forma mais rápida, eficaz, precisa e económica possível. De forma a sustentar a afirmação anterior, o seguinte conjunto de gráficos, desde o Gráfico 1.1 até ao Gráfico 1.8, tem como intenção quantificar o crescimento e o desenvolvimento deste setor através da agregação de dados recolhidos ao longo de um determinado período de tempo significativo.

Mediante o vasto conjunto de dados existentes em inúmeras fontes oficiais e não oficiais, para a apresentação neste subcapítulo foi realizada uma seleção cuidadosa para que a quantidade de informação não fosse demasiado díspar e/ou pouco criteriosa. Deste modo, os indicadores definidos foram selecionados pelo facto de apresentarem uma maior relevância para a temática em análise, encontrando-se seguidamente apresentados por ordem alfabética na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Principais Indicadores do Setor do Transporte Aéreo [1]

Identificação do Indicador	Designação do Indicador	Análise do Indicador
Aeronaves	Evolução Mundial da Quantidade de Aeronaves em Operação	É possível verificar a existência de uma tendência de crescimento da quantidade de aeronaves em operação nas companhias de transporte aéreo. Esta tendência representa uma maior taxa de utilização e de procura por parte dos(as) clientes no momento da escolha de um meio de transporte para a realização das suas deslocações e/ou transportes.
Descolagens	Evolução Mundial da Quantidade de Descolagens Registadas	Este indicador encontra-se intimamente ligado ao anterior, visto que quanto maior for a quantidade de aeronaves em operação, maior será a quantidade de descolagens registadas nas infraestruturas aeroportuárias.
Carga e Passageiros(as)	Evolução Mundial da Quantidade de Carga e de Passageiros(as) Transportados(as)	Este indicador encontra-se intimamente ligado aos dois indicadores anteriores, visto que ao verificar-se um aumento do número de aeronaves em operação, maior será a capacidade de transporte de carga e/ou passageiros(as) entre dois ou mais pontos do Mundo.
Ocorrências	Evolução Mundial da Quantidade de Ocorrências Registadas (Acidentes e Incidentes)	Ao contrário dos três indicadores anteriores, a evolução do número de ocorrências tem uma tendência contrária, visto que a criação e/ou o desenvolvimento de tecnologias e/ou procedimentos cada vez mais seguras(os) reflete-se num nível cada vez maior de segurança e de confiança depositada neste meio de transporte.
Receitas e Despesas	Evolução Mundial de Aspetos Económicos ou Financeiros que Descrevem a Rentabilidade do Setor	É importante não esquecer que este setor representa uma indústria e, por esse facto, deverá ser cada vez mais rentável para promover o seu crescimento, mantendo os(as) clientes conquistados(as) e/ou fidelizados(as) até ao momento e atraindo outros(as) que ajudarão na divulgação e/ou no desenvolvimento das entidades, empresas e pessoas envolvidas neste setor.

Seguidamente serão apresentados os gráficos dos indicadores enunciados na Tabela 1.1 de forma a ser visualmente mais fácil a sua interpretação e a determinação de padrões de evolução para os próximos anos. Para cada um dos gráficos será elaborada uma análise de forma a resumir a informação neles contida e, por outro lado, para definir as unidades expressas no eixo vertical, visto que o mesmo sofre alterações consoante o indicador em análise, sendo que o eixo horizontal representa sempre o período de tempo de análise de cada indicador.

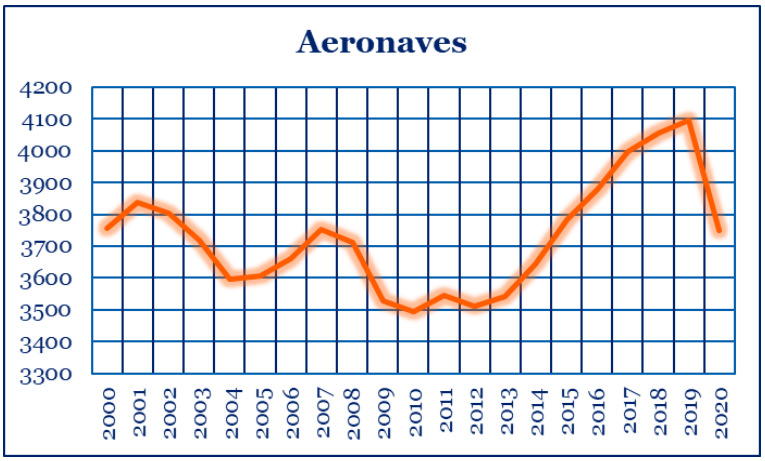

Gráfico 1.1 – Aeronaves [2]

No Gráfico 1.1, o eixo vertical representa a quantidade de aeronaves, pertencentes a companhias de transporte aéreo registadas na autoridade de aviação dos Estados Unidos da América (EUA), denominada por Administração Federal de Aviação (AFA), designada em inglês por Federal Aviation Administration (FAA), encontrando-se este dado expresso em unidades. Através da análise genérica destes últimos vinte anos é possível verificar o impacto da crise económica mundial que afetou, e continua a afetar, as inúmeras economias nacionais, impedindo a aquisição de novas aeronaves para o crescimento e/ou a renovação das frotas das companhias de transporte aéreo. Apesar deste facto bastante relevante, é possível verificar que a variação do número de aeronaves em operação é, de certa forma, cíclica, sendo possível afirmar que, no período de 2000 a 2010, a inversão da tendência ocorria a cada três anos.

Devido à crise económica registada aproximadamente no ano de 2008, o padrão anteriormente referido sofreu uma alteração substancial sendo que, para além das variações significativas do preço em vigor para a compra e a venda de petróleo, que propiciou a falência de inúmeras companhias de transporte aéreo, é imprescindível destacar a importância e a capacidade revitalizadora que o aparecimento e a disseminação das companhias de transporte aéreo de baixo custo provocou neste setor, sendo este modelo de negócio designado em inglês por Low-Cost Carriers (LCC). Desta forma, mantendo-se as condições externas existentes até ao início do ano de 2020, seria expectável que ocorresse uma inversão da tendência nos próximos anos devido à limitação dos recursos físicos, nomeadamente, no que se refere às infraestruturas aeroportuárias e, principalmente, à limitação do espaço aéreo.

Esta previsão sofreu uma enorme reviravolta devido à pandemia designada em inglês por Coronavirus Disease 2019 (COVID-19), cujo impacto foi devastador para inúmeros setores e cuja redução e/ou restrição de deslocação de passageiros(as) despoletou uma nova crise do setor, sendo que a verdadeira repercussão será alvo de avaliação nos próximos meses e, possivelmente, o seu reflexo será visível durante vários anos. Por outro lado, e mediante algumas ressalvas e particularidades, esta conclusão poderá ser facilmente extrapolada a nível mundial.

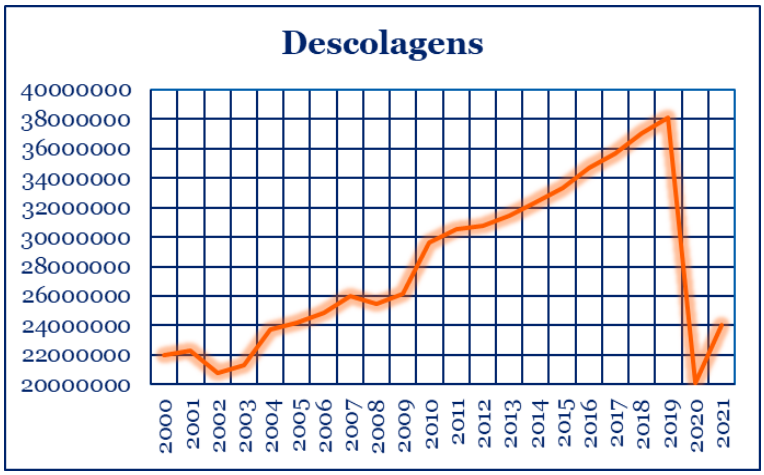

Gráfico 1.2 – Descolagens [3]

No Gráfico 1.2, o eixo vertical representa a quantidade de descolagens verificadas em todas as companhias de transporte aéreo registadas no Mundo, encontrando-se este dado expresso em unidades. Através da análise genérica destes últimos vinte e um anos é possível verificar a tendência, praticamente constante, de crescimento, com exceção da alteração verificada no ano de 2020 devido à COVID-19. Este dado reafirma o aumento do interesse dos(as) clientes e a escolha preferencial dos(as) mesmos(as) por este meio de transporte.

Mantendo-se as condições externas existentes neste momento, ainda que pouco favoráveis devido ao impacto da crise económica mundial e à COVID-19, mas relembrando o aumento crescente da importância do aparecimento das LCCs, é esperada uma tendência de crescimento gradual. Relativamente ao impacto da COVID-19 e principalmente às restrições impostas pelas autoridades nacionais, é expectável que durante a fase mais crítica desta pandemia o Gráfico 1.2 sofra uma inversão da sua tendência de crescimento, mas, à medida que a situação seja controlada, verificar-se-á uma recuperação do setor. Salienta-se, por outro lado, que esta tendência de crescimento só poderá ser verificada se os recursos existentes também sofrerem as alterações necessárias para acompanharem esta tendência e conseguirem dar resposta às necessidades que surgirão devido a este aumento sustentado.

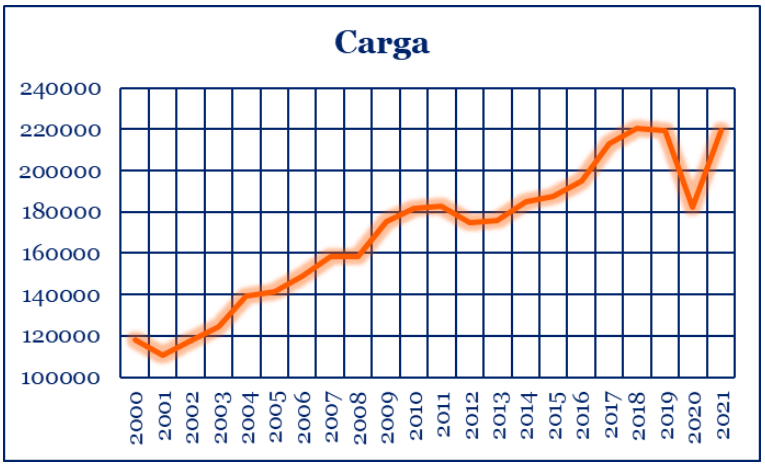

Gráfico 1.3 – Carga [4]

No Gráfico 1.3, o eixo vertical representa a quantidade de carga transportada a nível mundial, encontrando-se este dado expresso em milhões de toneladas por quilómetro. Através da análise genérica destes últimos vinte e um anos é possível verificar a tendência, praticamente constante, de crescimento, com exceção da alteração verificada no ano de 2020 devido à COVID-19. Este indicador relaciona-se diretamente com a informação expressa no Gráfico 1.2 e, como tal, a tendência de crescimento, tendo em conta as respetivas ressalvas vastamente detalhadas anteriormente, será semelhante nos próximos anos.

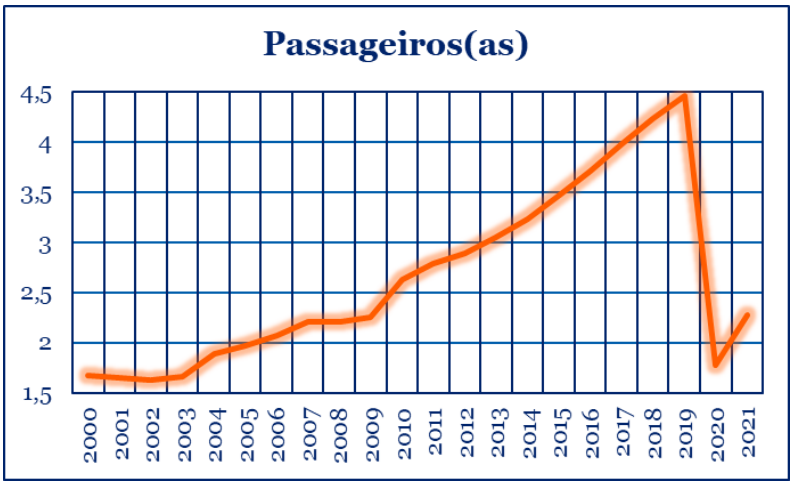

Gráfico 1.4 – Passageiros(as) [5]

No Gráfico 1.4, o eixo vertical representa a quantidade de passageiros(as) transportados(as) pelas companhias de transporte aéreo, encontrando-se este dado expresso em mil milhões, nomeadamente, biliões. Através da análise genérica destes últimos vinte e um anos é possível verificar a tendência, praticamente constante, de crescimento, com exceção da alteração verificada no ano de 2020 devido à COVID-19. Este indicador relaciona-se diretamente com a informação expressa no Gráfico 1.2 e, como tal, a tendência de crescimento, tendo em conta as respetivas ressalvas vastamente detalhadas anteriormente, será semelhante nos próximos anos.

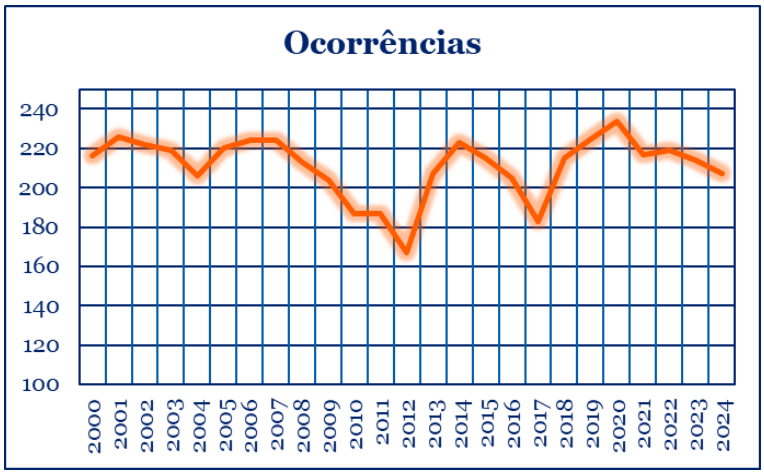

Gráfico 1.5 – Ocorrências [6]

No Gráfico 1.5, o eixo vertical representa a quantidade de ocorrências registadas a nível mundial, encontrando-se este dado expresso em unidades. Através da análise genérica destes últimos vinte e quatro anos é possível verificar uma tendência de decréscimo, sendo a mesma justificada pelas melhorias introduzidas neste setor, seja através de tecnologias e/ou procedimentos.

É importante referir que apesar do valor registado ser relativamente elevado, o mesmo deverá ter em conta que estas ocorrências são associadas em dois grupos, nomeadamente, os acidentes e os incidentes. Estas duas classificações distinguem-se entre si devido ao tipo de danos provocados, seja em termos de vidas perdidas e/ou de danos causados nas aeronaves. Logo, um elevado número de ocorrências, apesar de assustador, pode conter apenas uma pequena percentagem de acidentes, sendo este valor realmente reduzido tendo em conta o elevado número de descolagens que se registam diariamente por todo o Mundo.

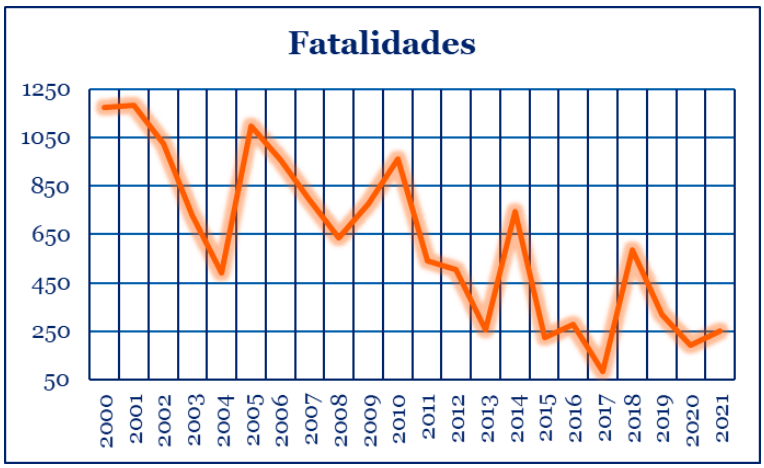

Gráfico 1.6 – Fatalidades [7]

No Gráfico 1.6, o eixo vertical representa a quantidade de fatalidades registadas a nível mundial, encontrando-se este dado expresso em unidades. Através da análise genérica destes últimos vinte e um anos é possível verificar uma tendência de decréscimo, sendo que a justificação mais recorrente se encontra interligada com a informação expressa no Gráfico 1.5.

É importante ressalvar que apesar do valor registado ser relativamente elevado, é necessário analisar os dados apresentados, relembrando não só o elevado número de aeronaves e a respetiva complexidade das suas operações, como também, os diversos eventos trágicos que ocorreram no período de tempo em análise, como por exemplo, os atentados terroristas registados a 11/09/2001.

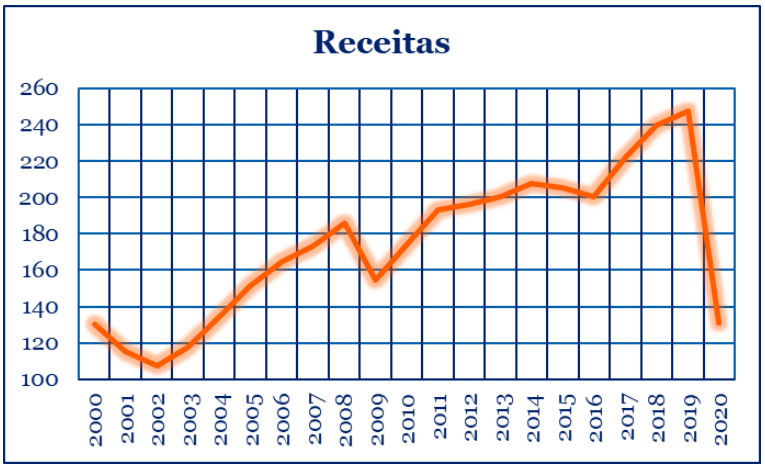

Gráfico 1.7 – Receitas [8]

No Gráfico 1.7, o eixo vertical representa o valor de receitas registado, referente única e exclusivamente a companhias de transporte aéreo registadas nos EUA, encontrando-se este dado expresso em biliões de dólares. Através da análise genérica destes últimos vinte anos é possível verificar a tendência, praticamente constante, de crescimento, com exceção da alteração verificada no ano de 2020 devido à COVID-19. Este indicador relaciona-se diretamente com a informação expressa no Gráfico 1.2 e, como tal, a tendência de crescimento será semelhante nos próximos anos, após a recuperação das consequências provocadas pela COVID-19.

É importante também ressalvar a importância do impacto positivo da criação e do vasto crescimento das LCCs para a renovação da utilização deste meio de transporte e as novas oportunidades criadas pelas mesmas. Apesar desta conclusão, é necessário analisar as fontes de receita existentes neste setor, visto que as mesmas não se revertem única e exclusivamente a partir dos bilhetes vendidos aos(às) passageiros(as), encontrando-se também representadas as receitas obtidas pelo transporte de carga e/ou correio, a parcela referente às taxas imputadas pelas infraestruturas aeroportuárias, assim como as receitas obtidas por outras operações imprescindíveis ao normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

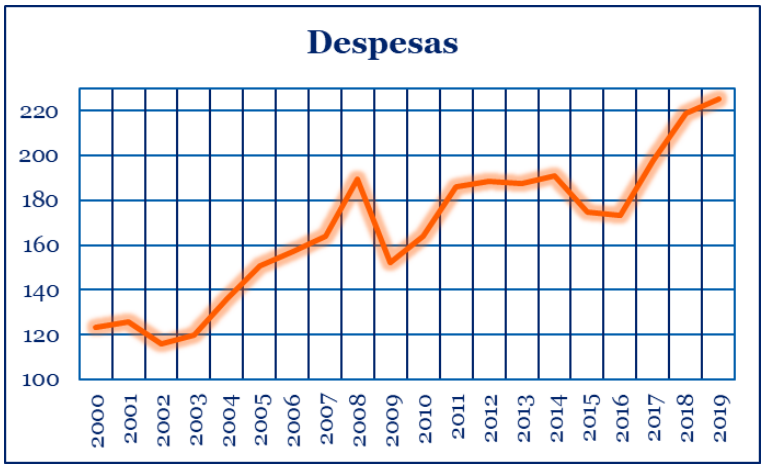

Gráfico 1.8 – Despesas [9]

No Gráfico 1.8, o eixo vertical representa o valor de despesas registadas, referente única e exclusivamente a companhias de transporte aéreo registadas nos EUA, encontrando-se este dado expresso em biliões de dólares. Através da análise genérica destes últimos dezanove anos é possível verificar uma tendência de decréscimo para os próximos anos, caso a variação identificada ocorra de forma cíclica, com uma frequência de aproximadamente sete anos.

Tal como foi referido para o indicador apresentado no Gráfico 1.7, as fontes de despesa são variadas e a diminuição de uma delas tem a capacidade de promover uma redução bastante significativa nas despesas totais. De entre as inúmeras fontes de despesa é possível listar as mais relevantes e significativas, como por exemplo, os vencimentos dos(as) colaboradores(as), os gastos decorrentes das ações de manutenção e de gestão, assim como o consumo crescente de combustível devido ao aumento do número de aeronaves em operação.

1.2 Contextualização da ATFM

Após a simples análise dos indicadores listados no subcapítulo 1.1, é possível afirmar que seria desejável que agregado ao aumento de procura ocorresse, de forma gradual e sustentável, um aumento da capacidade dos recursos existentes de forma a combater o desequilíbrio entre a procura e a oferta disponível que, infelizmente, origina o aumento de congestionamentos e de atrasos no espaço aéreo e, mais concretamente, nas zonas terminais das infraestruturas aeroportuárias, designadas doravante por TMAs. Apesar de esta parecer ser a solução ideal para a resolução da problemática enunciada, esta opção não é realista devido às inúmeras restrições existentes, nomeadamente, económicas e físicas.

Devido à necessidade expressa anteriormente surgiu o desenvolvimento, a análise e o estudo da temática que tem sido aprofundada ao longo das últimas décadas, a ATFM. A temática em causa representa uma disciplina que dedica todos os seus esforços e tempo para a melhoria contínua da gestão do fluxo de tráfego aéreo, visando a otimização das operações de tráfego aéreo através da alocação adequada dos recursos imprescindíveis para o sucesso e o crescimento do setor do transporte aéreo. O resultado proveniente deste esforço é traduzido mediante a criação de um conjunto de medidas que tentam, de formas inovadoras e distintas, auxiliar na tomada de decisão no que diz respeito a todas as tarefas que afetam, direta ou indiretamente, o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

As abordagens desenvolvidas até ao momento para a implementação adequada da ATFM diferem entre si em inúmeros aspetos, mas, de forma simplificada, é possível afirmar que as mesmas se baseiam em quatro pilares fundamentais, encontrando-se seguidamente apresentados por ordem alfabética na Tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Pilares Fundamentais da ATFM

Identificação do Pilar	Caracterização do Pilar
Custos	O tráfego aéreo é, acima de tudo, um negócio e, por isso, deverá ser rentável. Como tal, é desejável que as receitas sejam substancialmente superiores às despesas da manutenção da prestação deste serviço aos(às) clientes. A grande maioria das medidas criadas para uma adequada gestão do fluxo de tráfego aéreo têm como consequência a imputação de atrasos às aeronaves. Estes atrasos, apesar de necessários e, muitas vezes, reduzidos, acarretam um aumento dos custos, sendo desejável a sua otimização a um médio e/ou longo prazo.
Eficiência e Eficácia	Pelo mesmo motivo referido anteriormente, um negócio deverá dar provas da sua eficiência e eficácia para o seu crescimento, para a implementação de melhorias contínuas e para a manutenção ou o aumento destas características, sempre que seja possível. Estas características são percecionadas através de diferentes medidas, seja a nível empresarial, através do crescimento das receitas obtidas, podendo desta forma refletir um aumento de eficiência, como também a nível funcional, através do aumento da procura por parte dos(as) clientes, podendo desta forma refletir um aumento da eficácia, tendo em conta os benefícios promovidos por este meio de transporte.
Segurança (*Safety* e *Security*)	Independentemente dos interesses financeiros e/ou operacionais, descritos anteriormente e evidenciados nas políticas comerciais implementadas pelas empresas do setor, a prioridade do mesmo nunca deverá deixar de ser a garantia do aumento dos padrões de segurança, transmitindo a todos(as) a confiança necessária que impulsionará o seu crescimento. É importante imputar todos os recursos possíveis na análise cuidadosa das operações de tráfego aéreo e no desenvolvimento de novas tecnologias capazes de ajudarem na supervisão e/ou na prevenção de ocorrências potencialmente perigosas.
Proteção Ambiental	Não menos importante, e cada vez mais alvo de destaque na sociedade do século XXI, destaca-se o cuidado e a atenção pelas práticas executadas e o seu impacto no meio ambiente. É evidente a preocupação crescente demonstrada pelos(as) agentes e a procura por medidas que tentem proteger e salvaguardar a qualidade ambiental. Essas medidas passam por melhorias nas aeronaves e nas infraestruturas aeroportuárias que possam promover uma redução nos diversos tipos de poluição produzidos.

1.3 Principais Agentes

As opiniões, experiências de mercado e sugestões dos(as) agentes do setor do transporte aéreo têm sido levadas em consideração na implementação das inúmeras iniciativas criadas ao longo das últimas décadas, na tentativa de combaterem o desequilíbrio sentido, entre a procura e a oferta, nas infraestruturas aeroportuárias e no espaço aéreo, tal como já foi evidenciado no subcapítulo 1.1. Esta procura refere-se diretamente ao vasto alcance deste meio de transporte que tem a capacidade de ligar dois ou mais pontos do Mundo oferecendo inúmeras vantagens, como por exemplo, uma relação entre o custo e o tempo despendido, bastante interessante e atrativa quando comparada com outros meios de transporte. Por outro lado, a oferta refere-se, principalmente, à capacidade física que é, cada vez mais, limitada, nas infraestruturas aeroportuárias e no espaço aéreo. Tendo em conta esta limitação, a cooperação entre os(as) agentes é um fator chave e imprescindível para a flexibilidade e a utilização cuidadosa e consciente dos recursos disponibilizados. Por mais simples que possa parecer, de forma teórica, todo o processo referido anteriormente, é importante salientar que os(as) agentes desta problemática não são apenas as companhias de transporte aéreo e os(as) controladores(as) de tráfego aéreo, mas sim todos(as) os(as) agentes envolvidos(as), sendo este setor demasiado vasto, tornando a problemática em análise complexa e requerendo, consequentemente, um elevado grau de minuciosidade.

A listagem apresentada tem como principal objetivo demonstrar a complexidade citada anteriormente, encontrando-se enunciados(as) os(as) principais agentes da ATFM, salientando que a sequência em causa não representa a prioridade, nem tão pouco o impacto no normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, sendo os(as) mesmos(as) apresentados(as) de forma aleatória, nomeadamente, os(as) controladores(as) de tráfego aéreo, os(as) utilizadores(as) do espaço aéreo, os(as) responsáveis e/ou os(as) colaboradores(as) de companhias de transporte aéreo, os(as) operadores(as) de infraestruturas aeroportuárias, os(as) colaboradores(as) dos serviços de assistência às infraestruturas aeroportuárias, os(as) coordenadores(as) e os(as) colaboradores(as) dedicados(as) à gestão de alocação de *slots*, os reguladores e/ou as entidades/autoridades (civis ou militares), as autoridades e/ou as entidades de segurança, envolvendo a segurança do lado ar e do lado terra de qualquer infraestrutura aeroportuária, as entidades que controlam e/ou fornecem dados relativos às condições meteorológicas e quaisquer indústrias que tenham um impacto direto ou indireto no setor.

Devido à extensa variedade de pessoas e/ou entidades envolvidas, diariamente, no controlo e na gestão das operações de tráfego aéreo, a uniformização das práticas deverá ser, em cada momento, uma das principais prioridades, tendo como intuito garantir a consistência do planeamento das operações de tráfego aéreo e a sua correta concretização. A partir deste incentivo pretende-se encorajar a observação atenta e a participação dos(as) agentes de forma a promoverem a análise constante dos procedimentos, a identificação de lacunas e a proposta de medidas preventivas e/ou corretivas, de acordo com a situação existente.

1.4 Problemática da Gestão da Capacidade das TMAs

Tal como já foi referido no subcapítulo 1.2 existem demasiadas restrições que impedem o normal crescimento do setor do transporte aéreo, visto que os recursos existentes são cada vez mais insuficientes para o aumento da procura verificado. Apesar desta problemática ser praticamente transversal a todo o setor, é incontestável que a gestão da capacidade das TMAs é um dos processos mais complexos e, atualmente, o foco de uma problemática severa que tem despertado a preocupação dos(as) estudiosos(as) e dos(as) agentes deste setor. A complexidade deste processo é devida não só à quantidade de aeronaves em operação como também ao número de agentes envolvidos(as), promovendo inúmeras consequências que nem sempre são percecionadas de forma atempada, impedindo dessa forma a correta implementação de medidas que possam combater e/ou minimizar alguns desses fatores prejudiciais.

Observando o normal funcionamento da grande maioria das infraestruturas aeroportuárias, é possível reconhecer que a capacidade das TMAs nem sempre é suficiente para albergar a procura existente e, nesses momentos, é constatada uma das principais e mais grave consequência da limitação deste recurso, nomeadamente, o congestionamento. Este congestionamento, apesar de inevitável em inúmeros momentos, é uma das consequências mais comuns do desequilíbrio entre a procura e a oferta e, por esse motivo, torna-se bastante relevante a implementação de uma metodologia eficaz que permita prever a sua ocorrência e que, consequentemente, auxilie na tomada de decisão por parte dos(as) agentes.

Realça-se na análise da problemática em questão que para além da quantificação da capacidade de uma determinada TMA ser uma tarefa bastante complexa, dependendo de um vasto conjunto de variáveis intrínsecas a cada uma dessas TMAs e às respetivas restrições nacionais implementadas, a determinação do congestionamento também representa uma tarefa cujo grau de complexidade se encontra intimamente ligado a uma componente incógnita que, muitas vezes, dificulta a sua previsibilidade e, em situações drásticas, pode colocar em causa a segurança de todos(as).

1.5 Principais Objetivos

Apesar desta problemática ser um dos assuntos mais estudados na atualidade, a verdade é que existem algumas questões que nem sempre possuem uma resposta concisa e/ou que não reúnem o consenso de inúmeras(os) fontes e/ou autores(as).

A pesquisa e a análise efetuadas ao longo deste trabalho de investigação têm como intuito ir de encontro à resposta de algumas questões fundamentais que se encontram apresentadas de forma aleatória, pois todas elas são bastante relevantes, sendo que as duas primeiras representam os principais fatores complementares à análise desta problemática e as duas últimas representam as principais implicações da mesma, nomeadamente:

- Em que objetivos e princípios se baseia a criação e a implementação de medidas para a ATFM? Quais são as vantagens e/ou os benefícios da implementação das medidas para a ATFM?
- Quais são as responsabilidades individuais de cada agente para o sucesso das medidas da ATFM? Como se determina a capacidade das infraestruturas aeroportuárias e do espaço aéreo?

Como consequência da apresentação dos fatores e das implicações listados(as) anteriormente, é necessário definir de forma clara que o principal objetivo do desenvolvimento do presente trabalho de investigação é a otimização da gestão da capacidade das TMAs, focando a sua aplicação numérica numa simulação real do fluxo de tráfego aéreo verificado em um determinado período de tempo definido no Aeroporto Humberto Delgado, denominado doravante por Aeroporto de Lisboa. A simulação pré-definida será promovida através da modelação, com base em redes dinâmicas, que terá como intuito obter a estimativa preditiva do nível de ocupação da TMA em análise em um determinado momento futuro, possibilitando a otimização da utilização correta da capacidade existente.

O nível de complexidade da ATFM em cada momento e/ou situação depende diretamente do número de fatores, externos e/ou internos, denominados comummente por variáveis, que têm impacto no normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. Por outro lado, a complexidade da ATFM não está diretamente relacionada com a sua eficácia e, como tal, é possível alcançar os objetivos a que se propõe através da implementação de uma medida e/ou um sistema mais simples. Esta conclusão é facilmente compreendida ao relembrar que o fator chave para o sucesso destas medidas é uma adequada coordenação e cooperação entre os(as) agentes. Adicionalmente, é necessário realçar o carácter de inovação que o presente trabalho de investigação pretende representar visto que, apesar da metodologia selecionada se encontrar amplamente aplicada em inúmeros contextos, nunca foi efetivamente utilizada com o intuito de analisar a dinâmica do funcionamento do fluxo de tráfego aéreo em uma determinada TMA. Desta forma, a complexidade citada encontra-se intimamente ligada a um manifesto desafio cujos resultados serão benéficos para o setor.

Apesar da constante evolução das ferramentas que podem ser utilizadas pelos(as) agentes envolvidos(as) na gestão do fluxo de tráfego aéreo, é necessário ressalvar a importância da rápida identificação de lacunas existentes não só em um(a) determinado(a) método e/ou metodologia, como também na tomada de decisão de algum(a) agente.

Este sentido crítico desenvolvido e implementado por cada um(a) permite colmatar as limitações existentes e sugerir e/ou desenvolver soluções que se moldem de forma cada vez mais adequada à realidade do setor do transporte aéreo. Para além disso é importante ressalvar que existem diferenças substanciais entre as infraestruturas aeroportuárias e os setores aéreos, devido a características físicas e regulamentares, visto que existem inúmeras autoridades aeronáuticas nacionais, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo uma tarefa bastante complicada.

A apresentação das limitações das medidas que foram recolhidas ao longo do processo de revisão bibliográfica e que serão posteriormente apresentadas no Capítulo 3, permitem estabelecer metas a um curto e/ou médio prazo de forma a perceber se a resolução dessa limitação trará melhorias substanciais no carácter benéfico dessa medida ou se a mesma, implementada em simultâneo com outra, poderá dar origem a uma solução mais adequada, otimizando a gestão do fluxo de tráfego aéreo. Uma das principais limitações dos métodos e das metodologias investigados(as) diz respeito à importância das medidas preventivas quando comparadas com as medidas corretivas. Apesar da limitação de recursos, os(as) agentes não se deverão focar apenas em medidas táticas que tenham a capacidade de lidar com problemas a um curto prazo, sendo desejável o aperfeiçoamento de tecnologias que permitam obter, com um maior grau de fiabilidade, dados que auxiliem na definição de medidas estratégicas.

Tendo em conta a existência de uma elevada quantidade de variáveis que são, de certa forma, imprevisíveis e que podem colocar em causa as operações de tráfego aéreo, por melhor e mais eficaz que seja o planeamento de voo de uma determinada aeronave, este nunca deverá ser demasiado restritivo e deverá ter a capacidade de se moldar e de sofrer alterações consoante as informações compartilhadas entre os(as) agentes. Desta forma é desejável e instigada a procura por um equilíbrio entre o carácter tático e o carácter estratégico da gestão do fluxo de tráfego aéreo.

A reunião e análise dos dados recolhidos reforçam a importância e a necessidade da criação de um modelo que tenha em consideração grande parte das particularidades das operações de tráfego aéreo e que consiga ir de encontro aos objetivos defendidos pelos(as) agentes. Esse modelo deverá ser simultaneamente específico, para lidar com situações imprevisíveis que têm um impacto substancialmente negativo nas operações de tráfego aéreo, assim como geral, tornando o espaço aéreo cada vez mais "único" e uniformizado, facilitando o envolvimento crescente de agentes e a gestão efetuada pelos(as) mesmos(as).

Por outro lado, e tal como foi referido anteriormente, existem inúmeras particularidades nas infraestruturas aeroportuárias e, como tal, o caso selecionado para a aplicação deste modelo é o Aeroporto de Lisboa. Com dados reais relativos a esta infraestrutura aeroportuária é possível criar uma ou mais redes dinâmicas que permitam efetuar uma análise pormenorizada do funcionamento do fluxo de tráfego aéreo em um dos principais *hubs* do espaço aéreo europeu, ponto fulcral e estratégico de ligação com todos os continentes.

De forma simplificada, com recurso a esta metodologia será possível prever o futuro conhecendo o passado e o presente da gestão do fluxo de tráfego aéreo nesta TMA.

É importante distinguir de forma clara dois conceitos que, por vezes, na literatura disponibilizada, são facilmente confundidos entre si, nomeadamente, os objetivos e os princípios da ATFM, encontrando-se seguidamente apresentados na Tabela 1.3 e na Tabela 1.4, respetivamente.

Tabela 1.3 – Objetivos da ATFM [10, 11, 12]

Identificação dos Objetivos	
Gerir as Operações	Gerir de forma atempada as operações de tráfego aéreo, assim como as incertezas e/ou restrições, através da comunicação adequada entre os(as) agentes para minimizar os impactos negativos de interrupções e/ou alterações das condições existentes.
Otimizar o Fluxo de Tráfego Aéreo	Promover a otimização constante do fluxo de tráfego aéreo em qualquer fase de voo, tentando dessa forma atingir um equilíbrio entre a procura e a oferta.
Assegurar a Segurança	Reforçar a segurança do normal funcionamento das operações de tráfego aéreo, garantindo uma distribuição adequada do fluxo de tráfego aéreo e evitando as situações de congestionamento e/ou conflito.
Controlar o Fluxo de Tráfego Aéreo	Tentar assegurar qualquer tipo de operação de tráfego aéreo, priorizando, sempre que necessário, mas mantendo o tratamento equitativo entre as aeronaves que se encontrem em uma determinada TMA.
Conhecer as Limitações	Ter sempre em consideração a limitação de recursos existentes, assim como a importância dos pilares fundamentais em que se baseiam as diferentes abordagens.

Tabela 1.4 – Princípios da ATFM [10, 11, 12]

Identificação dos Princípios	
Impulsionar Melhorias	Apoiar a criação e a implementação de novas(os) tecnologias e/ou procedimentos que melhorem a capacidade deste sistema de gestão e a sua eficiência.
Promover a Comunicação	Incentivar e facilitar os meios de colaboração entre os(as) agentes para tornar a partilha de informações fidedigna, relevante, eficaz, rápida e transparente.
Valorizar a Otimização	Maximizar os benefícios da melhoria do funcionamento das operações de tráfego aéreo, tendo em vista as metas individuais de cada agente.
Prever as Ocorrências	Melhorar a capacidade de previsibilidade do sistema de ATFM de forma a ajudar, preventivamente, na tomada de decisão por parte de cada agente.
Utilizar os Recursos Racionalmente	Utilizar de forma otimizada a capacidade dos recursos existentes, principalmente no que diz respeito às limitações pré-definidas nas TMAs, tendo sempre em vista a manutenção da segurança.

O cumprimento dos conceitos expressos anteriormente tem a capacidade de promover duas categorias de benefícios, nomeadamente, os operacionais (Tabela 1.5) e os sociais (Tabela 1.6), salientando que os primeiros são os mais ansiados, a um curto prazo, pelos(as) agentes.

Tabela 1.5 – Benefícios Operacionais da ATFM [10, 11, 12]

Identificação dos Benefícios Operacionais	
Perceção dos Fatores Humanos	Aumento da consciência da importância de cada agente para o sucesso de uma gestão adequada do fluxo de tráfego aéreo.
Melhoria de Resultados	Aumento da eficiência operacional, da capacidade de previsão de situações futuras e, acima de tudo, da segurança operacional de todo o sistema de gestão.
Gestão de Recursos	Gestão adequada da limitação dos recursos existentes, procurando atingir o equilíbrio ideal entre a procura e a oferta disponível.
Gestão de Ocorrências	Gestão eficiente de imprevistos e incertezas decorrentes da complexidade do tráfego aéreo, controlando as consequências e mitigando o impacto junto dos(as) clientes.
Diminuição de Consumo	Redução do consumo de combustíveis, diminuindo por exemplo, a espera das aeronaves em rota junto das TMAs. Este benefício encontra-se intimamente ligado à redução de custos operacionais do ponto de vista dos custos associados à normal operação de cada aeronave.

Tabela 1.6 – Benefícios Sociais da ATFM [10, 11, 12]

Identificação dos Benefícios Sociais	
Transmissão de Confiança	Aumento da confiança neste meio de transporte devido à demonstração de preocupação constante na manutenção dos padrões de segurança.
Mobilidade	Aumento da mobilidade de bens e/ou pessoas, assim como a facilidade de acesso a este meio de transporte devido ao aumento de concorrentes e à redução de tarifas.
Crescimento Económico	Aumento do desenvolvimento económico dos(as) agentes devido à promoção da prestação eficiente de serviços e à obtenção de rentabilidade dos mesmos.
Controlo de Ocorrências	Diminuição do impacto de imprevistos que afetam o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, diminuindo as situações de congestionamento e/ou conflito.
Qualidade	Melhoria da qualidade das operações de tráfego aéreo e de todos os serviços interligados, promovendo uma redução das emissões de gases devido à queima de combustíveis, tendo um impacto menor no aumento do efeito estufa.

Apesar do carácter benéfico das diferentes medidas para a ATFM, que podem e devem ser implementadas, é importante ressalvar que a sua aplicação deverá ser realizada de forma consciente, tendo em conta a antecedência necessária para que as vantagens da sua implementação sejam sentidas durante o período de tempo estritamente necessário para a resolução do problema presenciado. Para além disso, a quantidade e o tipo de medidas implementadas de forma simultânea também deverão ser estritamente as necessárias para que a complexidade não aumente de forma exponencial, acabando por ter o efeito contrário e prejudicando o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. Por exemplo, não existe qualquer necessidade de aplicar um atraso a aeronaves que fazem apenas voos regionais dentro de um determinado país A se existirem condições meteorológicas adversas no país B vizinho, sendo que essas alterações não terão qualquer impacto negativo nas aeronaves citadas inicialmente. Para além destes cuidados é importante a escolha da medida o menos restritiva possível para cada uma das situações, de forma a promover o menor impacto negativo possível para as operações de tráfego aéreo, tanto ao nível de atrasos como de custos.

Independentemente do conhecimento dos(as) agentes relativamente à capacidade limitada dos recursos existentes, é importante determinar, em cada momento, a capacidade existente tanto nas infraestruturas aeroportuárias quanto no espaço aéreo para que seja alcançado um equilíbrio adequado, justo e realista entre a procura e a oferta.

Tendo em conta a complexidade da problemática apresentada, os objetivos pré-estipulados e, por vezes, a imprevisibilidade da ATFM, a Teoria das Cadeias de Markov foi a ferramenta selecionada com o intuito de, em primeiro lugar, permitir a análise de diversas redes dinâmicas que serão construídas e, em segundo lugar, permitir a obtenção de respostas e sugestões que propiciem o desenvolvimento das seguintes metas fulcrais, encontrando-se seguidamente apresentadas por ordem alfabética, nomeadamente [13]:

- Assegurar a equidade e o equilíbrio entre a procura e a oferta, independentemente da procura se sobrepor, em inúmeros momentos, à oferta existente;
- Criar, desenvolver e/ou adaptar metodologias e/ou ferramentas que permitam uma rápida e eficaz adaptação de medidas ao contexto atual e às consequentes alterações percecionadas neste setor;
- Maximizar e potencializar os interesses dos(as) agentes(as), tanto em termos operacionais quanto económicos, sem nunca descurar a questão da segurança;
- Reduzir e gerir, de acordo com as variáveis e as restrições identificadas, o grau de incerteza das operações de tráfego aéreo.

A metodologia utilizada para responder e desenvolver as metas listadas anteriormente baseia-se nas vantagens promovidas pela aplicação da Teoria das Cadeias de Markov que permitirá a construção de um modelo simplificado de uma ou mais redes dinâmicas que descreverão o comportamento do fluxo de tráfego aéreo, prevendo as respetivas alterações e antevendo possíveis medidas que poderão lidar, de forma mais adequada, com os impactos promovidos pelo aumento da procura. Salienta-se que esta abordagem nunca foi implementada no contexto da gestão do fluxo de tráfego aéreo de qualquer TMA, revelando o seu carácter de originalidade, independentemente dos resultados que dela possam ser produzidos e, em particular, o potencial da mesma para posterior aplicação em outros contextos dentro do setor do transporte aéreo.

Através deste modelo será possível otimizar a gestão do fluxo de tráfego aéreo aliada à gestão dos recursos existentes em cada momento e as circunstâncias encontradas em cada TMA, utilizando para isso dados do histórico das operações de tráfego aéreo e as especificidades encontradas no setor. O modelo em causa será constituído por cinco estados interligados entre si, sendo que cada um deles representa uma ocupação percentual da TMA em análise e, através desse modelo, será possível estudar o padrão de transições que ocorre em uma determinada infraestrutura aeroportuária, de acordo com o período de tempo em que se verifica e, dessa forma, permitirá antever o seu comportamento a um médio e/ou longo prazo.

A simplicidade da construção de uma rede dinâmica em contraponto com a complexidade de qualquer TMA representa um enorme desafio cuja análise permitirá, em termos matemáticos, determinar a probabilidade de utilização do espaço aéreo em análise, identificando, claramente, os estados cuja criticidade deverá ser acompanhada com uma maior periodicidade e, dessa forma, requerendo uma gestão mais adequada e precisa do fluxo de tráfego aéreo em cada momento.

O principal obstáculo apresentado pela aplicação desta ferramenta diz respeito à complexidade da quantificação da capacidade de uma determinada infraestrutura aeroportuária, assim como a sua modelação adequada, e respetiva TMA, devido à diversidade de variáveis que podem influenciar este "valor", quer seja na sua predefinição inicial e/ou na variação ao longo da imposição de diferentes restrições. Desta forma, é possível afirmar que este parâmetro será o foco de análise deste trabalho de investigação, visto que se pretende determinar um padrão de comportamento da mesma, sendo o mesmo fulcral para que se identifiquem as fases críticas que requerem a implementação de métodos e/ou metodologias adequados(as) e eficazes para cada situação.

Tendo em conta a complexidade descrita anteriormente, assim como a complexidade em que cada infraestrutura aeroportuária se encontra envolta, salienta-se que, no caso do presente trabalho de investigação, serão simuladas diferentes aplicações numéricas com o intuito de, em primeiro lugar, ilustrar a relevância e a adaptabilidade dos conceitos da Teoria das Cadeias de Markov e, em segundo lugar, analisar a realidade vivenciada em uma TMA em particular, nomeadamente, a TMA de Lisboa, sendo esta um mero exemplo ilustrativo que poderá ser o ponto de partida para a aplicabilidade desta metodologia às demais TMAs.

1.6 Estrutura da Tese

O presente trabalho de investigação foi redigido com base numa estrutura composta por seis capítulos que pretendem, de forma concreta e interligada, abordar diferentes conceitos fundamentais para a temática em análise, assim como a respetiva análise crítica e fundamentada dos resultados obtidos através das diferentes modelações simuladas.

O Capítulo 1 pretende, de forma sucinta e concreta, contextualizar e realçar a importância da temática selecionada e que será posteriormente analisada ao longo do presente trabalho de investigação.

Em termos teóricos, o Capítulo 2 pretende detalhar a relevância da quantificação e da variabilidade da capacidade de uma infraestrutura aeroportuária e do espaço aéreo circundante. O Capítulo 3 pretende definir os principais conceitos imprescindíveis para a compreensão da relevância e das especificidades da temática assim como listar e exemplificar a utilidade de inúmeras medidas cuja implementação auxilia na gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Em termos práticos, o Capítulo 4 pretende apresentar, de forma teórica e prática, a utilidade da Teoria das Cadeias de Markov para a aplicabilidade na gestão do fluxo de tráfego aéreo. O Capítulo 5 pretende, de uma forma dinâmica e prática, demonstrar a praticidade da modelação através da Teoria das Cadeias de Markov para a criação de diferentes redes dinâmicas com base em dados reais.

O Capítulo 6 pretende, de forma concisa, apresentar as conclusões obtidas através do estudo efetuado, realçando a metodologia pré-definida e recomendando sugestões de melhoria para trabalhos futuros.

Folha em branco

Capítulo 2

Estrutura e Capacidade de uma TMA

Tendo em conta os objetivos a que se propõe o presente trabalho de investigação, para uma correta análise e previsão do comportamento do nível de ocupação da TMA de Lisboa é necessário, em primeiro lugar, conhecer as suas especificidades e comprovar a complexidade da quantificação da capacidade de qualquer TMA. Por mais simples que possa parecer, a quantificação da capacidade de uma determinada infraestrutura aeroportuária e da respetiva TMA, não depende exclusivamente da existência de "espaço" para albergar mais uma aeronave do que aquelas que possui em um determinado momento. Na realidade, apesar da frase anterior representar uma descrição bastante simplificada do conceito de capacidade, a tarefa em causa é mais complexa, pois este conceito encontra-se dependente de inúmeras variáveis, sendo que a variação de muitas delas ocorre de forma completamente aleatória.

É importante ressalvar que apesar deste trabalho de investigação conter a apresentação e o desenvolvimento de algumas medidas de gestão do fluxo de tráfego aéreo, o denominador comum a todas elas é o Ser Humano e, por esse motivo, deverá existir um equilíbrio, o mais perfeito possível, entre a tomada de decisão automática e a manual. A importância da participação e da colaboração dos(as) agentes é justificada pela necessidade da partilha de dados e informações, de forma a ser possível a construção de um sistema ATFM que consiga ir de encontro à realidade existente. A comunicação é o meio de partilha mais adequado e a sua inexistência e/ou ineficácia colocará em risco a implementação das medidas. Para além da partilha de informações é importante realçar a necessidade da partilha da consciência situacional, um termo vastamente analisado no ramo da Psicologia, que representa a perceção dos(as) agentes relativamente ao ambiente de trabalho em que se encontram inseridos(as).

O presente capítulo é constituído por sete subcapítulos, sendo que cada um deles será apresentado de forma resumida. O subcapítulo 2.1 apresenta uma definição do conceito de capacidade, sendo uma quantificação fulcral para a temática em análise. O subcapítulo 2.2 contextualiza algumas particularidades da TMA de Lisboa. O subcapítulo 2.3 condensa os principais impactos prejudiciais da existência de congestionamento nas TMAs. O subcapítulo 2.4 enuncia as principais variáveis que afetam a capacidade das TMAs. O subcapítulo 2.5 apresenta as formas de classificação da capacidade, demonstrando a sua complexidade e fomentando a necessidade de compreensão dos(as) agentes. O subcapítulo 2.6 contextualiza a solução que se pretende atingir na conclusão deste trabalho de investigação, demonstrando a sua relevância. O subcapítulo 2.7 condensa os principais pontos analisados durante o Capítulo 2 e sugere medidas benéficas consequentes da análise crítica efetuada durante a sua redação.

2.1 Definição de Capacidade

Através da observação do comportamento do fluxo de tráfego aéreo e, principalmente, da sua evolução ao longo das últimas décadas, é possível associá-lo a um conceito físico vastamente conhecido por todos(as) e que tem como origem um dos ramos da Física, nomeadamente, a entropia. Esta entropia representa, de forma metafórica, um limite bastante preocupante e cada vez mais percetível no dia a dia do setor do transporte aéreo, isto é, o congestionamento do espaço aéreo e das infraestruturas aeroportuárias [14]. Apesar deste conceito ser associado, de forma genérica, ao grau de desordem percecionado em um determinado sistema, ao classificar o fluxo de tráfego aéreo como sendo também ele um sistema, é importante salientar que o mesmo representa uma entropia organizada devido às inúmeras "redes de segurança" que têm vindo a ser delineadas e implementadas em torno deste setor. Essa entropia relaciona-se não só com a elevada quantidade de aeronaves que se encontram, em simultâneo, em uma determinada localização geográfica, seja ela o espaço aéreo ou uma infraestrutura aeroportuária, como também, com a incerteza do comportamento do fluxo de tráfego aéreo que é originada pela aleatoriedade de algumas variáveis que ditam este comportamento, sendo por esse motivo, bastante relevante e interessante conhecer cada uma delas de forma atempada [14].

Um dos principais problemas que origina os elevados níveis de congestionamento é o facto de a grande maioria das infraestruturas aeroportuárias e as respetivas TMAs também se encontrarem congestionadas, sendo uma das principais consequências deste congestionamento maciço o aumento nos atrasos das operações pré-delineadas das aeronaves. Para combater este e outros efeitos do aumento do congestionamento é necessário analisar, definir e acompanhar a implementação de medidas que tentem minimizar e/ou cessar as situações mais urgentes e que, acima de tudo, possam colocar em risco a segurança de todos(as).

Outro conceito científico, mas, desta vez, que tem como origem um dos ramos da Química e que pode ser observado metaforicamente no comportamento do fluxo de tráfego aéreo é a saturação. Apesar do conceito em causa possuir diferentes significados, consoante o contexto em que é utilizado, de forma simplificada o mesmo representa a capacidade máxima de uma determinada solução de uma substância, isto é, o ponto a partir do qual a mesma se torna incapaz de dissolver mais substância, por mais reduzida que seja a quantidade adicionada.

Neste caso, a solução em análise é representada pela TMA e esta saturação representa o seu grau de ocupação limite, o que significa que se trata de um valor numérico e que, por outro lado, representa o número total de aeronaves que pode ser albergada, de forma segura, em cada TMA, de acordo com as suas características e em um determinado período de tempo [14]. Seria desejável aumentar, fisicamente, o espaço aéreo existente, de forma a albergar toda a procura existente, mas esta questão é totalmente utópica e, tendo em conta esta impossibilidade, diversos estudos têm sido desenvolvidos ao longo das últimas décadas na tentativa de solucionar os desafios que têm surgido devido à vertiginosa expansão deste setor.

Por este motivo, e por tantos outros que ficaram por citar e que outros(as) autores(as) referiram nos seus trabalhos, pretende-se com a elaboração deste trabalho de investigação identificar e propor uma forma de "acréscimo" da capacidade de gestão do fluxo de tráfego aéreo, tendo em conta não só um vasto leque de metodologias como também de equipamentos e/ou ferramentas que já se encontram ao dispor dos(as) agentes. A utilização eficiente destes recursos é fundamental, visto que a capacidade de trabalho suportada pelo Ser Humano é limitada e os(as) agentes envolvidos(as) nos processos relativos à gestão do fluxo de tráfego aéreo estão cada vez mais sobrecarregados(as) e, como tal, poderão colocar em causa a segurança operacional. Caso esta gestão dependa única e exclusivamente do Ser Humano, será necessário aumentar os recursos humanos envolvidos e, apesar do setor crescer continuamente, o investimento económico promoverá um retrocesso nas expectativas lucrativas das empresas envolvidas.

Por outro lado, e tendo em conta as circunstâncias e as consequências promovidas pela COVID-19, será fundamental que o setor consiga, por si só, recuperar da diminuição brusca que sofreu de forma inesperada sendo que, em muitas situações, o desempenho manual e o desempenho humano acabarão por ser substituídos pelo desempenho automático, com o intuito de diminuir, no limite de forma parcial, os custos associados a um vasto leque de tarefas.

De forma resumida, pretende-se ir de encontro à redução e à gestão do grau de incerteza das operações de tráfego aéreo, maximizando os interesses de todos(as), assegurando o equilíbrio entre a procura e a oferta e desenvolvendo e/ou adaptando os recursos que permitam uma rápida e eficaz adaptação de medidas ao contexto atual e às consequentes alterações percecionadas no setor. A metodologia utilizada para responder às questões listadas anteriormente baseia-se nas vantagens promovidas pela aplicação da Teoria das Cadeias de Markov que permitirá a construção de um modelo simplificado de uma ou mais redes dinâmicas que terão como intuito descrever o comportamento do fluxo de tráfego aéreo, prevendo as respetivas alterações e antevendo possíveis medidas que poderão lidar, de forma mais adequada, com os impactos promovidos pelo aumento da procura. Através deste modelo será possível otimizar a gestão do fluxo de tráfego aéreo aliada à gestão dos recursos existentes em cada momento e às circunstâncias encontradas em cada TMA, utilizando para isso os dados do histórico das operações de tráfego aéreo e as especificidades típicas do contexto nacional português.

Salienta-se por isso, uma vez mais, que independentemente das medidas criadas, desenvolvidas e/ou implementadas pelos(as) agentes, a capacidade não sofrerá o aumento desejado, tratando-se de um recurso cuja limitação não dependerá, obrigatória e diretamente, das ações tomadas pelo Ser Humano. Desta forma, assume-se ao longo do desenvolvimento deste trabalho de investigação que a capacidade é um valor numérico dinâmico, tendo em conta as operações de tráfego aéreo realizadas, mas cujo limite existe e, quando atingido, promove um impacto prejudicial para todos(as).

2.2 Contextualização da TMA de Lisboa

Devido à vasta evolução do setor do transporte aéreo, e após a realização de inúmeros estudos, verificou-se que a capacidade da TMA de Lisboa e, consequentemente do Aeroporto de Lisboa, tem sido alvo de elevada preocupação tendo em conta que a mesma se encontra próxima do seu limite de saturação, tanto no que diz respeito aos constrangimentos de capacidade do espaço aéreo quanto da área terminal existente na atualidade. Por este motivo, e com o intuito de contextualizar as principais especificidades que condicionam as funções exercidas pela TMA, o presente subcapítulo condensará uma breve análise dos principais aspetos da mesma.

2.2.1 Espaço Aéreo

De forma genérica, e tendo em conta a classificação do espaço aéreo utilizada no contexto europeu, o mesmo é definido através de sete classes, identificadas desde a letra A até à G, sendo que nem todas são encontradas de forma homogénea ao longo da sua extensão. Por esse motivo, a Tabela 2.1 contempla a apresentação das classes que se aplicam ao contexto português e, mais especificamente, ao espaço aéreo afeto à TMA de Lisboa.

Tabela 2.1 – Classificação do Espaço Aéreo [15, 16, 17]

Classe do Espaço Aéreo	Especificidades de Cada Classe	Aplicação à TMA de Lisboa
A	Na Classe A só podem ser efetuados voos que são realizados através das regras de voo por instrumentos, designados em inglês por Instrument Flight Rules (IFR). Neste sentido, todas as aeronaves poderão usufruir de serviços de controlo de tráfego aéreo, designados em inglês por Air Traffic Control (ATC), sendo fundamental para garantir a separação segura entre as mesmas. Por outro lado, é obrigatória a manutenção da realização de comunicações de voz, de forma contínua, para todas as aeronaves entre a tripulação e os(as) agentes envolvidos(as). Consequentemente, todas as aeronaves necessitam de autorização do ATC para realizarem as suas operações. Esta classe do espaço aéreo encontra-se localizada entre os 18000 pés, designado em inglês por feet (ft), acima do nível médio do mar até ao nível de voo, designado em inglês por Flight Level (FL), 600.	---
C	Na Classe C podem ser efetuados tanto os voos IFR quanto os voos que são realizados através das regras de voo visual, designados em inglês por Visual Flight Rules (VFR). Neste sentido, todas as aeronaves poderão usufruir de serviços ATC, sendo fundamental para garantir a separação segura entre as mesmas. Por outro lado, é obrigatória a manutenção da realização de comunicações de voz, de forma contínua, para todas as aeronaves entre a tripulação e os(as) agentes envolvidos(as). Adicionalmente, são impostos limites de velocidade para os voos VFR tendo em conta a altitude em que se encontram. Consequentemente, todas as aeronaves necessitam de autorização do ATC para realizarem as suas operações. Esta classe do espaço aéreo encontra-se localizada entre a superfície da infraestrutura aeroportuária e os 4000 ft. Por norma representa uma área circular pelo facto de se encontrar em zonas circundantes das infraestruturas aeroportuárias, cujo raio aumenta com a altitude.	**X**

Classe do Espaço Aéreo	Especificidades de Cada Classe	Aplicação à TMA de Lisboa
D	Na Classe D podem ser efetuados os voos IFR e VFR. Neste sentido, todas as aeronaves poderão usufruir de serviços ATC, sendo fundamental para garantir a separação segura entre as mesmas. Por outro lado, é obrigatória a manutenção da realização de comunicações de voz, de forma contínua, para todas as aeronaves entre a tripulação e os(as) agentes envolvidos(as). Adicionalmente, são impostos limites de velocidade para todas as aeronaves tendo em conta a altitude em que se encontram. Consequentemente, todas as aeronaves necessitam de autorização do ATC para realizarem as suas operações. Esta classe do espaço aéreo encontra-se localizada entre a superfície da infraestrutura aeroportuária e os 2500 ft.	**X**
G	Na Classe G podem ser efetuados os voos IFR e VFR. Neste sentido, todas as aeronaves poderão usufruir de serviços de informação de voo, designados em inglês por Aeronautical Information Service (AIS). Por outro lado, é obrigatória a manutenção da realização de comunicações de voz, de forma contínua, para todos os voos IFR entre a tripulação e os(as) agentes envolvidos(as). Adicionalmente, são impostos limites de velocidade para todas as aeronaves tendo em conta a altitude em que se encontram. Consequentemente, não existe a necessidade de autorização do ATC para que as aeronaves possam realizar as suas operações, o que significa que se trata de uma classe de espaço aéreo não controlada. Esta classe do espaço aéreo encontra-se localizada entre a superfície da infraestrutura aeroportuária e a base do espaço aéreo de Classe E.	**X**

2.2.2 Regiões de Informação de Voo

Em qualquer contexto do espaço aéreo, uma Região de Informação de Voo (RIV), designada em inglês por Flight Information Region (FIR), representa um espaço aéreo cujas dimensões estão claramente definidas de forma a garantir que nesse setor são prestados os serviços AIS, fundamentais para a garantia do normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, principalmente no que diz respeito à partilha rápida e eficiente de dados relevantes para a realização das operações de tráfego aéreo [15, 16].

Apesar do espaço aéreo português ser composto por duas RIVs, a TMA de Lisboa encontra-se localizada nos limites da RIV de Lisboa, cuja delimitação se encontra apresentada na Figura 2.1.

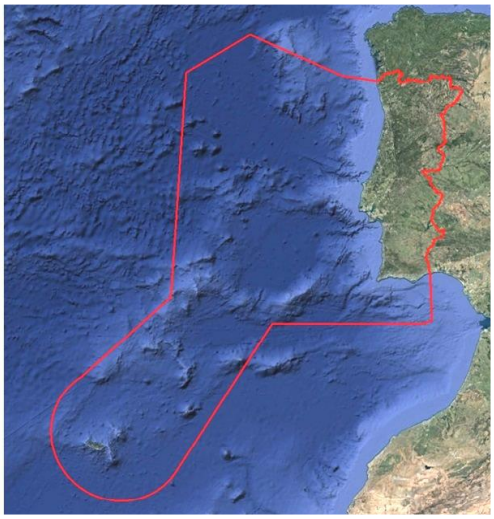

Figura 2.1 – RIV de Lisboa [15]

2.2.3 TMA de Lisboa

Apesar da RIV de Lisboa ser constituída por quatro TMAs, o foco do presente trabalho de investigação é a TMA de Lisboa, sendo por isso o alvo de análise e estudo aprofundada(o) no presente subcapítulo. À semelhança da apresentação da RIV de Lisboa, é possível apresentar a TMA de Lisboa, cuja delimitação se encontra apresentada na Figura 2.2.

Figura 2.2 – TMA de Lisboa [15]

Tendo em conta a sua dimensão, e consequentemente a complexidade das operações de tráfego aéreo nesta região, é importante salientar que esta área é constituída por inúmeras áreas de controlo de tráfego aéreo, nomeadamente, em Lisboa e em Cascais [15]. Adicionalmente, esta área também contém vários espaços aéreos designados por restritos, perigosos e proibidos, sendo variáveis que afetam a gestão do fluxo de tráfego aéreo, assim como áreas que possuem restrições de segurança devido às operações militares, nomeadamente, na região de Alcochete, do Montijo, de Sintra e de Monte Real [15].

Devido à especificidade das funções executadas pelos(as) agentes dentro da TMA de Lisboa, a mesma encontra-se também subdividida em zonas de controlo de tráfego aéreo, denominadas em inglês por Control Zone (CTR) que têm como principal objetivo auxiliarem e garantirem na/a segurança das aeronaves durante as aterragens e as descolagens [15]. A CTR de Lisboa dedica-se ao controlo do Aeroporto de Lisboa, cujo espaço aéreo se encontra classificado de acordo com a Classe C e cuja delimitação se encontra apresentada na Figura 2.3.

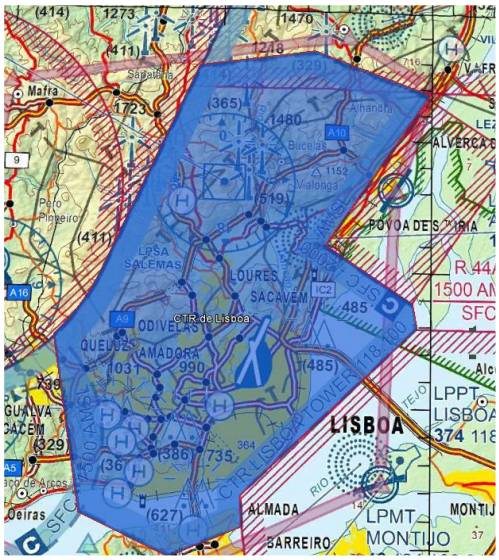

Figura 2.3 – CTR de Lisboa [15]

Para além do conhecimento das dimensões que delimitam a TMA de Lisboa e os tipos de serviços prestados em cada fase de voo das aeronaves, é importante reconhecer e estar alerta para a existência de áreas proibidas, restritas e perigosas (Figura 2.4 e Figura 2.5) que aumentam substancialmente a complexidade e a heterogeneidade das informações e dos alertas que deverão ser partilhadas(os) entre os(as) agentes.

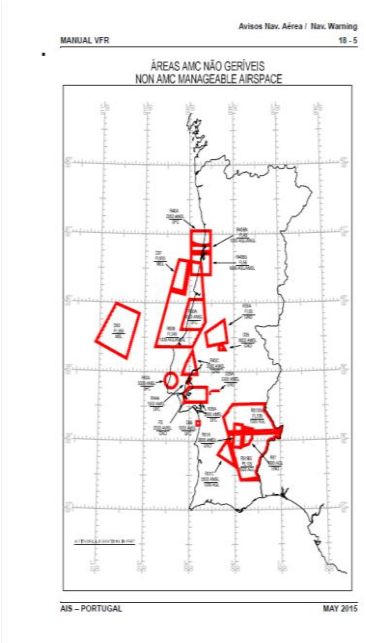

Figura 2.4 – Áreas Não Geridas [16, 17]

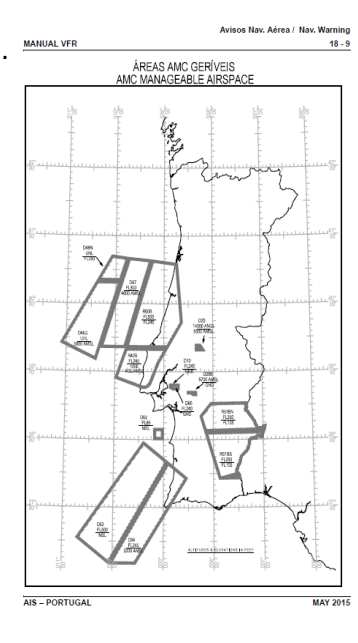

Figura 2.5 – Áreas Geridas [16, 17]

De acordo com as inúmeras restrições relativas às áreas citadas anteriormente, as aeronaves encontram-se sujeitas a diferentes condições que limitam o desempenho de cada voo, encontrando-se diretamente dependente da estrutura da TMA assim como do tipo de aeronaves que sobrevoam essa região.

2.2.4 Aeroporto de Lisboa

A extensão das TMAs é variável e, por isso mesmo, o grau de complexidade da sua correta análise depende de inúmeras circunstâncias. No caso particular da TMA de Lisboa, a mesma é constituída por dois aeródromos, sendo que o presente trabalho de investigação irá abordar única e exclusivamente a dinâmica ocorrida na TMA de Lisboa oriunda ou destinada do/ao Aeroporto de Lisboa.

É importante salientar as especificidades deste aeródromo, sendo o maior e o mais importante no contexto português, visto que as medidas de gestão podem e devem ser selecionadas com o intuito de albergarem da melhor forma possível a realidade vivenciada e, consequentemente, responderem de forma positiva e eficiente às necessidades verificadas não só pelas aeronaves como também pelos(as) agentes. Desta forma, a Tabela 2.2 reúne, de forma simplificada, as principais particularidades do Aeroporto de Lisboa.

Tabela 2.2 – Apresentação do Aeroporto de Lisboa [16, 17]

Particularidade em Análise	Explicação da Particularidade
Código da Organização da Aviação Civil Internacional (OACI), denominada em inglês por International Civil Aviation Organization (ICAO)	LPPT
Código da Associação Internacional de Transportes Aéreos (AITA), denominada em inglês por International Air Transport Association (IATA)	LIS
Latitude, Longitude e Elevação	384627N, 0090803W, 114 m/374 ft
Número de Pistas	Duas que se cruzam entre si, nomeadamente, a RWY03/21 e a RWY17/35, sendo preferencial a utilização da RWY03/21, enquanto que a RWY17/35 se torna útil para a deslocação das aeronaves em solo. Ambas as pistas têm uma extensão de 3800 m e de 2400 m, respetivamente. A utilização da RWY17/35 requer uma coordenação mais exigente entre os(as) agentes devido à proximidade de áreas restritas e das operações militares. Tendo em conta este fator, é impossível utilizar as duas pistas em simultâneo. No caso da RWY03/21, o sentido 03 é requerido com maior frequência, salvo exceções devido à existência de condições meteorológicas adversas, invertendo a utilização para o sentido 21.
Altitude de Transição	4000 ft
Tráfego Autorizado	IFR e VFR
Horário de Operação e Limite de Utilização	Funciona durante vinte e quatro horas. Entre as 00h00 e as 06h00 o número de aterragens e de descolagens é significativamente reduzido, salvo exceções.
Classe do Espaço Aéreo	C
Limite de Altitude	O limite de altitude vertical inferior varia entre os 1000 ft acima do nível médio do mar até ao FL055. Por outro lado, o limite vertical superior encontra-se no FL245.

2.2.5 SID e STAR

A elevada complexidade da execução adequada da gestão do fluxo de tráfego aéreo é devida, em grande parte, ao elevado número de rotas existentes, tanto de entrada quanto de saída da TMA de Lisboa. Por esse motivo, torna-se fundamental conhecer as rotas de descolagem (Figura 2.6) e de aterragem (Figura 2.7) do/no Aeroporto de Lisboa, de forma a detetar possíveis pontos do espaço aéreo com maior probabilidade de ocorrência de congestionamento.

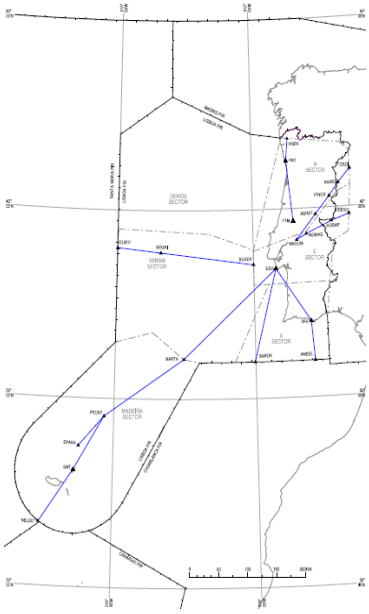

Figura 2.6 – Rotas de Descolagem do Aeroporto de Lisboa [17]

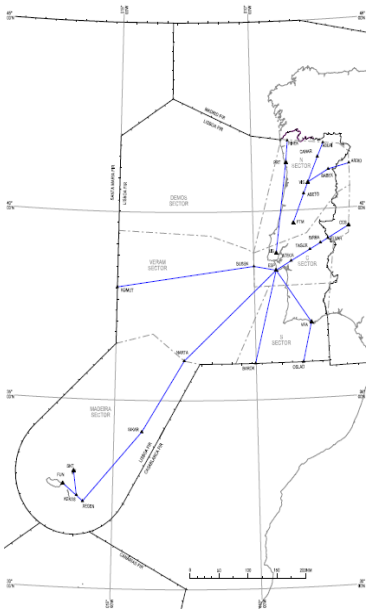

Figura 2.7 – Rotas de Aterragem no Aeroporto de Lisboa [17]

As rotas assinaladas na Figura 2.6 encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 2.3 e, consequentemente as rotas assinaladas na Figura 2.7 encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 2.4.

Tabela 2.3 – Apresentação das Rotas de Descolagem do Aeroporto de Lisboa [17]

Identificação da Rota	Ponto de Saída da RIV de Lisboa
01	PINEK
02	LPPR
03	TOSDI
04	OGERO
05	AMSEL
06	LPFR
07	BAROK
08	NELSO
09	LPMA/LPPS
10	GUNTI

Tabela 2.4 – Apresentação das Rotas de Aterragem no Aeroporto de Lisboa [17]

Identificação da Rota	Ponto de Entrada da RIV de Lisboa
01	PINEK
02	ABUPI
03	ARDID
04	CCS
05	OSLAD
06	LPFR
07	BAROK
08	LPMA/LPPS
09	KOMUT
10	LPPR

Observando a Figura 2.6 e a Figura 2.7 é possível afirmar que a grande maioria do fluxo de tráfego aéreo entra e sai da TMA de Lisboa pelo Norte (N) e por Este (E), sendo uma região com maior probabilidade de ocorrência de congestionamento, exigindo uma atenção e dedicação maior por parte dos(as) agentes. No seguimento desta informação, surge o conceito de Standard Instrument Departure (SID) e de Standard Arrival Route (STAR), relativo às descolagens e às aterragens, respetivamente, que representam os procedimentos disponibilizados aos(às) pilotos com o intuito de auxiliá-los(as) na seleção e no sobrevoo de determinada rota, de forma a garantir o melhor desempenho possível de cada aeronave e, consequentemente, a segurança da operação executada pela mesma [18].

2.3 Impacto do Congestionamento

É notório que o aumento sofrido pela utilização do meio de transporte aéreo tem sido gradual, mas a sua previsão de crescimento demonstra que a melhoria das condições, das ferramentas e/ou dos recursos não cresce segundo o mesmo ritmo e isso acabará por ter um impacto negativo se nenhuma medida for tomada com alguma brevidade. Por outro lado, o maior desafio consiste na capacidade de permitir que o crescimento do fluxo de tráfego aéreo ocorra de forma natural, garantindo a manutenção ou o acréscimo da capacidade existente para responder positivamente à procura e aos níveis de segurança que transmitam tranquilidade aos(às) clientes que recorrem a este meio de transporte [19].

Ao longo dos últimos anos tem sido visível a ocorrência de uma transformação substancial, a nível mundial, referente às inúmeras medidas que proporcionam e/ou facilitam a gestão do fluxo de tráfego aéreo, sendo que essa transformação tem sido fortemente impulsionada por inúmeras razões, destacando-se a questão do congestionamento. Infelizmente, as soluções planeadas, criadas e implementadas não surgiram, numa primeira fase, com o intuito de anteverem a ocorrência deste evento, visto que, nos dias de hoje, inúmeras TMAs se encontram congestionadas.

De qualquer forma, todos os modelos existentes, para além dos que se encontram apresentados de forma detalhada no Capítulo 3, independentemente das suas limitações, representam ferramentas fundamentais que auxiliam na tomada de decisão dos(as) agentes envolvidos(as) na complexa e fulcral função da gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Este congestionamento é ainda mais visível e sentido em períodos de tempo específicos, comummente denominados por horas de pico, sendo estes períodos de tempo variáveis entre as TMAs. A sua correta identificação é de extrema importância para uma adequada gestão de todas as operações inter-relacionadas e imprescindíveis para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, mas encontra-se envolta em inúmeras variáveis que devem ser analisadas cuidadosamente, nomeadamente, a variação constante da relação entre a procura, por parte das aeronaves, e a oferta, promovida pelas TMAs.

É necessário salientar que, apesar da procura aumentar continuamente, a oferta é um recurso limitado devido a diversos(as) aspetos e/ou situações menos expectáveis, como por exemplo, a alteração das condições meteorológicas e/ou a ocorrência de períodos/eventos anuais que promovem uma procura superior à expectável, de acordo com os padrões reportados no histórico existente para cada TMA.

Recorrendo a uma metáfora, nomeadamente, a utilização de um conceito vastamente utilizado no ramo do Desporto, a competição existente entre os(as) agentes está cada vez mais "agressiva" visto que os recursos existentes são limitados e a procura é cada vez maior, potencializando dessa forma um aumento previsível do congestionamento. Esta competição, apesar de "saudável" à primeira vista, potencia que alguns(mas) agentes priorizem os seus objetivos individuais, menosprezando os objetivos comuns do setor [14].

De forma simplificada, é possível referir que os congestionamentos são decorrentes da existência de pelo menos um dos seguintes fatores ou a combinação dos mesmos, nomeadamente [20]:

- O fluxo de passageiros(as), correio e/ou carga que recorre(m) a este meio de transporte para efetuarem as suas deslocações ou os seus transportes entre dois ou mais pontos do Mundo;
- As restrições que afetam negativamente e durante um determinado período de tempo a utilização dos recursos existentes;
- As irregularidades no fluxo de tráfego aéreo, causadas pelas inúmeras condições que nem sempre são conhecidas pelos(as) agentes deste processo.

De qualquer forma, é importante salientar que, em algumas situações, a ocorrência de congestionamento é um facto que pode ser previsto pelos(as) agentes e, dessa forma, possibilitará a implementação de medidas de acordo com as condições existentes.

Por outro lado, existem situações totalmente inesperadas e que, apesar de serem estudadas e analisadas ao longo do histórico recolhido por inúmeras entidades, devido à sua reduzida frequência de ocorrência, quando são verificadas têm a capacidade de desestabilizarem o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Uma das principais consequências do congestionamento são os atrasos dos voos previamente definidos e estes são sentidos tanto nas infraestruturas aeroportuárias quanto nas TMAs. Estes atrasos promovem um impacto negativo a diversos níveis, nomeadamente, para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, para o normal desempenho das tarefas dos(as) agentes, para o aumento do grau de insatisfação dos(as) clientes e para o meio ambiente [21]. Para além dos impactos listados anteriormente, salienta-se a importância dos impactos negativos em termos económicos, podendo os mesmos serem estendidos a diversos(as) agentes [21].

Por outro lado, a probabilidade de ocorrência de conflitos entre duas ou mais aeronaves retrata uma das situações mais comuns em momentos de congestionamento sendo que, a capacidade de antecipar a sua ocorrência deverá ser assumida pela equipa formada entre o Ser Humano e a máquina, nomeadamente, os(as) controladores(as) de tráfego aéreo e os equipamentos adequados que se encontram ao seu dispor.

Os atrasos referidos anteriormente podem ser contabilizados de duas formas, nomeadamente, quando as aeronaves são retidas no solo, enquanto aguardam autorização para se deslocarem até à pista de descolagem, e durante o voo, quando as mesmas necessitam de efetuar alguns ajustes na sua trajetória inicialmente pré-definida. De um ponto de vista estratégico, a medição, ou qualquer forma de contabilização destes impactos, representa uma métrica fundamental para que os(as) agentes consigam avaliar o desempenho do sistema de gestão do fluxo de tráfego aéreo implementado. Por outro lado, salienta-se que a tomada de decisão relativamente à aeronave à qual será imputado um determinado atraso é cada vez mais complexa, visto que a mesma terá de ter em conta os seguintes fatores, nomeadamente, o aumento da procura, a igualdade entre as aeronaves, a interligação entre os voos e o reajuste de rotas [22].

No contexto português, a maior fonte de congestionamento é verificada devido à saturação do espaço aéreo circundante da principal infraestrutura aeroportuária, nomeadamente, o Aeroporto de Lisboa e, por outro lado, devido à limitação dos recursos disponibilizados pela mesma. Esta conclusão é facilmente obtida através da análise dos dados recolhidos pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) que, anualmente, trata esses dados e apresenta a listagem que contempla os movimentos de aeronaves, passageiros(as), carga e correio para cada infraestrutura aeroportuária nacional. A Tabela 2.5, a título de exemplo, apresenta a quantidade de movimentos registados durante o ano de 2019.

Tabela 2.5 – Indicadores de Transporte Aéreo [23]

Mês de 2019	Quantidade de Aeronaves (Unidades)	
	Descoladas	Aterradas
janeiro	8079	8045
fevereiro	7292	7277
março	8437	8421
abril	9196	9178
maio	9574	9561
junho	9748	9714
julho	10337	10322
agosto	10282	10281
setembro	9837	9861
outubro	9544	9556
novembro	8260	8236
dezembro	8557	8545

Através da análise da Tabela 2.5 é possível identificar, de forma genérica, os meses em que o número de movimentos de aeronaves é substancialmente superior, nomeadamente, no Verão, potencializando o aumento de congestionamentos da TMA de Lisboa e a necessidade da implementação de medidas que auxiliem não só na gestão deste desequilíbrio quanto na antevisão da ocorrência desses momentos mais críticos.

Por estes motivos, e tantos outros vastamente enunciados e estudados por outros(as) autores(as), década após década, é bastante relevante enunciar a importância da existência de uma "rede" para a monitorização e o planeamento, efetuada(o) de forma antecipada, com o intuito de responder positivamente às necessidades do setor e satisfazendo as pretensões dos(as) envolvidos(as) no comportamento do fluxo de tráfego aéreo. Esta "rede" é constituída por uma estrutura flexível composta por metodologias, ferramentas e pessoas que cooperam na tomada de consciência, de forma prévia, da relação entre a variação de fluxo de tráfego aéreo e da capacidade de cada TMA, recordando que a mesma é, cada vez mais, reduzida, exigindo um esforço reforçado dos(as) agentes para garantirem uma eficiente capacidade de gestão e uma otimização inteligente da mesma. Para além de ser desejável o aumento da eficiência de toda esta "rede" é importante não menosprezar a importância do Ser Humano em todas as tarefas em causa e, principalmente, na eficácia da previsão e do planeamento posterior, minimizando as discrepâncias e as incertezas das operações de tráfego aéreo [24].

Reforça-se também o importante papel e a participação das autoridades de aviação civil, centrando os seus esforços na otimização da utilização da capacidade disponível tanto nas infraestruturas aeroportuárias quanto nas TMAs, sem que as decisões tomadas para atingirem esse fim promovam um impacto negativo na operacionalidade dos(as) agentes envolvidos(as) neste processo [25]. Tanto as autoridades como outras entidades têm vindo a promover estudos em conjunto com a indústria e com a academia para o desenvolvimento de metodologias e ferramentas que potenciem a otimização do fluxo de tráfego aéreo.

2.4 Variáveis que Afetam a Capacidade

O estudo, a análise e a interpretação do fluxo de tráfego aéreo, apesar de depender de inúmeras variáveis, pode também ele ser denominado como sendo uma variável que permite verificar o funcionamento do setor do transporte aéreo e, neste caso, e mediante o seu contexto de implementação e interdependência, como sendo uma variável aleatória. Por este facto, é possível afirmar que a mesma assume um significado concreto, por norma numérico, quando se pretende analisar a capacidade como sendo o reflexo da quantidade de aeronaves que compõem o fluxo de tráfego aéreo em causa, em um determinado período de tempo, sendo a mesma caracterizada de forma exaustiva, detalhada e complexa, de acordo com o número de variáveis pré-estabelecidas para a correta e completa descrição do fluxo de tráfego aéreo.

Esta aleatoriedade está diretamente relacionada com a quantidade e a especificidade das variáveis selecionadas e o período de tempo pré-definido para a realização do estudo pretendido.

Caracterizando o fluxo de tráfego aéreo como sendo um sistema, constituído por inúmeras variáveis, é facilmente percetível que a(s) "resposta(s)" desse sistema dependerá(ão) diretamente das variáveis que influenciam positiva ou negativamente o seu normal funcionamento. Por sua vez, todas as variáveis que têm impacto no fluxo de tráfego aéreo são também elas classificadas como sendo variáveis aleatórias e, complementarmente, sujeitas a diversas limitações, tendo em conta que a sua complexidade não pode ser comparada devido a inúmeros fatores, como por exemplo, existem variáveis puramente burocráticas, nomeadamente, aquelas que provêm de obrigatoriedades legislativas, e existem variáveis puramente arbitrárias, cuja(o) intenção e/ou esforço do Ser Humano não terá qualquer resultado, nomeadamente, aquelas que provêm das condições meteorológicas. É importante salientar que apesar da comparação entre as variáveis não ser recomendável, devido às suas especificidades, as mesmas podem ser agrupadas de acordo com algumas características, nomeadamente, as variáveis contáveis e as variáveis não contáveis sendo que todas elas dependem diretamente do período de tempo em análise e, por esse motivo, deve ser observado o seu carácter estocástico.

A quantidade de variáveis introduzidas em um determinado modelo possui os seus prós e contras, isto é, se for elevada representa melhor a realidade, mas, em contrapartida, torna a modelação e a consequente análise demasiado complexa e morosa. Por outro lado, se for reduzida não terá a capacidade de representar da melhor forma possível a realidade, apresentando diversas lacunas das quais não será possível detetar os diferentes impactos, mas, em contrapartida, permite uma modelação muito mais rápida e simplificada. É desejável encontrar o equilíbrio nesta decisão, definindo para isso a quantidade mínima e adequada de variáveis que permitam a realização do estudo pretendido em tempo útil e valorizando, de forma ponderada, os resultados promovidos pelo modelo construído.

Analisando a evolução do setor, é perfeitamente visível e aceitável que a mesma acarrete, por si só, um vasto conjunto de limitações que devem ser identificadas, analisadas e/ou minimizadas, sempre que possível e de forma atempada, mediante as circunstâncias, os recursos e/ou as tecnologias disponíveis para o efeito pretendido. Essas limitações, denominadas por variáveis neste trabalho de investigação, representam as condicionantes que devem ser analisadas aquando da formulação de qualquer modelo que tenha como principal intuito auxiliar na gestão e/ou na otimização do normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

De acordo com a experiência da autora deste trabalho de investigação, com o conhecimento obtido tanto a nível académico como profissional e com o resultado da revisão bibliográfica, as variáveis identificadas e relevantes para o contexto da formulação do modelo pretendido, e que representam diferentes fatores de influência, encontram-se seguidamente apresentadas por ordem alfabética na Tabela 2.6. Salienta-se, porém, como foi referido anteriormente, que não poderá ser feita uma comparação direta entre as mesmas pois existem diferentes tipos de variáveis com diferentes formas de quantificação.

Tabela 2.6 – Variáveis que Afetam a Capacidade [18, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71]

Identificação das Variáveis
Altitude e visibilidade
Capacidade pré-definida de cada TMA
Carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo e limite de horas de voo para as tripulações
Condições meteorológicas
Consumo de combustível
Densidade do fluxo de tráfego aéreo
Dependência do normal funcionamento das operações na infraestrutura aeroportuária, nomeadamente, entre o lado ar e o lado terra
Estrutura, geometria e localização geográfica da TMA
Eventos relevantes durante o período de tempo em análise
Fase de aproximação
Fiabilidade das operações de tráfego aéreo
Instrumentos existentes na infraestrutura aeroportuária
Legislação em vigor
Negociação entre os(as) agentes
Nível da evolução tecnológica dos recursos ao dispor dos(as) agentes
Ocorrência de problemas técnicos
Poluição
Quantidade de infraestruturas aeroportuárias nas proximidades da TMA
Quantidade e configuração das pistas da infraestrutura aeroportuária
Questões económicas e políticas
Recursos no lado ar e no lado terra da infraestrutura aeroportuária
Relação entre as aterragens e as descolagens
Restrições variadas, como por exemplo, obstruções nas pistas
Rotas de entrada e de saída da TMA
Sazonalidade
Segurança operacional
Separações mínimas entre as aeronaves
Situações de emergência
Slots disponíveis
Tempo médio entre a entrada na TMA e a aterragem e entre a descolagem e a saída da TMA
Tipos e classes de aeronaves
Velocidades médias

Devido à sua extensão e complexidade, existem diversas variáveis que, muitas vezes, se encontram subentendidas na formulação dos modelos e até mesmo nos dados utilizados para a respetiva análise. Por esse motivo, e de acordo com os resultados obtidos com os modelos delineados, em trabalhos futuros de investigação, outras variáveis poderão ser adicionadas e/ou modificadas de forma a enriquecerem não só a complexidade do modelo como também a veracidade do mesmo e, consequentemente, os resultados obtidos a partir da sua simulação.

2.5 Tipos de Capacidade

Antes de serem apresentadas as formas de classificação e distinção dos diferentes tipos de capacidade existentes nas TMAs e nas infraestruturas aeroportuárias, é importante evidenciar um conceito transversal a esta classificação, nomeadamente, a sazonalidade.

O setor do transporte aéreo, tendo em conta a sua forte ligação com o setor do turismo, depende diretamente do comportamento de movimentação, principalmente, de passageiros(as) que optam por este meio de transporte para efetuarem as suas viagens. Por outro lado, salienta-se o facto de que a sazonalidade varia em cada TMA, tendo em conta algumas variáveis fulcrais, como por exemplo, a ocorrência de eventos, as condições meteorológicas e a relação de custo *VS* benefício da seleção de determinado destino. Por este facto, a sazonalidade deverá ser um fator relevante na análise da dinâmica verificada em cada TMA, sendo importante antevê-la de forma adequada.

Complementando a análise do conceito de sazonalidade, são fundamentais a análise e a perceção do impacto do fator psicológico na gestão do fluxo de tráfego aéreo. Tal como já foi referido anteriormente, os(as) agentes são, na realidade, as principais variáveis que afetam, positiva ou negativamente, o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. Desse modo, por mais automatizado e otimizado que seja o processo da gestão do fluxo de tráfego aéreo, o setor deverá demonstrar uma preocupação constante relativamente ao comportamento dos(as) agentes, devendo por isso existir uma atualização e monitorização constante do desenvolvimento das teorias de Fatores Humanos.

Tal como foi referido anteriormente, os(as) agentes anseiam a implementação de medidas que possam, de alguma forma, aumentar a capacidade das TMAs e das infraestruturas aeroportuárias. Nesse sentido, é possível apresentar duas formas que propiciam esse aumento, tendo em conta o prazo de implementação das medidas, nomeadamente [72]:

- **Implementação a Curto Prazo**: Tendo em conta a celeridade deste aumento, são desenvolvidos e/ou aperfeiçoados métodos operacionais úteis para a gestão do fluxo de tráfego aéreo e para uma utilização otimizada da capacidade disponibilizada;

- **Implementação a Longo Prazo**: Uma das principais medidas é o investimento na construção de novas infraestruturas aeroportuárias ou na sua ampliação, como por exemplo, através da expansão das pistas e/ou no acréscimo ou no restauro de infraestruturas fundamentais para garantirem a realização das tarefas imprescindíveis às operações de tráfego aéreo.

Reconhecendo a magnitude do investimento necessário para a implementação das medidas a longo prazo, é facilmente perceptível que o setor e os(as) agentes responsáveis deverão cada vez mais legitimar a relevância das medidas a curto prazo e unir os esforços necessários para que estas produzam os efeitos pretendidos, nomeadamente, um aumento de capacidade que, na realidade, representa apenas uma otimização da sua utilização, visto que os recursos físicos e humanos não são dilatados de acordo com a procura registada.

Relembrando o conceito de capacidade e transpondo-o para o contexto das TMAs, o mesmo pode ser definido como o número de movimentos, sejam eles aterragens ou descolagens, que uma determinada infraestrutura aeroportuária consegue gerir de forma adequada durante um determinado período de tempo, podendo este ser de apenas alguns minutos ou de uma hora.

O cálculo dessa capacidade é efetuado, em diversas TMAs, com base na análise dos elementos de cada uma delas, como por exemplo, o espaço aéreo, as superfícies de movimento, os terminais e os acessos terrestres, e essa forma de cálculo revelou-se insuficiente e, muitas vezes, deficiente pelo facto de resultar em um valor de capacidade inferior à que pode ser verificada em condições operacionais máximas [32]. Por este motivo, muitos(as) autores(as) reforçaram a necessidade de que a estimativa desta capacidade seja obtida com base em estatísticas e em teorias da probabilidade e, dessa forma, poderá abranger um vasto conjunto de variáveis.

É evidente que o valor da capacidade de uma determinada TMA sofre alterações ao longo do dia e, em muitos momentos, mesmo quando ocorrem situações de congestionamento, as operações de tráfego aéreo são geridas de forma segura, mesmo que o número de movimentos tenha ultrapassado a capacidade declarada. Por esse motivo, é fundamental que cada TMA defina previamente, de forma clara e transparente, a sua capacidade estimada, sendo esta estimativa um reconhecimento dos recursos disponíveis. Apesar de ser um conceito comum e utilizado frequentemente no setor do transporte aéreo, é importante conhecer e dominar as diferentes formas de classificação da capacidade.

A forma de classificação mais elementar da capacidade de uma determinada infraestrutura aeroportuária é constituída por duas formas, nomeadamente [41, 64]:

- **Capacidade de Aterragens**: Esta capacidade é expressa de acordo com a Airport Acceptance Rate (AAR);
- **Capacidade de Descolagens**: Esta capacidade é expressa de acordo com a Airport Departure Rate (ADR).

Como seria expectável, existe uma relação entre a AAR e a ADR mas esta é mais complexa do que se imagina visto que depende de inúmeras variáveis, como por exemplo, a quantidade de pistas em cada infraestrutura aeroportuária e, por outro lado, a utilidade atribuída a cada pista, isto é, poderão existir pistas alocadas única e exclusivamente às aterragens, às descolagens ou mistas, permitindo qualquer tipo de operações de tráfego aéreo.

Em segundo lugar, a forma de classificação intermédia da capacidade de uma determinada TMA é constituída por quatro formas, nomeadamente [67]:

- **Capacidade Teórica**: É o número máximo de aeronaves que uma determinada TMA é capaz de albergar por uma determinada unidade de tempo, independentemente dos constrangimentos existentes e do facto dos mesmos poderem afetar a qualidade dos serviços prestados;
- **Capacidade Potencial**: É o número máximo de aeronaves que uma determinada TMA é capaz de albergar por uma determinada unidade de tempo, tendo em conta um determinado nível de procura registado em cada momento;
- **Capacidade Prática**: É o número máximo de aeronaves que uma determinada TMA é capaz de albergar por uma determinada unidade de tempo, tendo em conta um determinado nível de atraso médio registado em cada momento;
- **Capacidade Operacional**: É o número máximo de aeronaves que uma determinada TMA é capaz de albergar por uma determinada unidade de tempo, tendo em conta um determinado nível de atraso máximo registado em cada momento.

Como seria expectável, existe uma relação entre os quatro tipos de capacidade apresentados anteriormente, sendo também facilmente percetível, de acordo com as restrições pressupostas, a existência de uma relação matemática entre as mesmas (Equação 2.1).

$$Operacional \leq Prática \leq Potencial \leq Teórica \tag{2.1}$$

Em terceiro lugar, a forma de classificação mais complexa da capacidade de uma determinada TMA é constituída por sete formas, nomeadamente [18, 44, 67, 73]:

- **Capacidade Real**: Esta capacidade é determinada tendo em conta todas as variáveis que possam, de forma direta ou indireta, influenciar o número de aeronaves que podem ser albergadas por uma determinada TMA de forma segura;
- **Capacidade Declarada**: Esta capacidade representa o número máximo de aeronaves que podem ser acomodadas em uma determinada TMA, tendo em conta o atraso médio imputado aquando da prestação dos serviços pretendidos;
- **Capacidade Estática**: Esta capacidade é utilizada com o intuito de retratar o potencial de cada TMA, tendo em conta a área útil existente e a quantidade de serviços prestados às aeronaves;

- **Capacidade Dinâmica**: Esta capacidade representa a relação entre o processamento máximo de aeronaves e/ou passageiros(as), de forma segura, e o número de agentes e variáveis afetos(as) em cada momento às operações de tráfego aéreo. Por outro lado, é a relação entre a capacidade estática e o tempo necessário para prestar os diferentes serviços;
- **Capacidade Sustentada**: Esta capacidade representa uma combinação entre a capacidade dinâmica e a capacidade estática, descrevendo a capacidade geral de uma determinada TMA para albergar o número máximo de aeronaves, tendo em conta a qualidade do serviço prestado e as inúmeras variáveis que se modificam ao longo do tempo;
- **Capacidade Disponível**: Esta capacidade representa o fluxo máximo de tráfego aéreo que pode ser verificado em uma determinada TMA por uma determinada unidade de tempo, tendo em conta as condições reais dos sistemas ATFM em cada momento, sendo que estas se deverão manter durante um determinado período de tempo para salvaguardar os requisitos de segurança e os valores máximos de atraso médio aceitável para cada situação;
- **Capacidade Máxima**: Esta capacidade refere-se ao fluxo máximo de tráfego aéreo que pode ser verificado em uma determinada unidade de tempo, alertando para o facto de que esta densidade de fluxo de tráfego aéreo não poderá ser sustentada por um longo período de tempo devido aos requisitos de segurança implementados.

Tendo em conta os vários tipos de capacidade e as diferentes classificações utilizadas em variados contextos, em condições ideais, a capacidade disponível de uma determinada TMA deverá ser equivalente à capacidade declarada, assegurando dessa forma que todo o sistema ATFM funciona em prol da segurança das operações de tráfego aéreo e da comunicação adequada entre os(as) agentes que auxiliam na complexa tarefa de gestão do fluxo de tráfego aéreo.

2.6 Solução da Modelação

O forte congestionamento nas TMAs indica, claramente, a necessidade da otimização da gestão da capacidade pré-estabelecida para cada uma delas, conhecendo as especificidades existentes e tendo como intuito a criação de um modelo realista que servirá de base para este processo, mesmo que inicialmente esse modelo não se adeque completamente à realidade existente. A utilização do histórico de dados referente ao fluxo de tráfego aéreo permite a aproximação ao contexto real e facilita a modelação e a otimização do mesmo.

O aumento do fluxo de tráfego aéreo potencia inevitavelmente, em termos motivacionais, a procura constante por ferramentas e atitudes que consigam contornar e/ou minimizar as restrições existentes, aumentando a flexibilidade das rotas definidas para cada aeronave que, muitas vezes, representa um dos principais motivos pela atribuição de atrasos de forma a evitar possíveis conflitos entre duas ou mais aeronaves [30].

Em primeiro lugar, é importante que exista um foco direcionado às metodologias que darão início à criação do modelo pretendido e, posteriormente, após a sua construção, o mesmo deverá ser sujeito a inúmeras análises de carácter técnico que tentarão melhorá-lo e ajustá-lo de forma consistente, coerente e adequada para que o mesmo consiga ir de encontro à realidade do setor do transporte aéreo.

Salienta-se, porém, que todos os modelos possuem as suas limitações, como seria expectável devido à inexistência de modelos perfeitos, sendo importante identificá-las ao longo da sua criação e também após a obtenção dos resultados para que, num futuro a curto, médio e/ou longo prazo, possam ser sugeridas melhorias e/ou alterações que minimizem e/ou colmatem essas limitações [74].

Um dos principais interesses da implementação destes modelos diz respeito à possibilidade de efetuarem previsões que permitam gerir, atempada e corretamente, a relação entre a procura e a capacidade disponibilizada, sendo importante salientar que a previsão incorreta da procura poderá dar origem a uma utilização desadequada da capacidade existente e de outros recursos existentes [31]. Para além da elaboração de previsões, pretende-se também aumentar a precisão dos planeamentos das operações de tráfego aéreo para uma melhor otimização de todo este processo, tendo como principal interesse a fase da aterragem e da descolagem [75].

2.7 Discussão

De entre as diversas formas de locomoção existentes e a quantidade de meios de transporte ao dispor de todos(as), o meio de transporte aéreo tem sofrido, nas últimas décadas, uma grande evolução, impulsionando a sua divulgação e atraindo cada vez mais clientes. Por este motivo, e apesar das circunstâncias decorrentes da COVID-19, as projeções para crescimento são significativas, representando uma necessidade constante da melhoria das ferramentas e/ou dos recursos utilizadas(os) pelos(as) agentes dedicados(as) à gestão do fluxo de tráfego aéreo.

A concreta complexidade da quantificação da capacidade de uma TMA revela-se constantemente numa tarefa ainda mais árdua quando são evidentes e percetíveis o impacto e a dependência direta da estrutura de uma TMA para a definição da respetiva capacidade. Por este motivo, o conhecimento profundo das especificidades envoltas em cada TMA é fundamental para a sua caracterização e para a compreensão das restrições impostas na sua capacidade.

Este processo, para além de moroso é bastante exaustivo visto que cada TMA possui uma estrutura única e, como tal, requer ações e/ou medidas personalizadas.

O vasto número de variáveis que afetam, direta ou indiretamente, a capacidade de uma TMA, para além de dificultar o processo de representação clara e precisa da realidade vivenciada nessa mesma TMA são, elas mesmas, parâmetros cuja quantificação representa um processo bastante moroso e fatigante pois, a sua grande maioria, não possui métricas associadas que facilitem ou agilizem esta tarefa. Neste sentido, salienta-se a necessidade do conhecimento prévio do impacto de cada uma delas e a sua adição cuidadosa às diferentes modelações com o intuito de verificar, de forma precisa, o impacto individual de cada uma delas antes de ser relatado o impacto conjunto de duas ou mais variáveis analisadas em simultâneo.

Tendo em conta a complexidade expressa anteriormente sob dois pontos de vistas, realça-se que independentemente das medidas que possam ser desenvolvidas e implementadas para auxiliarem na gestão do fluxo de tráfego aéreo, o denominador comum e fulcral para o seu sucesso é o envolvimento, o empenho, a colaboração e a entreajuda dos(as) agentes, possibilitando, dessa forma, atingir um equilíbrio, o mais perfeito possível, entre a tomada de decisão automática e a tomada de decisão manual.

Essas medidas, salvo as devidas especificações e características intrínsecas, deverão ter a capacidade de lidarem com a complexidade citada e, de forma adequada, lidarem também com um dos maiores problemas verificados nas TMAs das maiores metrópoles mundiais, nomeadamente, o elevado nível de congestionamento. O congestionamento anteriormente citado, para além de afetar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, propicia e propaga a ocorrência e a acumulação de atrasos entre as aeronaves e, em situações limite, pode colocar em causa a segurança das operações de tráfego aéreo e de todos(as) os(as) envolvidos(as).

Utopicamente, os problemas causados pelo excesso de procura por parte das aeronaves poderiam ser, rápida e facilmente, ultrapassados através do aumento físico do espaço aéreo existente, permitindo dessa forma albergar toda a procura verificada, mas, tendo em conta a impossibilidade descrita, os esforços deverão centrar-se na criação e/ou no desenvolvimento de medidas eficazes e úteis para lidarem e solucionarem com/os desafios impostos pelo crescimento do setor do transporte aéreo.

No caso particular da TMA de Lisboa, a urgência deste estudo justifica-se facilmente pela simples observação diária do fluxo de tráfego aéreo, sendo visível e comprovado, através de inúmeras fontes, que a capacidade desta TMA se encontra próxima do seu limite. Este facto significa que o nível de constrangimento, tanto do espaço aéreo quanto da área terminal, irá aumentar nos próximos anos e, como tal, a implementação de medidas adequadas torna-se imprescindível para que os(as) agentes consigam gerir adequadamente o elevado número de aeronaves que circulam nesta TMA diariamente.

Uma das principais técnicas para lidar com as situações de congestionamento é, invariavelmente, o conhecimento do seu impacto e, acima de tudo, a capacidade de previsão, de forma antecipada, da sua ocorrência. Desta forma será possível recolher e/ou descrever padrões de comportamento, sejam eles, diários, anuais e/ou sazonais, interligando estas informações com o conhecimento detalhado de cada TMA, nomeadamente, as suas especificidades estruturais, restrições e/ou limitações e, sobretudo, a sua capacidade.

Capítulo 3

Princípios de Análise do Fluxo de Tráfego Aéreo

Após uma vasta e detalhada descrição da complexidade da quantificação da capacidade de uma determinada TMA, assim como da apresentação de algumas particularidades respeitantes ao Aeroporto de Lisboa, antes da criação do modelo autoral para combater os problemas vivenciados nesta TMA, é necessário relatar e demonstrar a variedade de medidas existentes e aplicadas em outras TMAs e em outros contextos que, de certa forma, poderão ser úteis para a análise da problemática em estudo neste trabalho de investigação.

A redação e a estrutura da informação contemplada no presente capítulo têm como principal intenção apresentar o resultado da recolha de um vasto conjunto de medidas que são utilizadas até aos dias de hoje e que tentam lidar, da melhor forma possível, com as variáveis que afetam e condicionam, direta ou indiretamente, o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, realçando as suas especificidades e apontando as suas limitações.

O presente capítulo é constituído por sete subcapítulos, sendo que cada um deles será apresentado de forma resumida. O subcapítulo 3.1 apresenta os principais conceitos relativos ao fluxo de tráfego aéreo, permitindo a sua compreensão e distinção. Entre o subcapítulo 3.2 e o subcapítulo 3.5 serão apresentadas as medidas desenvolvidas e implementadas ao longo das últimas décadas. O subcapítulo 3.6 sintetiza um vasto conjunto de medidas, analisando os prós e os contras da sua implementação, de acordo com as situações existentes. O subcapítulo 3.7 condensa os principais pontos analisados durante o Capítulo 3 e sugere medidas benéficas consequentes da análise crítica efetuada durante a sua redação.

3.1 Conceitos Relativos ao Fluxo de Tráfego Aéreo

De entre as diferentes abordagens criadas, desenvolvidas, implementadas e posteriormente encontradas ao longo do processo de revisão bibliográfica realizada, foram identificadas e definidas as duas abordagens mais comuns e que, por sua vez, a sua aplicabilidade é transversal à grande maioria das TMAs, independentemente da sua localização e das diferenças evidentes.

A escolha dessas duas abordagens foi elaborada com o intuito de agrupar as(os) inúmeras(os) metodologias e métodos, também denominadas(os) por técnicas e/ou ferramentas, utilizadas para lidarem e/ou minimizarem, da melhor forma possível, com os problemas adjacentes à gestão do fluxo de tráfego aéreo.

A primeira abordagem é baseada em modelos estatísticos e a segunda abordagem é baseada em sistemas multiagentes, sendo que cada uma delas será constituída por algumas(ns) metodologias e métodos que têm como objetivo proporem a melhor resolução, encontrada até ao momento, para os problemas e/ou as situações inesperados(as) que podem ocorrer durante o processo da gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Antes de se iniciar a apresentação detalhada de cada abordagem é necessário distinguir, de forma clara e concisa, a diferença entre método e metodologia, para que não surjam quaisquer dúvidas e/ou erros de interpretação ao longo da análise realizada. Para além destas definições introdutórias é necessário, por sua vez, analisar os diferentes tipos de modelos existentes, de forma a interpretar as nomenclaturas encontradas ao longo da revisão bibliográfica e que são frequentemente utilizadas pela grande maioria dos(as) autores(as) estudados(as).

3.1.1 Métodos

A definição mais rápida e instintiva de qualquer tipo de método é denominada por iniciativa de gestão de tráfego aéreo, designada em inglês por Traffic Management Initiatives (TMI) [19, 76]. Tal como o nome sugere, caso seja realizada uma tradução literal da sigla, a mesma representa o conjunto de estratégias e/ou procedimentos que são implementadas(os) em diferentes situações, consoante as necessidades existentes. Estas iniciativas têm como principal objetivo, de acordo com inúmeros requisitos e/ou fatores, promoverem melhores resultados para a situação de tráfego existente, sendo a menos restritiva para a gestão desta situação e, por outro lado, tentando não afetar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo nas TMAs. Para além destas características, estas TMIs são imprescindíveis quando se trata de espaços aéreos extremamente congestionados, sendo esse congestionamento originado pelo elevado volume de tráfego aéreo, pelas condições meteorológicas adversas e/ou por qualquer outro tipo de situação que possa ser classificada como inesperada e que foi listada no subcapítulo 2.4.

É importante referir que o cumprimento destas TMIs não possui um carácter obrigatório na grande maioria das situações, desde que os(as) agentes, principalmente as companhias de transporte aéreo, sejam capazes de sugerirem e implementarem uma ou mais ações alternativas que promovam igual ou superior eficácia do que a TMI previamente definida e/ou sugerida por outro(a) agente envolvido(a) neste processo.

3.1.2 Metodologias

A metodologia é uma abordagem, seja ela analítica ou empírica, que recorre a ferramentas e/ou sistemas que permitam a sua implementação através da adequada seleção de um método que proporcione os resultados pretendidos.

Por outro lado, uma metodologia recorre a inúmeros tipos de abordagens, utilizando diversos tipos de técnicas que possuem características que, de alguma forma, as distinguem e que as tornam específicas para cada tipo de problema identificado. Tal como os métodos, as metodologias podem ser automatizadas ou manuais, consoante o nível de desenvolvimento e as ferramentas a que estas se encontram agregadas. Independentemente das diferenças ou das semelhanças de algumas(ns) características, utilidades e/ou propósitos, tanto os métodos quanto as metodologias estudados(as), criados(as) e implementados(as) têm como principal meta a manutenção ou o aumento dos níveis de segurança das operações de tráfego aéreo.

3.1.3 Modelos

Os diferentes tipos de modelos existentes podem ser apresentados mediante três classificações que serão seguidamente enunciadas e descritas de forma detalhada. Estas classificações surgiram com a intenção de agruparem os diferentes modelos, de forma a facilitarem e a agilizarem a sua identificação, de acordo com as suas características intrínsecas assim como de acordo com as mais valias promovidas por cada um deles. De acordo com a experiência da autora deste trabalho de investigação e com o conhecimento obtido tanto a nível académico como profissional, as variáveis identificadas e consideradas como relevantes para o contexto da formulação dos modelos pretendidos, foram as seguintes, nomeadamente, Modelos Básicos *VS* Modelos Detalhados, Modelos a Longo Prazo *VS* Modelos a Médio Prazo *VS* Modelos a Curto Prazo e Modelos Estratégicos *VS* Modelos Pré-Táticos *VS* Modelo Táticos [1].

Em primeiro lugar, e de forma generalizada, é possível referir que as formulações dos modelos permitem uma classificação simplificada, associando-os em dois grupos, nomeadamente, os Modelos Básicos e os Detalhados. Cada um deles possui, inevitavelmente, pontos fortes e fracos que deverão ser conhecidos aquando da sua seleção para uma posterior implementação. No caso dos Modelos Básicos destaca-se, positivamente, a capacidade de foco, a maleabilidade e a simplificação e, em contrapartida, destaca-se, negativamente, a dispersão, a falta de praticidade e a incapacidade de representar constantemente a realidade vivenciada. No caso dos Modelos Detalhados destaca-se, positivamente, a abrangência, o dinamismo e o realismo e, em contrapartida, destaca-se, negativamente, a complexidade, o custo e a morosidade [20, 21, 24].

Estas duas classificações distinguem-se entre si pelo seu grau de minuciosidade e pela quantidade de elementos envolvidos em todo o estudo, isto é, quanto mais simplificada for a sua formulação e, por consequência, menor a quantidade de variáveis em estudo, mais "básico" se considera o modelo em análise. É então possível verificar que apesar dos Modelos Básicos serem uma ferramenta rápida e simplificada em situações onde o problema se encontra restrito a uma área da infraestrutura aeroportuária, a tendência para o futuro baseia-se na aplicação de modelos cada vez mais detalhados que consigam ir de encontro à realidade, sendo possível adaptar os Modelos Detalhados em cada momento, de acordo com cada situação detetada.

Após a classificação dos modelos, tendo em conta o seu grau de minuciosidade e de complexidade, é também possível classificá-los de acordo com a antecedência com que as TMIs são planeadas, estudadas, definidas e implementadas. Os modelos podem então ser agrupados em três períodos, nomeadamente, os Modelos a Longo Prazo, a Médio Prazo e a Curto Prazo. Ao contrário da comparação efetuada entre os Modelos Básicos e os Detalhados, não é possível descrutinar os pontos fortes e os fracos destes novos três modelos, visto que os mesmos só poderão ser aplicados em momentos distintos, não sendo, por esse facto, equiparáveis de forma tão direta. No caso dos Modelos a Longo Prazo, estes aplicam-se com vários anos de antecedência do período em que são delineados, como por exemplo, a decisão da construção ou do restauro das infraestruturas aeroportuárias, exigindo por isso um investimento bastante elevado e ponderado. No caso dos Modelos a Médio Prazo, estes aplicam-se com pelo menos um ano de antecedência do período em que são delineados, como por exemplo, através do ajuste e/ou da alteração dos planos de voo das aeronaves. No caso dos Modelos a Curto Prazo, estes aplicam-se com uma antecedência máxima de vinte e quatro horas do período em que são delineados, como por exemplo, através da atribuição de tempos de espera para alguma(s) aeronave(s) com base em circunstâncias verificadas nesse momento [11, 25, 70, 72, 77, 78].

Estas três classificações distinguem-se entre si pelo espaço temporal de implementação e, consequentemente, pela rapidez necessária para a tomada de decisão por parte dos(as) agentes envolvidos(as) nas operações de tráfego aéreo. É então possível verificar que apesar de serem "apelativos", os Modelos a Longo Prazo são os menos utilizados, visto que, com o franco crescimento do setor do transporte aéreo, é praticamente impossível prever toda e qualquer situação que poderá ocorrer num futuro tão distante. Assim sendo, é possível afirmar que os Modelos a Curto Prazo, tendo em conta as suas características, são os modelos mais utilizados, visto que podem ser definidos rapidamente para darem resposta às ocorrências verificadas. Apesar de não existir um consenso entre os(as) autores(as) quanto à antecedência da implementação das TMIs, a grande maioria afirma que os Modelos a Curto Prazo são os mais adequados para as características atuais do fluxo de tráfego aéreo, promovendo resultados que vão de encontro à realidade do setor e sendo os mais dinâmicos e "ágeis", moldando-se fácil e rapidamente às necessidades identificadas em cada momento.

Por fim, de forma a complementar as classificações apresentadas anteriormente, é necessário apresentar a terceira e última classificação, sendo que esta se relaciona em parte com o intuito da classificação anterior. Através desta classificação, os modelos podem ser associados em três grupos, nomeadamente, os Modelos Estratégicos, os Modelos Pré-Táticos e os Modelos Táticos, sendo que neste caso é necessário evidenciar as suas características benéficas. No caso dos Modelos Estratégicos, destaca-se a antecedência bastante alargada, auxiliando no planeamento de medidas adequadas e permitindo obter resultados interessantes no contexto da gestão das situações de congestionamento. No caso dos Modelos Pré-Táticos, destaca-se a antecedência mais restrita, auxiliando na tomada de decisões de forma mais realista e permitindo a obtenção de resultados mais adequados e compatíveis com a realidade.

No caso dos Modelos Táticos, destaca-se a antecedência bastante reduzida, auxiliando na gestão praticamente em tempo real das operações de tráfego aéreo e permitindo a obtenção de resultados concretos e ajustáveis de acordo com as situações verificadas [10, 11, 25, 26, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 44, 70, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100].

Estas três classificações distinguem-se entre si principalmente pelas especificidades de implementação e, consequentemente, pelas mais valias obtidas após a implementação de cada um dos modelos para a gestão do fluxo de tráfego aéreo. É então possível verificar que os Modelos Estratégicos são bastante interessantes, mas quanto mais "distante" for efetuado o planeamento, mais "desajustado" será o resultado obtido, devido à imprevisibilidade do fluxo de tráfego aéreo. Assim sendo, é possível afirmar que, de entre os três modelos descritos, os Modelos Táticos são os que mais se aproximam da realidade do setor, sendo suficientemente dinâmicos para permitirem rápidas e eficazes alterações, de forma a contornarem e/ou resolverem as ocorrências verificadas. Apesar de não existir um consenso entre grande parte dos(as) autores(as) relativamente à antecedência de implementação das medidas, todos(as) afirmam que os Modelos Táticos são os mais adequados para as atuais características do fluxo de tráfego aéreo.

3.1.4 Abordagens

De acordo com a explicação efetuada no início do presente subcapítulo, de entre as diferentes abordagens encontradas através do processo de revisão bibliográfica, duas delas destacaram-se e, de acordo com as suas características intrínsecas, merecem uma análise e um estudo mais detalhada(o). Assim sendo, essas duas abordagens serão detalhadamente definidas através da apresentação das metodologias e dos métodos utilizadas(os) por inúmeros(as) autores(as) que tentaram, de alguma forma, sugerir melhorias para os procedimentos e/ou as ferramentas utilizados(as) na gestão do fluxo de tráfego aéreo.

3.1.4.1 Abordagem Baseada em Modelos Estatísticos

De entre os quatro modelos que serão apresentados na primeira abordagem é necessário considerar um conjunto de variações que dará origem a resultados e a análises totalmente distintos(as) para o problema a que se propõem, isto é, cada um deles poderá ter uma ou mais das seguintes características e classificações, nomeadamente, Modelos Determinísticos, Modelos Estocásticos, Modelos Estáticos e Modelos Dinâmicos [1].

A comparação entre as diversas classificações citadas anteriormente será realizada através da criação de dois grupos para que seja mais rápida e fácil a sua compreensão. Os Modelos Determinísticos e os Modelos Estocásticos formam o primeiro grupo e os Modelos Estáticos e os Modelos Dinâmicos formam o segundo grupo. Esta comparação, apesar de complexa, é fundamental para que seja possível perceber que, apesar de possuírem algumas características em comum, a sua implementação oferece um conjunto de soluções interessantes.

No caso do primeiro grupo, é possível afirmar que os modelos se distinguem entre si devido às assunções que são realizadas relativamente aos dados em análise. No documento [104] foi implementado um modelo estocástico com o intuito de analisar o comportamento das alterações das condições meteorológicas, de forma a obter essa informação com a antecedência suficiente para que os(as) agentes pudessem escolher a TMI adequada que conseguisse, da melhor forma possível, encontrar o equilíbrio entre a capacidade de determinada infraestrutura aeroportuária e a procura existente. Através deste modelo temporal foi possível descrever a variação das condições meteorológicas ao longo de diversos setores aéreos.

No caso do segundo grupo, é possível afirmar que os modelos se distinguem entre si devido ao tratamento efetuado às soluções obtidas pelos mesmos [22, 25, 97, 101, 102, 103, 104, 105, 106]. No documento [105] foi implementado um modelo dinâmico estocástico para contabilizar o número de aeronaves em cada um dos setores aéreos, considerando a variação desta quantidade de forma probabilística (recorrendo à Distribuição de Poisson), tanto no momento da entrada das aeronaves em cada setor aéreo como na deslocação das mesmas, tendo também em consideração as alterações que possam ocorrer a cada momento. Este modelo mostrou-se mais adequado para as maiores infraestruturas aeroportuárias, e para as respetivas TMAs, produzindo resultados mais precisos e fiáveis. Desta modelação foi possível verificar uma previsibilidade superior, sendo benéfica a sua implementação.

É então possível destacar dois dos modelos anteriormente citados como sendo aqueles que promovem os resultados mais realistas e promissores para a resolução de futuros problemas que possam surgir na gestão do fluxo de tráfego aéreo, nomeadamente, os Modelos Estocásticos e os Modelos Dinâmicos.

Por outro lado, é importante conhecer os pontos fortes e os fracos dos quatro modelos para que a sua seleção seja efetuada de forma ponderada e consciente. Nos Modelos Determinísticos destaca-se, positivamente, a capacidade da promoção de resultados interessantes no contexto do controlo de aeronaves a título individual e, em contrapartida, destaca-se, negativamente, o facto de não considerarem a existência de incertezas que poderão influenciar as soluções obtidas. Nos Modelos Estocásticos destaca-se, positivamente, a capacidade de promoção de resultados mais realistas e, em contrapartida, destaca-se, negativamente, a sua complexidade de aplicabilidade computacional. Nos Modelos Estáticos destaca-se, positivamente, a capacidade de antecipação de situações de contrangimento e, em contrapartida, destaca-se, negativamente, a incapacidade de reajuste em relação à realidade existente em cada momento.

Nos Modelos Dinâmicos destaca-se, positivamente, o seu carácter dinâmico e flexível e, em contrapartida, destaca-se, negativamente, a probabilidade da definição de medidas demasiado restritivas de acordo com a antecedência.

Independentemente das conclusões obtidas anteriormente, é importante ter em consideração que todos os modelos têm vantagens e desvantagens. Estas características benéficas e prejudiciais deverão ser analisadas quando se pretende aplicar a metodologia e/ou o método para lidar com determinada situação que afeta, de forma negativa, a gestão do fluxo de tráfego aéreo. Qualquer que seja o modelo selecionado para a utilização dos(as) agentes, é necessário realçar que estes deverão servir como apoio para a tomada de decisão, independentemente de a componente de automatização estar cada vez mais presente neste setor.

Os dois principais modelos pertencentes a esta abordagem denominam-se por Single-Airport Ground Holding Program (SAGHP) e Multi-Airport Ground Holding Program (MAGHP). Tal como o nome indica, estes modelos distinguem-se entre si devido ao facto do SAGHP ter em conta a definição de esperas no solo para apenas uma infraestrutura aeroportuária, enquanto que o MAGHP implementa as decisões para um conjunto de infraestruturas aeroportuárias.

No caso do SAGHP, a principal TMI implementada em conjunto com este modelo é a definição de um tempo de espera das aeronaves no solo, promovendo dessa forma uma poupança de custos ao evitar que as esperas se concretizem em voo [25, 77, 96, 101, 103, 106, 107, 108]. No documento [25] concluiu-se que todos os estudos desenvolvidos até ao momento afirmavam que o número de descolagens em um determinado momento não dependia diretamente do número de aterragens nessa mesma TMA. Esta assunção não corresponde à realidade das operações de tráfego existentes nas TMAs, o que faz com que este modelo não seja o mais adequado. No caso do MAGHP, este considera que a capacidade das infraestruturas aeroportuárias e do espaço aéreo é limitada, não levando em consideração a possibilidade de serem realizadas alterações nas rotas e/ou na velocidade dos voos [25, 77, 101, 103, 107, 108, 109].

Como não se pretende estudar apenas o impacto da escolha do período de tempo necessário para autorizar a descolagem de uma determinada aeronave, foram também estudados outros dois modelos, nomeadamente, o Air Traffic Flow Management Problem (ATFMP) que tem em especial atenção a determinação da velocidade ótima de cada aeronave consoante a capacidade existente em uma determinada infraestrutura aeroportuária, e o Air Traffic Flow Management Rerouting Problem (ATFMRP) que é uma "extensão" do ATFMP, tendo em consideração que será necessário alterar as rotas das aeronaves de acordo com as características existentes.

No caso do ATFMP, este tem como objetivo resolver problemas de forma mais realista, visto que analisa os problemas com maior grau de fiabilidade e sem ignorar a sua complexidade. Para além de utilizar dados reais e, dessa forma, promover resultados que vão de encontro aos problemas existentes, essas soluções são obtidas, em termos computacionais, muito rapidamente [25, 33, 77, 80, 101, 103, 107, 108, 109, 110].

No documento [101] foi implementado um modelo matemático, de forma a determinar o período de tempo necessário que cada aeronave deveria ser retida no solo ou em voo, garantindo a minimização dos custos totais suportados pela companhia de transporte aéreo.

No documento [25] foi possível perceber que a necessidade da criação deste modelo surgiu devido às diferenças entre o controlo do fluxo de tráfego aéreo americano e o europeu, visto que, no primeiro, o foco dos problemas devido ao congestionamento localizava-se quase exclusivamente nas infraestruturas aeroportuárias. Tendo em conta que o espaço aéreo europeu é constituído por inúmeros países e cada um deles possui legislação específica, acrescida da legislação emanada pela Agência Europeia para a Segurança da Aviação (AESA), designada em inglês por European Union Aviation Safety Agency (EASA), a mesma tarefa de controlo de tráfego aéreo torna-se muito mais complexa. Uma das principais diferenças em relação ao SAGHP e ao MAGHP, diz respeito ao facto do ATFMP ter em consideração a capacidade de cada setor aéreo, sabendo que o mesmo tem diversas limitações em cada momento. Relativamente à comparação iniciada, é possível também afirmar que este modelo é mais realista pelo facto de poder ser implementado no espaço aéreo europeu, indo de encontro ao que realmente acontece nesta região do Mundo.

No caso do ATFMRP, este representa uma melhoria do ATFMP, nomeadamente, no que diz respeito à introdução de uma medida corretiva que ajusta as rotas sempre que surge essa necessidade [25, 77, 101, 103, 107, 108, 109, 111]. No documento [101] foi implementado um modelo que permite efetuar um reajuste das rotas das aeronaves em situações inesperadas, como por exemplo, na verificação de setores aéreos congestionados devido a condições meteorológicas adversas. Até então estas alterações eram efetuadas tendo como base os conhecimentos e a experiência de alguns(mas) agentes, nomeadamente, os(as) controladores(as) de tráfego aéreo. De entre os três modelos apresentados anteriormente, é possível afirmar, sem qualquer dúvida, que o ATFMRP é o modelo cujos benefícios práticos obtidos são maiores, permitindo um(a) melhor controlo e gestão do fluxo de tráfego aéreo real.

3.1.4.2 Abordagem Baseada em Sistemas Multiagentes

Num ambiente onde se verificam as condições que proporcionam um normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, existem inúmeros(as) agentes que intervêm, de acordo com as suas competências e responsabilidades, para garantirem o cumprimento das operações estabelecidas sem colocarem em risco a sua segurança, assim como a dos(as) passageiros que transportam, e também tendo em atenção os custos de operação. Esses(as) agentes são agrupados(as) em dois conjuntos de acordo com a escala de intervenção, nomeadamente, micro e macro [10, 76, 112]. Os(as) agentes da escala micro são os seguintes, nomeadamente, controladores(as) e gestores(as) de tráfego aéreo, despachantes, pilotos e as aeronaves envolventes [18, 78, 84, 113].

É importante referir que os(as) agentes enunciados(as) anteriormente, devido às suas características intrínsecas e/ou limitações operacionais, não conseguiriam oferecer uma rápida e eficaz resposta, sem o apoio e a interação de outros(as) pertencentes à escala macro, nomeadamente, as companhias de transporte aéreo, o setor de transporte aéreo e as autoridades aeronáuticas (civis ou militares) [18, 78, 84, 113].

Independentemente das classificações definidas para efetuar uma rápida identificação dos(as) agentes envolvidos(as) na gestão do fluxo de tráfego aéreo, todos(as) trabalham em conjunto de forma a determinarem qual será a melhor abordagem para cada uma das situações que têm de enfrentar e de superar durante o cumprimento adequado das suas funções.

Tendo em conta o objetivo citado anteriormente e a interação já referida, esta abordagem é designada em inglês por Collaborative Decision Making (CDM), sendo muitas vezes denominada de forma a representar um "caminho" que permite atingir os "fins" desejados, isto é, uma forma de atingir o objetivo a que se aplica, nomeadamente, o equilíbrio entre a procura e a oferta do espaço aéreo e/ou das infraestruturas aeroportuárias [10, 26, 113, 114]. Os esforços implementados pelos(as) agentes permitem a determinação da existência de interligações entre as variáveis, sendo que, dessa forma, será mais fácil identificar padrões que, aliados aos dados recolhidos, permitirão antever, evitar e/ou minimizar as consequências da ocorrência de situações menos benéficas para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. É importante salientar que a avaliação adequada e precisa da implementação de medidas depende, diretamente, das capacidades cognitivas dos(as) agentes, assim como das suas competências e da sua experiência nas tarefas em que se encontram envolvidos(as).

Esta abordagem é muitas vezes denominada por "sistema" pelo facto de não considerar o impacto individual das ações tomadas por cada agente, recorrendo à análise generalizada, isto é, determinando o efeito promovido pela interação de todas as ações em situações de congestionamento e/ou inesperadas. Tal como qualquer outra abordagem, tem como pretensão promover o aumento ou a manutenção da eficiência existente no normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, assim como da segurança de todas as pessoas e bens.

Por outro lado, esta abordagem distingue-se da abordagem baseada em modelos estatísticos pelo facto de ser de extrema importância a interação entre os(as) agentes e ainda o facto de ser bastante óbvio que um(a) agente é incapaz de controlar e gerir todo o processo, necessitando de recorrer a outros(as), possuindo cada um(a) deles(as) um leque alargado de conhecimentos especializados que funcionarão em prol de um objetivo comum.

Apesar da definição expressa anteriormente é importante enunciar os dois tipos de CDM, consoante as características que serão listadas de seguida, encontrando-se seguidamente apresentados por ordem alfabética, nomeadamente [10]:

- **Alinhamento**: Este tipo de colaboração especifica se os trabalhos desenvolvidos se focam num objetivo comum ou individual para cada agente. Devido a esta característica podem surgir dois tipos de situações, nomeadamente:
    - Complementaridade: Os(as) agentes esforçam-se em prol de um objetivo comum;
    - Adversidade: Cada agente terá o seu objetivo individual, o que poderá dar origem à ocorrência de conflitos com os(as) demais, caso o objetivo de um(a) deles(as) prejudique a intenção de outro(a).
- **Tomada de Decisão**: Este tipo de colaboração especifica se a tomada de decisão é efetuada por um(a) ou mais agentes envolvidos(as) na operação em análise, tendo em conta que apesar da decisão ser tomada por apenas um(a), esta terá uma consequência direta, seja ela positiva ou negativa, no trabalho de outros(as).

A criação de metodologias e/ou ferramentas eficientes é fundamental, visto que a capacidade de trabalho suportada pelo Ser Humano é limitada e os(as) agentes envolvidos(as) em todos os processos relativos à gestão do fluxo de tráfego aéreo estão cada vez mais sobrecarregados(as) e, consequentemente, poderão colocar em causa a segurança. No limite, se esta tarefa depender única e exclusivamente do Ser Humano, será imprescindível aumentar exponencial e rapidamente os recursos humanos envolvidos e, apesar do setor crescer, o investimento económico promoverá um retrocesso nas expectativas lucrativas das empresas envolvidas.

Por outro lado, independentemente das medidas estudadas, desenvolvidas e implementadas demonstrarem um carácter benéfico e assegurarem o cumprimento de inúmeras metas operacionais, assim como uma melhoria significativa da gestão do fluxo de tráfego aéreo, o sucesso destas encontra-se sujeito à "aprovação" dos(as) agentes visto que não existem modelos, técnicas, sistemas, ferramentas e/ou tecnologias perfeitos(as) mas sim adequados(as) para o trabalho em conjunto com o Ser Humano.

De forma generalizada, é possível organizar quatro conjuntos de TMIs que têm como objetivo agruparem os métodos e as metodologias que são, de alguma forma, semelhantes e/ou que se interligam na sua implementação em contexto real, nomeadamente, as medidas, os programas computacionais, os projetos e os sistemas. De acordo com o nível de abrangência de cada um destes conjuntos, os mesmos podem ser classificados como micro e macro, em termos de escala.

No caso da escala micro são analisados os interesses individuais de cada agente e, em contrapartida, no caso da escala macro, são analisados os interesses em comum dos(as) agentes envolvidos(as) nos processos em análise. É importante referir que apesar das características que distinguem os dois tipos de escalas, ambas são igualmente imprescindíveis para uma correta compreensão do verdadeiro funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Isto significa que nenhuma delas deverá ser menosprezada e/ou descartada, independentemente da situação em análise, correndo o risco de se perder informação importante para a tomada de decisão.

É importante também referir que entre todos estes grupos existem algumas semelhanças, nomeadamente, os benefícios da implementação de métodos e metodologias baseados(as) em sistemas multiagentes, nomeadamente [79, 86]:

- A sua implementação possui uma boa relação entre o custo e o benefício, sendo pouco dispendiosa, comparativamente aos resultados promovidos;
- Produzem resultados bastante interessantes para os problemas identificados com um elevado nível de complexidade;
- Têm a capacidade de fornecer uma resposta adequada em situações inesperadas devido a alterações repentinas das condições existentes previamente;
- Conseguem "descomplicar" problemas extremamente complexos porque envolvem inúmeros(as) agentes com conhecimentos e/ou experiências alargados(as);
- A distribuição do problema por várias(os) etapas e agentes permite atingir resultados com um maior grau de satisfação;
- Os resultados obtidos pelos(as) agentes envolvidos(as) em cada situação são alcançados muito mais rapidamente do que se determinado problema fosse solucionado por apenas um(a) agente.

Independentemente das constantes evoluções de metodologias e/ou ferramentas que albergam cada vez mais agentes que influenciam, direta ou indiretamente, o funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, é importante evidenciar as limitações comuns a todas elas e que servem, de certa forma, como estímulo para a aprendizagem e análise, encontrando-se seguidamente apresentadas por ordem alfabética, nomeadamente [85]:

- **Alterações Constantes**: Tendo em conta o aspeto dinâmico do fluxo de tráfego aéreo é importante estar consciente, em tempo real, das condições existentes de forma a adaptar não só as metodologias como as ferramentas utilizadas;
- **Complexidade**: Esta complexidade é devida não só à quantidade de agentes envolvidos(as) como também à extensão de áreas, terrestres e aéreas, em que ocorrem as operações de tráfego aéreo, e a quantidade de variáveis que podem, de alguma forma, afetar o normal funcionamento das mesmas. Por este motivo, é necessário desenvolver um trabalho detalhado e exaustivo para que nenhum detalhe seja ignorado;
- **Coordenação e Entendimento**: É necessário existir uma constante coordenação entre as medidas e os(as) agentes porque, apesar de cada um(a) deles(as) definir os seus objetivos a curto prazo, todos(as) têm o objetivo comum de promoverem uma operação mais facilitada e segura para as aeronaves;
- **Excesso de Informação**: Os(as) agentes lidam diariamente com uma elevada quantidade de dados provenientes de diversas fontes e que devem ser cuidadosamente analisados antes da tomada de qualquer decisão;

- **Incertezas**: De acordo com o dinamismo existente no setor, existe um vasto conjunto de incertezas que podem, a qualquer momento, colocar em causa as medidas tomadas no instante imediatamente anterior, sendo por isso necessário estar alerta para saber lidar com qualquer imprevisto;
- **Obtenção de Dados**: Tendo em conta a importância das medidas tomadas, estas devem ser realizadas através da análise de informações detalhadas e fiáveis, facto este que nem sempre é fácil de verificar devido ao vasto conjunto de fontes e aos meios computacionais de processamento das mesmas.

3.2 Medidas

Tendo em conta o objetivo a que se propõem as abordagens analisadas ao longo das últimas décadas, o leque de medidas existentes para atingirem esse fim tem vindo a aumentar devido ao vasto empenho dos(as) estudiosos(as). Apesar das suas especificidades e da sua relevância que requer a análise cuidadosa de cada situação, é importante listar e apresentar as principais medidas utilizadas até ao momento, distinguindo o seu propósito, a sua implementação e as limitações detetadas, facilitando dessa forma a escolha por parte dos(as) agentes. Antes de cada uma dessas medidas ser detalhada é necessário recorrer a uma classificação intermédia, de forma a apresentar os diferentes tipos de medidas usuais, nomeadamente:

- **Macro**: Apesar de serem medidas operacionais, são conhecidas como programas de gestão de fluxo de tráfego aéreo que se interligam em diversas fases de voo e onde intervém um alargado número de agentes. Este conjunto de medidas são denominadas exclusivamente como programas que geram diferente medidas;
- **Micro**: Advêm, na grande maioria das vezes, da análise das medidas macro, sendo adequadas para situações de carácter específico e, por esse facto, é fundamental a sua compreensão para uma adequada implementação no contexto real. Este conjunto de medidas são denominadas como, gestão da relação entre a procura e a oferta numa infraestrutura aeroportuária, gestão da separação entre as aeronaves nas diversas fases de voo, gestão de rotas de aeronaves, gestão dos níveis de voo nas diversas fases de voo e gestão temporal das operações das aeronaves.

Apesar da distinção apresentada anteriormente, e tendo em conta a interligação inerente a estas classificações, existe uma forte complementaridade entre as medidas macro e as medidas micro, devido aos objetivos comuns que partilham entre si e às metodologias de implementação que acabam por recorrer a diversas medidas que potenciam a obtenção do resultado pretendido.

3.2.1 Programas que Geram Diferentes Medidas

Na Tabela 3.1 encontra-se um breve resumo de cada medida macro que se refere diretamente aos programas que geram diferentes medidas e, seguidamente, serão detalhadas de forma pormenorizada, definindo-as e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas limitações.

Tabela 3.1 – Medidas Macro – Programas que Geram Diferentes Medidas

Medidas		Resumo
Sigla	Significado	
AFP	Airspace Flow Program	Implementado apenas para aeronaves que se encontram em rota.
GDP	Ground Delay Program	Implementado apenas para aeronaves que se encontram em solo.

3.2.1.1 AFP

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [25], [43], [45], [57], [59], [76], [77], [78], [87], [93], [103], [107], [116], [117], [118], [119], [120], [121], [122] e [123].

O AFP é uma ferramenta muito importante para a gestão do fluxo de tráfego aéreo que se encontra em rota, não sendo adequado para as fases da descolagem e da aterragem, sendo que tem como particularidade ser bastante útil em situações onde se verificam condições meteorológicas severas e/ou situações em que exista uma procura acima da média para uma determinada TMA.

O seu princípio de funcionamento baseia-se na correta identificação de constrangimentos ao longo de cada rota, assim como a identificação do conjunto de aeronaves que poderá ser afetado pelos mesmos e a definição de novos tempos que autorizem as descolagens, sendo esta ação designada em inglês por Expect Departure Clearance Time (EDCT), com o intuito de auxiliar na gestão do desequilíbrio entre a procura e a utilização da região do espaço aéreo afetado. Ao contrário da implementação do GDP, o AFP pode ser aplicado a aeronaves que tenham como destino diferentes infraestruturas aeroportuárias.

No documento [117] foi implementada uma ferramenta que permite efetuar um controlo mais adequado do fluxo de tráfego aéreo por todo o espaço aéreo. Esta ferramenta é denominada por Módulo de Balanceamento de Fluxo (MBF) e tem como intenção encontrar um equilíbrio entre a procura e a capacidade do espaço aéreo. Este módulo é constituído por dois submódulos, sendo que cada um deles possui uma tarefa distinta, nomeadamente:

- **Submódulo de Construção de Grafos**: Permite criar grafos de acordo com a situação atual dos setores aéreos e das rotas atribuídas às aeronaves;

- **Submódulo de Análise de Fluxos**: Permite a distribuição do fluxo de tráfego aéreo, de acordo com a capacidade dos setores aéreos e consequentes ajustes efetuados nas rotas das aeronaves. Esta tarefa é conseguida através da implementação de dois algoritmos, nomeadamente:
    - Ajuste da Ocupação: Conhecendo as rotas existentes e a ordem de aterragem das aeronaves é possível organizar a sua entrada ou a sua saída em cada setor aéreo;
    - Edmonds-Karp: Permite analisar as rotas com maior procura, ajustando assim o desequilíbrio iminente e atribuindo novas rotas às restantes aeronaves.

Quando a previsão de ocupação de um ou mais setores aéreos se encontra próxima do limite máximo de 80%, o modelo inicia o processo de distribuição deste mesmo fluxo através da imposição de TMIs que permitirão a diminuição do fluxo de tráfego aéreo para os setores aéreos em análise, sendo que essas medidas serão desfeitas após a obtenção do equilíbrio desejado.

Para além da definição da TMI, o modelo respeita ainda duas políticas de distribuição do fluxo de tráfego aéreo, sendo uma delas priorizada e a outra igualitária. A política igualitária tem como objetivo efetuar uma divisão mais justa das folgas atribuídas aos setores aéreos e, apesar de ser a mais justa, não é a que melhor representa a situação real vivida no fluxo de tráfego aéreo, sendo importante analisar a implementação da política priorizada.

A simulação foi efetuada para duas situações, nomeadamente, num dia de elevado fluxo de tráfego aéreo e num dia de reduzido fluxo de tráfego aéreo, de forma a comprovar qual das políticas produziria melhores resultados. Tal como se previa, verificou-se que a implementação da política priorizada permitiu um melhor controlo do fluxo de tráfego aéreo, tendo sido definidos atrasos nas descolagens de algumas aeronaves de forma a evitar situações de congestionamento. Apesar da política igualitária possuir um princípio interessante, a verdade é que a sua implementação faz com que o fluxo de tráfego aéreo seja maior do que aquele que na realidade é suportado, tanto pelos setores aéreos como pelas infraestruturas aeroportuárias.

No documento [118] os autores focaram os seus esforços na criação de um modelo que promovesse a antecipação da contabilização dos custos acarretados pelas companhias de transporte aéreo e que eram derivados das decisões implícitas pelo AFP. Para a obtenção de um modelo detalhado, foi definido um conjunto de dezassete funções associadas a diferentes tipos de custos decorrentes do atraso de uma única aeronave, sendo que através da utilização dessas funções seria possível quantificar o impacto económico de algumas situações bastante relevantes no dia a dia do setor, como por exemplo, o custo da ocorrência de atrasos em voos de ligação em determinados *hubs* e até mesmo o custo do atraso por passageiro(a).

Como a própria definição refere, o objetivo implícito a este modelo prende-se à minimização dos custos explicitados em cada uma das funções, e este objetivo poderia ser atingido após a correta identificação de quais seriam as funções de custos mais consistentes e que promoviam um maior impacto no custo total de operação de uma companhia de transporte aéreo.

Assim sendo, é possível afirmar que os custos associados a ligações entre as aeronaves e/ou a infraestruturas aeroportuárias promovem o aumento da propagação do atraso e dos custos associados.

A partir da análise das implementações práticas enunciadas anteriormente é possível destacar, negativamente, que caso seja aplicada a política de priorização a duas ou mais aeronaves que se relacionam entre si, a probabilidade de ocorrência de congestionamentos será maior, principalmente se essas aeronaves se intersetarem em um único setor aéreo.

3.2.1.2 GDP

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [10], [25], [32], [34], [36], [37], [40], [43], [45], [46], [49], [57], [59], [60], [64], [76], [77], [78], [82], [83], [93], [94], [97], [98], [102], [103], [106], [107], [108], [116], [119], [120], [121], [123], [124], [125], [126], [127], [128], [129], [130], [131], [132], [133], [134], [135] e [136].

O GDP é uma técnica que consiste no atraso da descolagem de uma determinada aeronave, de forma a gerir a procura e, subsequentemente, a capacidade da infraestrutura aeroportuária de destino. Normalmente, a sua aplicação deve-se a situações inesperadas, nomeadamente, à verificação de condições meteorológicas adversas que afetam negativamente a infraestrutura aeroportuária de destino, isto é, reduzindo a capacidade da mesma; ou então devido ao excesso de procura em períodos de pico que se registam ao longo do dia e/ou em épocas específicas.

A aplicação desta medida evita as esperas das aeronaves nas TMAs ou a decisão, num curto espaço de tempo, que obrigará a que as mesmas divirjam para outras infraestruturas aeroportuárias, trazendo não só prejuízo para as companhias de transporte aéreo como também para os(as) clientes.

Tendo em conta as situações existentes na infraestrutura aeroportuária de destino, o atraso atribuído a cada aeronave poderá atingir, no limite, algumas horas, revelando-se numa situação bastante complexa e difícil de ser ultrapassada.

Existem dois tipos de GDP, nomeadamente, o Delay Assignment (DA) e o General Aviation Airport Program (GAAP). Para além desta classificação, é possível efetuar duas formas de atribuição de espera, dependendo do momento em que é implementado, nomeadamente:

- **GDP Estático:** A tomada de decisão e o estabelecimento dos tempos de atraso para cada aeronave são definidos no início do dia, antes do início das operações de tráfego aéreo;
- **GDP Dinâmico:** A medida é estabelecida ao longo do dia, tendo os(as) agentes acesso a toda a informação necessária para que a sua implementação seja adequada à operação existente.

No documento [124] foi desenvolvida uma metodologia para tentar determinar uma forma de controlar a implementação desta medida, tendo como principais interessados(as) no sucesso da mesma os(as) controladores(as) de tráfego aéreo, as companhias de transporte aéreo e as infraestruturas aeroportuárias. Em primeiro lugar, foram definidas as restrições impostas por cada agente, encontrando-se seguidamente apresentadas por ordem alfabética, nomeadamente:

- **Companhia de Transporte Aéreo:** Este(a) agente pretende que, independentemente da implementação de qualquer TMI, a ordem do fluxo de tráfego aéreo seja respeitada, sendo importante analisar o impacto do atraso de determinada aeronave nas restantes, assim como os custos que acarretam estes atrasos;
- **Controlador(a) de Tráfego Aéreo:** Um dos parâmetros que merece grande parte da atenção deste(a) agente é o grau de severidade do congestionamento assim como o cálculo dos atrasos de cada aeronave em solo;
- **Infraestrutura Aeroportuária:** É importante analisar a capacidade disponível em cada infraestrutura aeroportuária, de forma a permitir ou não a manutenção das aeronaves em solo para além do tempo previamente estipulado da sua operação.

O modelo em causa, denominado como *satisficing*, tem como objetivo definir a implementação da TMI caso as condições impostas pelos(as) agentes sejam cumpridas, analisando um vasto conjunto de dados, nomeadamente, a sua rejeitabilidade ou seletibilidade.

Para a criação deste modelo foram definidos algoritmos adequados aos(às) agentes em análise, permitindo determinar em que situações um(a) deles(as) poderia ou não rejeitar os atrasos atribuídos ao fluxo de tráfego aéreo, encontrando-se seguidamente apresentados, os raciocínios que deram origem a cada equação, por ordem alfabética, nomeadamente:

- **Companhia de Transporte Aéreo:** A rejeitabilidade da distribuição dos atrasos relaciona-se diretamente com a aplicação de uma política igualitária de distribuição desse GDP logo, quanto maior for o desequilíbrio existente, maior será a rejeitablidade;
- **Controlador(a) de Tráfego Aéreo:** Quanto maior for a variação de GDP atribuído, maior será a rejeitabilidade;
- **Infraestrutura Aeroportuária:** A rejeitabilidade da aplicação de GDP varia de acordo com a quantidade de passageiros(as) acumulados(as) no respetivo terminal e as suas dimensões logo, quanto maior for a sobrecarga de passageiros(as) no terminal, maior será a rejeitabilidade.

De acordo com a aceitação ou não de atrasos para cada aeronave por parte dos(as) agentes, é possível sequenciar as descolagens, obtendo o menor impacto negativo possível no normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo e nos interesses individuais de cada agente.

A simulação foi efetuada para duas situações em particular, isto é, para o fluxo de tráfego aéreo elevado e para o fluxo de tráfego aéreo reduzido, sendo facilmente percetível que os atrasos obtiveram uma maior taxa de rejeitabilidade em situações de fluxo de tráfego aéreo reduzido, visto que as situações de congestionamento não se verificaram e a capacidade das TMAs não se encontrava próxima do seu limite máximo, sendo que dessa forma os(as) agentes seriam capazes de lidar com a procura existente.

No documento [128] foi realizada uma comparação entre três algoritmos, de forma a ser verificado o seu impacto para o atraso de determinadas aeronaves, nomeadamente:

- **Ration By Schedule (RBS):** Atribui os *slots* de acordo com o tempo de espera de cada aeronave, isto é, o primeiro *slot* disponível será alocado à aeronave que se encontra em espera no solo há mais tempo;
- **Ration By Aircraft Size (RBAc):** Atribui os *slots* de acordo com o tamanho da aeronave, classificando-as em *Heavy*, *Large* e *Small*, sendo que as *Heavy* têm prioridade na alocação dos *slots*. Salienta-se que, dentro de cada classificação é utilizado o algoritmo RBS para permitir a organização das aeronaves;
- **Ration By Passengers (RBPax):** Atribui os *slots* de acordo com a quantidade de passageiros(as) transportados(as) em cada aeronave, isto é, a aeronave que tiver a maior lotação terá prioridade na alocação do primeiro *slot* disponível. Caso existam duas ou mais aeronaves com a mesma quantidade de passageiros(as), será utilizado o algoritmo RBS para "desempatar" e auxiliar na atribuição do *slot*.

De entre os três algoritmos apresentados anteriormente, foi possível verificar que o RBPax produziu um menor atraso para os(as) passageiros(as), alcançando uma redução de 60% comparativamente ao RBS. Apesar do RBAc promover resultados inferiores ao RBPax, o mesmo conseguiu reduzir os atrasos em 32%, quando comparado com o RBS. É importante salientar que entre o RBPax e o RBAc, seria preferível a aplicação do RBPax, tendo em conta a redução significativa dos atrasos que foi obtida na comparação com o RBS. Este facto não se verifica devido às características físicas das aeronaves, visto que é importante dar prioridade às aeronaves de maior porte, pelo facto de as mesmas representarem, na grande maioria das vezes, voos de longo curso que se dirigem para grandes *hubs* onde ocorrerá a transferência de passageiros(as), carga e/ou correio para outras aeronaves.

Esta medida destaca-se das demais, tendo em conta não só os resultados promissores dos estudos desenvolvidos e citados anteriormente, como também devido à sua eficiência, tanto ao nível da segurança operacional como ao económico. A partir da análise das implementações práticas enunciadas anteriormente é possível destacar, negativamente, que esta medida só pode ser aplicada a aeronaves que têm como destino a mesma infraestrutura aeroportuária, ao contrário do AFP e, por outro lado, só pode ser implementada quando as aeronaves se encontram no solo, independentemente da antecedência com que seja definida.

Adicionalmente é aconselhável a utilização simultânea do GDP, de forma constante, por alguns(as) agentes que possam rever a sua utilização, sempre que se justifique.

3.2.2 Gestão da Relação entre a Procura e a Oferta numa Infraestrutura Aeroportuária

Na Tabela 3.2 encontra-se um breve resumo de cada medida micro que se refere diretamente à gestão da relação entre a procura e a oferta em uma determinada infraestrutura aeroportuária e, seguidamente, serão detalhadas de forma pormenorizada, definindo-as e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas limitações.

Tabela 3.2 – Medidas Micro – Gestão da Relação entre a Procura e a Oferta numa Infraestrutura Aeroportuária

Medidas		Resumo
Sigla	Significado	
AAR	Airport Acceptance Rate	Definição da quantidade aceitável de aeronaves em determinado momento, de acordo com a capacidade da infraestrutura aeroportuária.
AC	Adaptive Compression	Atribuição dos *slots* procurando encontrar um equilíbrio entre a procura e a oferta existente.
ADL	Aggregate Demand List	Organização das aeronaves que aterram e/ou descolam em/de uma infraestrutura aeroportuária de acordo com as suas características.
TBFM	Time-Based Flow Management	Ajuste constante das rotas das aeronaves de forma a ir de encontro à realidade existente.

3.2.2.1 AAR

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [10], [41], [42], [76], [93], [137], [138] e [139].

A AAR permite estabelecer o número limite de aeronaves que será aceite por cada infraestrutura aeroportuária durante uma hora. Este valor é estipulado através de um conjunto de dados diretamente relacionados com a infraestrutura aeroportuária, e a respetiva TMA, assim como a outras limitações externas ao controlo de grande parte dos(as) agentes, nomeadamente, as condições meteorológicas e/ou a navegação.

No documento [41] os autores criaram e implementaram um modelo designado em inglês por Integrated Airport Capacity Model (IACM), numa das infraestruturas aeroportuárias americanas mais movimentadas, tendo em especial atenção a relação direta entre a sua capacidade e as condições meteorológicas existentes.

Este modelo tinha como intenção a obtenção da otimização da capacidade das infraestruturas aeroportuárias, adequando-se às restrições impostas pelas alterações climáticas e tentando lidar, da melhor forma possível, com as incertezas inerentes às operações aéreas. Através da comparação entre os dados reais e as previsões obtidas pelo modelo foi possível verificar uma melhoria significativa da utilização da capacidade da infraestrutura aeroportuária, sendo importante efetuar as seguintes ressalvas, nomeadamente:

- O *layout* da infraestrutura aeroportuária é de extrema importância para o sucesso dos resultados, isto é, o número de pistas e a distinção entre as pistas de aterragem e as de descolagem. De forma a maximizar a capacidade da infraestrutura aeroportuária é desejável que a mesma possua pistas alocadas exclusivamente à aterragem e à descolagem, sendo que a sua partilha para os dois eventos deverá ocorrer apenas em situações de congestionamento;
- À medida que a procura se aproxima do limite máximo da capacidade da infraestrutura aeroportuária, melhores serão os resultados obtidos através da utilização deste modelo.

Através do estudo desenvolvido foi possível verificar que a utilização do modelo promovia uma previsão bastante fidedigna do número de aterragens, de acordo com a capacidade existente em determinada infraestrutura aeroportuária. Para além da fiabilidade da previsão obtida é importante salientar que a mesma se verifica para três tipos de voos, nomeadamente, condições meteorológicas por instrumentos designado em inglês por Instrument Meteorological Conditions (IMC), condições meteorológicas visuais marginais designado em inglês por Marginal Visual Meteorological Conditions (MVMC) e condições meteorológicas visuais designado em inglês por Visual Meteorological Conditions (VMC).

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que um dos principais fatores que coloca em causa esta medida são as condições meteorológicas adversas e/ou as restrições operacionais que afetam a utilização das pistas e a velocidade das aeronaves durante a sua aproximação. Por outro lado, em períodos de tempo muito curtos, a determinação desta medida torna-se uma tarefa muito complexa devido à extensa variedade de fatores que podem influenciar este valor.

3.2.2.2 AC

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [76], [91], [93] e [127].

A AC é bastante útil para garantir que todos os *slots* estão adequadamente atribuídos às aeronaves que pretendem aterrar numa determinada infraestrutura aeroportuária, aumentando dessa forma a sua capacidade, controlando as restrições existentes em cada momento e diminuindo a carga de trabalho de alguns(mas) agentes, nomeadamente, os(as) controladores(as) de tráfego aéreo.

No documento [91] os autores desenvolveram um modelo para solucionar o problema da atribuição de *slots* nas infraestruturas aeroportuárias em situações onde o nível de congestionamento é preocupante. Para a criação deste modelo foi necessário ter em conta dois tipos de restrições, nomeadamente, as autorizações para as descolagens e para as aterragens em determinadas infraestruturas aeroportuárias e as autorizações para a entrada e para a saída em determinados setores aéreos. Estes critérios foram respeitados durante toda a simulação, definindo os períodos temporais em que cada aeronave poderia descolar da infraestrutura aeroportuária e atribuindo os atrasos necessários em situações de congestionamento em determinados setores aéreos.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que tendo apenas em consideração as restrições de capacidade, os atrasos definidos acabam por ser igualmente distribuídos por todas as aeronaves.

3.2.2.3 ADL

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [13], [76] e [93].

A ADL é uma ferramenta que organiza a procura por parte das aeronaves em formato de lista, sofrendo alterações em curtos períodos de tempo de forma a auxiliar na gestão do fluxo de tráfego aéreo de cada TMA.

No documento [13] os autores elaboraram um estudo tendo como fator chave a existência de voos prioritários, criando dessa forma uma sequência organizada para as aterragens e para as descolagens em diversas infraestruturas aeroportuárias. De forma geral, é possível afirmar que a organização da procura permite uma melhor gestão do fluxo de tráfego aéreo e, consequentemente, uma redução dos atrasos e dos custos provenientes das alterações do normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. Desta forma, o estudo desenvolvido teve como intenção organizar uma sequência lógica entre as aeronaves, respeitando o seu grau de prioridade, mas de forma a que as aeronaves com menor grau de prioridade não fossem prejudicadas, atrasando a sua operação de forma excessiva.

Até à implementação deste modelo era respeitado o algoritmo designado em inglês por First Come, First Serve (FCFS), que apesar de ter um propósito interessante, tratando as aeronaves de igual forma e respeitando os planeamentos de cada operação, não tem em conta o dinamismo existente de forma constante, acarretando atrasos e, acima de tudo, prejuízos financeiros.

Assume-se por isso dois tipos de voos, os que voam de ou para um *hub* e os que fazem um voo de ponto a ponto, sendo que os primeiros, como seria de prever, possuem ligações com outros(as) voos e agentes, podendo a interrupção da sua normal operação originar um maior impacto negativo. Por este facto, este tipo de voos tem um carácter prioritário.

O modelo criado foi constituído por dois objetivos já expressos de forma indireta, a minimização do tempo total de espera e a minimização do tempo máximo de espera. A implementação deste modelo permitiu não só priorizar determinados voos, como também aliviar a procura de várias infraestruturas aeroportuárias, demonstrando que com a sua utilização a percentagem de atrasos seria reduzida, assim como dos custos provenientes dos mesmos.

Consequentemente, foi possível verificar que apenas uma pequena percentagem dos atrasos foi alocada a aeronaves que se deslocavam em direção a um *hub* ou que descolavam do mesmo, de modo a reduzir o impacto negativo desses mesmos atrasos, não só para a aeronave em estudo como também para as demais. Nesse sentido é possível efetuar uma fácil comparação entre dois algoritmos e a otimização obtida com a implementação do modelo criado, nomeadamente:

- **OutOnly:** É um algoritmo bastante semelhante ao FCFS, organizando as aeronaves consoante o seu tempo de aterragem em uma determinada infraestrutura aeroportuária;
- **MainHigher:** É um algoritmo que tenta encontrar o equilíbrio entre o FCFS e as situações de exceção, tentando priorizar as aeronaves que se destinam a *hubs*, apesar de não atribuir diferentes níveis de prioridade como seria desejável.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que caso uma determinada infraestrutura aeroportuária congestionada receba demasiadas aeronaves de carácter prioritário num curto espaço de tempo, esta situação acabará por originar atrasos excessivos sem qualquer grau de prioridade, modificando de forma significativa o fluxo de tráfego aéreo.

3.2.2.4 TBFM

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [42], [76], [129], [140], [141], [142], [143] e [144].

O TBFM é um método utilizado para ajustar a capacidade, controlando os desequilíbrios entre a procura e a oferta em determinadas TMAs. A sua metodologia baseia-se na planificação das rotas das aeronaves ao longo dos seus voos, analisando previamente a procura existente para cada uma das infraestruturas aeroportuárias e, dessa forma, controlando o horário de aterragem de cada aeronave, sendo aplicável para uma gestão tática da capacidade e auxiliando no planeamento eficiente da definição de trajetórias em rota. Assim sendo, é possível afirmar que o principal objetivo deste método é a maximização da utilização dos recursos disponíveis para a gestão do fluxo de tráfego aéreo, depositando especial atenção na minimização dos atrasos imputados e nas variáveis que poderão, de alguma forma, interromper o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, assim como as consequências da não concretização de outros objetivos fundamentais para o desenvolvimento deste setor, nomeadamente, a redução da queima de combustível e a emissão de gases poluentes, assim como a redução dos custos operacionais.

A sua criação surgiu através dos conhecimentos e das experiências obtidos(as) após a implementação de outra medida, designada em inglês por Traffic Management Advisor (TMA), demonstrando que esta medida era demasiado restritiva para a realidade existente nas operações de tráfego aéreo.

No documento [129] foi elaborado um estudo com o intuito de analisar o impacto individual de algumas TMIs, nomeadamente, o TBFM assim como a modelação da interação entre diversas medidas. Um dos casos de estudo utilizado consistiu na análise da probabilidade da falta de controlo das operações ou do seu excesso quando o TBFM é utilizado de forma individual. Um dos parâmetros que mereceu especial atenção foi a forma de resposta desta medida à existência de desvios à normal operação, as denominadas incertezas.

Através da modelação efetuada foi possível determinar qual seria a probabilidade de atraso de aterragem das aeronaves nas infraestruturas aeroportuárias, tendo em consideração as restrições de capacidade. Os resultados foram bastante satisfatórios, tendo em conta que a probabilidade da ocorrência de um atraso superior a cinco minutos foi bastante reduzida.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que apesar de ser uma medida bastante interessante, a correlação existente entre os diversos fatores intrínsecos à operação e ao normal funcionamento das TMAs dificulta a obtenção de uma previsão precisa da capacidade de cada uma delas ao longo do tempo.

3.2.3 Gestão da Separação entre Aeronaves nas Diversas Fases de Voo

Na Tabela 3.3 encontra-se um breve resumo de cada medida micro que se refere diretamente à gestão da separação entre aeronaves nas diversas fases de voo e, seguidamente, serão detalhadas de forma pormenorizada, definindo-as e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas limitações.

Tabela 3.3 – Medidas Micro – Gestão da Separação entre Aeronaves nas Diversas Fases de Voo

Medidas		Resumo
Sigla	Significado	
MINIT	Minutes-In-Train	Separação entre duas ou mais aeronaves recorrendo a uma medida temporal, os minutos.
MIT	Miles-In-Train	Separação entre duas ou mais aeronaves recorrendo a uma medida de comprimento, as milhas.

3.2.3.1 MINIT

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [10], [36], [38], [43], [76], [88], [93], [98], [105], [127] e [134].

O MINIT é um parâmetro de medida que define o número de minutos necessários que deverão separar duas ou mais aeronaves sucessivas, sendo que a sua aplicação é mais comum em vastas extensões oceânicas que não estão cobertas pelo funcionamento dos radares que auxiliam as suas operações e/ou em regiões em que ocorre a transição entre locais cobertos e não cobertos pelo funcionamento dos radares.

No documento [43] os autores criaram um modelo através da implementação desta medida de forma a otimizar a gestão do fluxo de tráfego aéreo numa região contendo os dois maiores problemas em análise, nomeadamente, o congestionamento e as alterações inesperadas das condições meteorológicas. O modelo, designado em inglês por Probabilistic Collocation Model (PCM), foi criado de forma a prever inúmeras condições meteorológicas e a medida adequada para lidar com cada uma dessas previsões, focando-se em dois cenários. Através da obtenção destas previsões foi possível estipular o MINIT adequado de forma a assegurar a segurança de todos(as) e o controlo e/ou a diminuição dos custos operacionais.

A componente económica é de elevada relevância, visto que em condições normais, sem qualquer previsão, as aeronaves seriam obrigadas a alterarem as suas rotas, acarretando essa decisão inúmeras alterações e um impacto económico significativo para as companhias de transporte aéreo. Por esse motivo, é fundamental a correta determinação dos custos operacionais associados a constrangimentos de controlo e de gestão, designados em inglês por Management-Induced Backlog (B_m) e por Weather-Induced Backlog (B_w), respetivamente.

Após a implementação do modelo foi possível obter uma redução de custos de aproximadamente 40% a 60%, consoante o cenário em análise.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que existem dois momentos críticos, nomeadamente, durante o sequenciamento de aproximação e nas descolagens ou nas aterragens das/nas infraestruturas aeroportuárias, sendo ocasiões cuja aplicação desta TMI não é adequada. Por outro lado, os modelos são demasiado abstratos, não caracterizando a realidade operacional a um nível detalhado, podendo ser suscetíveis à obtenção de informações incorretas. Quando é possível a implementação do GDP, essa medida terá um carácter preferencial, comparativamente à MINIT.

3.2.3.2 MIT

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [10], [18], [36], [38], [40], [43], [44], [58], [69], [74], [76], [77], [79], [83], [88], [93], [98], [105], [106], [120], [127], [130], [133], [134], [136], [141], [145], [146], [147], [148], [149], [150] e [151].

O MIT é um parâmetro de medida que define o número de milhas necessárias que deverão separar duas ou mais aeronaves que têm como ponto de origem a mesma infraestrutura aeroportuária e que possuem rotas definidas, podendo estas ser semelhantes ou até mesmo coincidentes em determinado "ponto" no espaço aéreo.

Por outro lado, este parâmetro é utilizado como uma ferramenta útil para gerir o fluxo de tráfego aéreo, pelo facto de ter a capacidade de reparti-lo por "camadas", consoante as características existentes, assim como proporcionar um espaço aéreo adicional que permitirá a entrada, circulação ou saída de outras aeronaves não pertencentes ao fluxo de tráfego aéreo inicial.

Esta ferramenta é crucial em situações de perigo iminente, como por exemplo, durante a ocorrência de períodos meteorológicos desfavoráveis e/ou propícios para a diminuição da eficiência e/ou da segurança das operações de tráfego aéreo em que esta separação entre as aeronaves deverá sofrer um aumento para salvaguardar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Como seria expectável, a implementação desta medida, variando a separação mínima entre as aeronaves consoante as situações específicas verificadas em cada momento, dará origem a atrasos que poderão propagar-se durante algumas horas. Quanto maior for o MIT atribuído, maior será a facilidade para lidar com o congestionamento existente e, dessa forma, reduzi-lo.

No documento [18] foi implementado um modelo com o intuito de analisar o comportamento do fluxo de tráfego aéreo numa determinada TMA e a capacidade da mesma, tendo como restrição base a separação mínima entre duas ou mais aeronaves. Como tal, foram simulados três cenários que diferiam entre si relativamente ao grau de congestionamento existente. Concluiu-se, dessa forma, que à medida que a procura aumentava, maior seria o número de aeronaves que recebiam ordens para divergirem para outras infraestruturas aeroportuárias, assim como maior seria o atraso imputado às mesmas.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que esta medida origina, na grande maioria dos casos, atrasos em voo, não chegando a ser denominados como esperas em voo, o que significa que os custos produzidos por esta ação são relativamente reduzidos. Por outro lado, existem dois momentos críticos, o sequenciamento de aproximação e nas descolagens ou nas aterragens de aeronaves das/nas infraestruturas aeroportuárias. Comparativamente às medidas de gestão de rotas de aeronaves, o MIT promove resultados menos eficientes do que aqueles obtidos com o TMA.

3.2.4 Gestão de Rotas de Aeronaves

Na Tabela 3.4 encontra-se um breve resumo de cada medida micro que se refere diretamente à gestão das rotas das diferentes aeronaves e, seguidamente, serão detalhadas de forma pormenorizada, definindo-as e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas limitações.

Tabela 3.4 – Medidas Micro – Gestão de Rotas de Aeronaves

Medidas		Resumo
Sigla	Significado	
ICR	Integrated Collaborative Rerouting	Ajuste das rotas pré-definidas de cada aeronave consoante as restrições existentes.
TMA	Traffic Management Advisor	Tem a capacidade de delinear as trajetórias das aeronaves, de forma a encontrar um equilíbrio entre a capacidade das TMAs e as rotas definidas.

3.2.4.1 ICR

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [35], [76], [79] e [127].

O ICR é um método que permite ajustar as rotas das aeronaves, devido à presença de constrangimentos e/ou restrições nas rotas pré-definidas, tendo em atenção as preferências das companhias de transporte aéreo, afetando o menos possível a normal operação das mesmas.

Por outro lado, é uma ferramenta bastante útil no planeamento das rotas das aeronaves, devido ao facto da mesma conter informações provenientes de inúmeros(as) agentes, permitindo saber, com alguma antecedência, a existência de situações que poderão colocar em causa as operações das aeronaves. Ao implementar esta ferramenta não haverá sobrecarga de alguns(mas) agentes, nomeadamente, os(as) gestores(as) de tráfego aéreo, melhorando assim a previsibilidade do fluxo de tráfego aéreo e permitindo que estes(as) se foquem em outros problemas.

No documento [79] foi implementado um modelo de otimização que tinha como objetivo obter novas rotas para um conjunto de aeronaves, de forma a promover uma melhoria no fluxo de tráfego aéreo e um menor congestionamento do espaço aéreo e das infraestruturas aeroportuárias. Após a análise realizada e da construção dos modelos, concluiu-se que as medidas de reajuste das rotas são úteis quando se está na presença de uma situação de desequilíbrio na relação entre a procura e a oferta da capacidade existente e, por outro lado, quando o fluxo de aeronaves que sofreu um reajuste nas respetivas rotas é igual ou inferior à capacidade de reajuste da situação de congestionamento existente. Por outro lado, verificou-se que em situações extremas de congestionamento, a medida implementada não teve qualquer efeito significativo na melhoria e/ou na redistribuição do fluxo de tráfego aéreo. Um dos grandes benefícios obtidos foi a redução dos atrasos das aeronaves em solo e, consequentemente, nos custos dessa medida, atingindo valores próximos de 50%.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que esta medida não produz quaisquer efeitos benéficos em situações onde se verifica um elevado grau de congestionamento, sendo aconselhável a seleção de outra medida caso se atinja este patamar.

3.2.4.2 TMA

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [27], [30], [48], [51], [58], [69], [74], [76], [129], [139], [140], [141], [143], [146], [148], [149], [152], [153], [154], [155], [156], [157], [158], [159], [160], [161], [162], [163], [164] e [165].

O TMA é uma ferramenta automática que elabora de forma eficiente as trajetórias dos voos em qualquer fase, tendo a capacidade de organizar de forma sequencial as aeronaves que se dirigem para uma determinada infraestrutura aeroportuária, maximizando a sua capacidade sem colocar em causa a segurança das operações. Dessa forma, é possível antever com algum grau de certeza os possíveis atrasos que serão decorrentes desta sequência, de forma que os(as) agentes se encontrem devidamente preparados(as) para lidarem com os mesmos.

O seu princípio de funcionamento baseia-se na previsão do tempo estimado de aterragem de cada aeronave ao longo da sua rota de forma a delinear a trajetória mais adequada.

Esta ferramenta promove o aumento de capacidade das TMAs, reduzindo também o tempo de espera das aeronaves nas imediações das infraestruturas aeroportuárias, enquanto aguardam autorização para aterrarem, promovendo o aumento da eficiência do espaço aéreo.

A sua utilidade aumenta ainda mais quando ocorrem eventos meteorológicos desfavoráveis ao normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. Por outro lado, apesar de ser mais precisa que o GDP, e permitir a redução da utilização do MIT, seria recomendável a criação de uma ferramenta que permitisse aliar as vantagens de ambas para a obtenção de uma nova ferramenta mais eficiente.

No documento [152] foi implementado um modelo de colaboração entre diversos centros de TMA que tinha como objetivo aliviar o congestionamento verificado na fase de aproximação e de aterragem das aeronaves em apenas uma infraestrutura aeroportuária através da distribuição dos atrasos por diversas aeronaves. Esta medida tinha como função efetuar uma previsão do fluxo de tráfego aéreo em cada setor aéreo e destinado a cada infraestrutura aeroportuária. Para além do principal objetivo da sua implementação, é possível utilizar esta ferramenta para a obtenção dos seguintes resultados, nomeadamente, a coordenação e a definição dos EDCTs de forma a garantir que a aeronave possui *slot* disponível na infraestrutura aeroportuária de destino, evitando a sua espera no ar e, por outro lado, é possível gerir também os recursos humanos necessários para lidarem com a procura de aeronaves, ajustando-os de acordo com o nível de congestionamento existente em diferentes momentos do dia.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que apesar das características benéficas desta medida, a sua implementação é bastante trabalhosa devido às inúmeras interligações entre os(as) agentes.

3.2.5 Gestão dos Níveis de Voo nas Diversas Fases de Voo

Na Tabela 3.5 encontra-se um breve resumo de cada medida micro que se refere diretamente à gestão dos níveis de voo em que cada aeronave se encontra ao longo da sua rota e, seguidamente, a que se encontra assinalada com um asterisco será detalhada de forma pormenorizada, definindo-a e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas limitações. As medidas que não se encontram assinaladas com um asterisco serão descritas no Anexo A deste trabalho de investigação.

Tabela 3.5 – Medidas Micro – Gestão dos Níveis de Voo nas Diversas Fases de Voo

Medidas		Resumo
Sigla	**Significado**	
---	Capping	Atribuição de esperas durante o voo concedidas às aeronaves com o intuito de evitar possíveis congestionamentos e de auxiliar na gestão do fluxo de tráfego aéreo, diferindo entre si de acordo com a altitude em que cada aeronave se encontra.
AH*	Airborne Holding	
LAADR	Low Altitude Arrival and Departure Routing	
TER	Tower-En-Route	
---	Tunneling	

Apesar de existirem inúmeras medidas que se encaixam neste tipo de gestão de fluxo de tráfego aéreo é importante salientar que cada uma delas tem as suas peculiaridades e deve ser empregue de acordo com os níveis de voo específicos. A Tabela 3.6 tem como objetivo condensar a informação referida anteriormente para que a análise detalhada das medidas seja realizada de forma coerente e consciente tendo em conta a aplicabilidade de cada uma delas.

Tabela 3.6 – Diferenças dos Níveis de Voo

Medidas	Nível de Voo	
	Reduzido	**Elevado**
Capping	X*	
AH	X	X
LAADR	X**	
TER	X*	
Tunneling		X

Algumas ressalvas são imprescindíveis para a compreensão da Tabela 3.6 e, por esse motivo, os asteriscos deverão ser interpretados da seguinte forma, nomeadamente:

- * – Esta medida não se aplica diretamente a aeronaves que estejam a realizar as suas operações a níveis de voo obrigatoriamente reduzidos, mas sim para aquelas que voam a um nível de voo inferior ao pretendido e definido no seu plano de voo para determinada fase da sua operação;
- ** – Esta medida restringe apenas a altitude máxima a que cada aeronave se poderá encontrar, apesar de ser, na grande maioria das vezes, um nível de voo relativamente reduzido por ser implementado na fase de descolagem do voo.

3.2.5.1 *Airborne Holding*

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [10], [32], [33], [34], [36], [38], [45], [76], [81], [86], [98], [120], [127] e [134].

A prática da retenção de uma determinada aeronave em espera durante o voo é utilizada para gerir o fluxo de tráfego aéreo quando se prevê a ocorrência de atrasos. Este método fará com que exista um equilíbrio entre a procura e a oferta, evitando congestionamentos em horários de pico e/ou em situações mais complexas que possam surgir em uma determinada TMA. Apesar da implementação desta técnica ser planeada, consoante as informações recebidas por parte de outros(as) agentes, também pode ser utilizada de forma a suprimir situações de congestionamento em períodos de tempo inesperados.

É possível efetuar duas formas de atribuição de espera, dependente do momento em que a medida é implementada, nomeadamente:

- **AH Estático:** A tomada de decisão e o estabelecimento dos tempos de atraso para cada aeronave são definidos no início do dia, antes do início das operações de tráfego aéreo;
- **AH Dinâmico:** A medida é estabelecida ao longo do dia, tendo os(as) agentes acesso a toda a informação necessária para que a sua implementação seja adequada à operação existente.

No documento [81] foi implementado um modelo de gestão de esperas em voo, juntamente com o programa computacional adequado para a sua concretização de forma a promover ações mais eficazes e realistas, baseando-se na experiência adquirida e nos conhecimentos dos(as) agentes, principalmente os(as) controladores(as) de tráfego aéreo.

O modelo tem a capacidade de prever um conjunto de cenários que têm como intenção serem o fator chave para a resolução do problema detetado pelo(a) agente. Através desses cenários são sugeridas ações que são avaliadas pelo(a) agente, de forma a ser escolhida aquela que vai de encontro ao resultado pretendido. O algoritmo que permite efetuar esta análise é denominado por Q-Learning e o mesmo permite armazenar o conjunto de decisões efetuadas anteriormente de forma a compará-las posteriormente com novas situações de constrangimento. Este armazenamento permite que o(a) agente verifique se a decisão anterior foi a correta ou se pode melhorar, optando por outra decisão que tenha um menor impacto negativo, alterando-a e registando-a para a posterioridade. O resultado será uma "recompensa" para o(a) agente, tendo em conta o congestionamento existente e os setores aéreos em utilização, verificando se a decisão tomada permitiu reduzir a quantidade de aeronaves em determinada região do espaço aéreo. Uma das melhorias conseguidas com a implementação deste modelo foi a redistribuição do fluxo de tráfego aéreo, evitando o aumento de congestionamento em regiões que por si só já são naturalmente complexas, tendo-se verificado melhorias de valores médios de aproximadamente 20%.

No documento [33] foi implementado um algoritmo genético que, de forma metafórica, comparou o comportamento das aeronaves em duas infraestruturas aeroportuárias com o comportamento dos genes e cromossomas. Assim sendo, é possível melhorar as características da "próxima geração" tendo em conta os atrasos e os avanços atribuídos às aeronaves, assim como as respetivas penalizações obtidas.

A partir dos dados iniciais, e tendo em conta as melhorias inseridas, obteve-se uma população final que foi, seguidamente, comparada aos resultados obtidos pelos(as) agentes na "vida real", concluindo-se que o algoritmo promoveu uma melhoria de 8% e de 21% em cada uma das infraestruturas aeroportuárias, respetivamente.

No documento [86] o autor implementou o algoritmo Q-Learning, denominado frequentemente como a aprendizagem por reforço, sendo uma técnica utilizada para que o sistema, no seu todo, tenha a capacidade de aprender com a realidade de cada dia, sugerindo ações de melhoria para um período de tempo a curto prazo e sendo "recompensado" pelas opções sugeridas, caso estas promovam benefícios para a operação. Este algoritmo permite aumentar os resultados alcançados por esta técnica, tornando-a mais eficiente e simples. Foram escolhidos dois casos específicos que permitissem obter o maior nível de complexidade possível do espaço aéreo brasileiro, representando da melhor forma possível a realidade existente e promovendo ações para atrasar e/ou adiantar cada aeronave nos diferentes períodos de tempo e setores aéreos em estudo. De entre um conjunto de três medidas foi escolhida aquela que melhor se adequava à situação de congestionamento, promovendo uma melhor recompensa para os(as) agentes. A partir desta tomada de decisão foi possível reduzir o número de aeronaves em espera, melhorando as situações de congestionamento vividas.

A partir da análise das implementações práticas enunciadas anteriormente é possível destacar, negativamente, que independentemente dos benefícios promovidos por esta técnica, é importante referir que a sua aplicabilidade está restringida à configuração do espaço aéreo, o que faz com que em alguns casos seja totalmente impraticável, nomeadamente, em situações em que o fluxo de tráfego aéreo não possui um "padrão" claro, tornando-se completamente imprevisível a sua variação ao longo do tempo. A este facto acresce o congestionamento dos pontos em que convergem aeronaves de múltiplas infraestruturas aeroportuárias, tornando a aplicação desta ferramenta demasiado complexa visto que, para além do elevado número de aeronaves, existem também inúmeros(as) agentes a interagirem em cada momento. Para além disso, o principal fator negativo são os custos adjacentes à sua aplicação devido aos gastos exorbitantes em combustível por parte das aeronaves. Quando é possível implementar o GDP, esta medida tem um carácter preferencial comparativamente à espera em voo.

3.2.6 Gestão Temporal das Operações das Aeronaves

Na Tabela 3.7 encontra-se um breve resumo de cada medida micro que se refere diretamente à gestão temporal das operações das aeronaves e, seguidamente, serão detalhadas de forma pormenorizada, definindo-as e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas limitações.

Tabela 3.7 – Medidas Micro – Gestão Temporal das Operações das Aeronaves

Medidas		Resumo
Sigla	Significado	
EDCT	Expect Departure Clearance Time	Representa, de forma simplificada, a autorização cedida pelos(as) controladores(as) de tráfego aéreo para que cada aeronave possa descolar.
GS	Ground Stop	Medida que garante a manutenção de uma determinada aeronave no solo enquanto as restrições verificadas são ultrapassadas, de forma a obter a respetiva autorização para descolar.

3.2.6.1 EDCT

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [76], [79], [120] e [127].

O EDCT é uma medida que corresponde à autorização, em termos de período de tempo definido para que a aeronave possa descolar, tendo em conta que está afetada por um GDP. Este parâmetro está intimamente interligado com o GDP e com o AFP, visto que cada aeronave deverá descolar num intervalo de aproximadamente cinco minutos em relação ao seu EDCT, de forma a respeitar o intuito da implementação do GDP. Caso este horário não possa ser cumprido, o mesmo deverá ser "negociado" entre os(as) agentes envolvidos(as). Por outro lado, tendo com conta as condições meteorológicas e/ou as limitações das infraestruturas aeroportuárias, este parâmetro poderá sofrer alterações. Para além dos fatores transversais aos(às) agentes envolvidos(as), podem ocorrer atrasos devido a inúmeras outras ocasiões, como por exemplo, a interligação com outros voos, o congestionamento da infraestrutura aeroportuária e, consequentemente, da TMA, e por fim, mas não menos importante, os problemas de manutenção relacionados com as aeronaves.

No documento [120] foi elaborada uma comparação da magnitude e da natureza dos atrasos entre as aeronaves afetadas por um EDCT específico e aquelas que não estivessem sujeitas a esta medida. Após a realização desta comparação em cinco infraestruturas aeroportuárias foi possível observar que a média de atrasos nas aterragens foi significativamente superior nas aeronaves que estavam afetadas por um EDCT. Em média verificou-se que as aeronaves afetadas por um EDCT possuíam um atraso na ordem dos quinze minutos enquanto que as restantes possuíam um atraso na ordem dos cinco minutos. O valor de atraso imputado a estas aeronaves é ainda maior quando são implementadas outras TMIs, sendo recomendável a aplicação do critério de prioridade de forma a não prolongar este atraso.

Verificou-se então que em todas as infraestruturas aeroportuárias, os atrasos alocados às respetivas aeronaves foram substancialmente superiores quando as mesmas se encontravam afetadas por um determinado EDCT na fase da aterragem.

Relativamente à fase da descolagem, as conclusões são semelhantes na maioria das infraestruturas aeroportuárias e a diferença do valor dos atrasos imputados é significativamente inferior, tendo uma relação inversa em alguns casos.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que quando uma aeronave está sujeita a um determinado EDCT é necessário recorrer à implementação de outras TMIs de forma a garantir que a mesma respeita essa indicação.

3.2.6.2 GS

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [10], [32], [34], [36], [38], [40], [60], [76], [77], [78], [79], [93], [97], [98], [106], [120], [127], [130], [135] e [136].

O GS é um método que possui prioridade superior quando comparado a qualquer outro, o que significa que em caso de implementação de múltiplas TMIs, os(as) agentes deverão optar pelo cumprimento do GS. Este procedimento obriga a que determinada aeronave permaneça no solo enquanto não obtiver a autorização para descolar, tendo como origem diversos motivos, como por exemplo, a limitação na(s) pista(s) da infraestrutura aeroportuária, o congestionamento na TMA e/ou alguma anomalia detetada em um ou mais equipamento(s) imprescindível(is) à correta gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Este método aplica-se quando uma ou mais das seguintes situações se verificam, nomeadamente:

- Devido à redução drástica da capacidade de uma TMA, como consequência, por exemplo, de condições meteorológicas adversas e/ou da falha de equipamentos de elevada relevância da infraestrutura aeroportuária em análise;
- Para impedir longos períodos de espera das aeronaves em voo;
- Para impedir a saturação de algumas regiões do espaço aéreo;
- Para impedir que os(as) agentes percam o controlo da situação.

Ao contrário de outros métodos apresentados, trata-se de uma medida corretiva e não preventiva, podendo dessa forma, em alguns casos, ser planeada com alguma antecedência, tendo em conta o conjunto de informações obtidas pelos(as) agentes.

Apesar de ser clara a interligação com o GDP, quando é definido um GS, todas as aeronaves que tenham como destino a mesma infraestrutura aeroportuária, e que ainda não tenham obtido autorização para descolarem, ficam retidas até que seja dada ordem para que esse GS seja retirado, demonstrando assim a importância desta medida.

No documento [130] foi elaborada uma experiência de forma a verificar o tipo de controlo efetuado pelos(as) agentes a um conjunto de aeronaves que se encontravam em operação. Foi utilizado o método de atribuição de "recompensas" aos(às) agentes, verificando que com diferentes "recompensas" era possível obter diferentes resultados. É importante referir que a ação de determinado(a) agente está sempre interligada com a ação de outro(a), não existindo uma independência total. Desta forma foi possível concluir que a negociação entre os(as) agentes é um fator primordial para o sucesso da implementação desta medida.

A partir da análise da implementação prática enunciada anteriormente é possível destacar, negativamente, que apesar de benéfica, esta medida pode ser prejudicial quando vários(as) agentes tomam a mesma decisão e mantêm diversas aeronaves em solo, dando origem a um congestionamento no solo. Esta medida é frequentemente confundida com o GDP, mas tendo em conta as suas características e o método de atuação, torna-se muito mais restritiva.

3.3 Programas Computacionais

Apesar de existirem diversas medidas que podem ser implementadas para lidarem com a necessidade de controlar adequadamente o fluxo de tráfego aéreo, são necessários programas computacionais para analisá-las, implementá-las e monitorizá-las, de forma a verificar se são tão eficazes quanto seria esperado e, em casos limite, se será necessário substituí-las.

Por mais melhorias que sejam implementadas aos programas computacionais desenvolvidos, é importante nunca esquecer o principal foco, isto é, a segurança de toda a operação. Por este motivo, todos os programas computacionais criados devem estar em constante atualização com o intuito de permitirem a minimização e/ou a resolução de potenciais lacunas e auxiliarem na resolução de problemas que possam surgir durante a sua implementação na operação real.

Na Tabela 3.8 encontra-se um breve resumo de cada programa computacional que se refere diretamente à gestão do fluxo de tráfego aéreo que será detalhado de forma pormenorizada.

Tabela 3.8 – Programas Computacionais

Programas Computacionais		Resumo
Sigla	Significado	
ATFMGS	ATFM Gride Service	Auxilia a coordenação entre as aeronaves que pretendem aterrar e/ou descolar na/da mesma infraestrutura aeroportuária, em simultâneo, evitando a ocorrência de conflitos.
CARAT	Computer Aided Route Allocation Tool	Auxilia no reajuste das rotas das aeronaves sempre que as condições verificadas em voo se justifiquem.
CARPAT	Computational Appliance for Rapid Prediction of Aircraft Trajectories	Prevê, de forma satisfatória, as trajetórias efetuadas pelas aeronaves, auxiliando os(as) agentes na tomada de decisão antecipada.
CASA	Computer Assisted/Aided Slot Allocation	Determina o período de tempo durante o qual cada aeronave deverá receber a autorização para descolar, consoante as circunstâncias verificadas.

Programas Computacionais		Resumo
Sigla	Significado	
FACET	Future Air Traffic Management Concepts Evaluation Tool	Permite efetuar simulações precisas sobre o fluxo de tráfego aéreo, sendo uma ferramenta bastante completa que contempla inúmeras utilidades.
ISA	Innovative Slot Allocation	Reflete uma melhoria obtida do desenvolvimento e da utilização frequente do CASA.
P2	Progressive Planning	Permite analisar o impacto promovido pela implementação simultânea de várias TMIs.
SWAP	Severe Weather Avoidance Plan	Permite analisar e quantificar o impacto das condições meteorológicas adversas para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Após a apresentação simplificada de cada programa computacional citado na Tabela 3.8, surge a necessidade de elaborar uma explicação detalhada sobre os mesmos, definindo-os adequadamente e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas especificidades intrínsecas.

3.3.1 ATFMGS

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [80] e [84].

O ATFMGS é uma ferramenta que tem como objetivo ajudar na coordenação das operações de aterragem e descolagem em diversas infraestruturas aeroportuárias em simultâneo, de forma a evitar a ocorrência de conflitos.

Através desta ferramenta ocorre a "negociação" entre os(as) agentes que interagem de acordo com o tempo de atraso de voo de cada aeronave. Desta negociação resulta a aceitação ou a recusa do tempo de atraso existente, isto é, os(as) agentes de cada TMA poderão decidir "absorver" parcial ou totalmente o valor em causa de forma a evitarem a ocorrência de congestionamento. Quanto maior for o tempo de atraso, maior será o nível de exigência de negociação por parte dos(as) agentes e maior será a probabilidade de ocorrência de congestionamentos. É importante que o indicador utilizado tenha duas perspetivas de análise, isto é, o tempo de atraso derivado da operação das aeronaves e o tempo de atraso que a TMA é capaz de absorver, sendo a sua relação inversamente proporcional. Assim sendo, o ATFMGS tem como intenção servir como um suporte na partilha e na coordenação de recursos comuns a vários(as) agentes que intervêm no controlo de fluxo de tráfego aéreo.

Para além do que já foi referido anteriormente, este programa computacional tem a capacidade de analisar e antever a ocorrência de atrasos com uma antecedência de duas horas, o que representa um bom intervalo de tempo para a implementação de medidas necessárias de forma a evitarem a ocorrência de atrasos em uma ou mais aeronaves.

Sendo assim, uma das principais vantagens refere-se à diminuição drástica da quantidade de aeronaves que, em situações de congestionamento, fariam esperas em voo, agravando a insatisfação de todos(as) e aumentando os custos de operação.

No documento [80] foi apresentado um modelo que tem como principal objetivo ajudar os(as) principais agentes na coordenação entre as aterragens e as descolagens de aeronaves num conjunto de infraestruturas aeroportuárias, de modo a facilitar não só a tarefa dos(as) agentes como também a evitar a ocorrência de conflitos que possam, de alguma forma, colocar em causa a segurança das operações. A principal métrica para a concretização deste modelo é o Padrão de Balanceamento do Aeroporto (PBA) que é uma função do tempo de atraso de cada voo e do impacto do mesmo. A partir desta métrica é possível efetuar a comparação entre o PBA calculado, o aceitável e a realidade existente em cada infraestrutura aeroportuária.

A partir deste mesmo estudo foi possível criar escalas de voo, estando estas intimamente interligadas com os tempos mínimos de separação entre as aeronaves. Essa escala "teórica" foi comparada à escala real utilizada em quatro infraestruturas aeroportuárias, verificando que as mesmas não eram equivalentes e demonstrando que a sua capacidade não estava a ser utilizada da melhor forma possível. Por este facto, a percentagem de atrasos era bastante elevada e indesejável. A implementação desta ferramenta ajudou na resolução de conflitos, permitindo um contato e uma consequente negociação entre os(as) agentes e tornou-se bastante eficaz quando podia ser aplicada com duas horas de antecedência. Adicionalmente, foi possível reduzir o número de aeronaves que faziam esperas em voo devido à sincronização dos horários, reduzindo os custos para as companhias de transporte aéreo e o descontentamento dos(as) clientes.

No documento [84] o trabalho desenvolvido pelo autor focou-se em duas componentes primordiais, nomeadamente:

- **A Gestão do Fluxo de Tráfego Aéreo nos *Taxiways*:** Foi implementado um modelo que, como consequência, deu origem a um aumento na taxa de aterragem e de descolagem. A fragmentação dos *taxiways* por diversas secções permitiu melhorias de aproximadamente 22% através da diminuição do tempo gasto para a descolagem de vinte e quatro aeronaves. Por outro lado, um melhor controlo do fluxo de tráfego aéreo permitiu um ganho de aproximadamente 33% relativo à taxa de aterragem;

- **Um Sistema de Resolução de Conflitos Aéreos:** Foi realizada uma análise de três abordagens referentes a este problema que é bastante importante para a manutenção dos níveis de segurança desejáveis e que permitiu a obtenção de resultados extraordinários. Estas três abordagens são denominadas da seguinte forma, nomeadamente, Centralizada (o(a) principal agente está na torre de controlo), Descentralizada (existem vários(as) agentes em locais distintos) e Híbrida (combinação das abordagens anteriores). A partir do estudo desenvolvido foi possível concluir que com uma abordagem centralizada, o número de conflitos e de colisões era reduzido, comparativamente às restantes abordagens e, como tal, esta seria a mais adequada e eficiente, principalmente quando o número de agentes envolvidos(as) é elevado.

3.3.2 CARAT

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [111], [147], [150] e [166].

O CARAT é uma ferramenta que tem algumas características semelhantes ao CARPAT, tendo a capacidade de auxiliar no reajuste das rotas de algumas aeronaves através da definição da rota mais adequada para cada voo, utilizando para isso uma função de custo *VS* benefício.

No documento [166] esta medida foi implementada em conjunto com uma adaptação do FACET, de forma a gerar rotas de aeronaves com maior rapidez. Concluiu-se que a remoção de algumas das funções do FACET acelerou o processo de criação da previsão de rotas, salientando que a qualidade dos resultados depende das melhorias implementadas no programa computacional e do aumento das capacidades e das características dos *hardwares* utilizados neste estudo. Por outro lado, é importante acautelar que os requisitos em termos de *hardware* variam de forma linear com o número de aeronaves envolvidas na previsão.

Apesar dos benefícios obtidos através da utilização deste programa computacional é importante analisar a relação entre o custo e o benefício, visto que quanto mais complexo for o conjunto de dados em análise, mais específico será o *hardware* necessário para efetuar as previsões, acarretando maiores custos para a sua concretização.

3.3.3 CARPAT

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [166], [167] e [168].

O CARPAT surgiu após a criação do FACET de forma a melhorar algumas das suas características, nomeadamente, a rapidez da simulação e a obtenção das trajetórias de várias aeronaves. Tem como particularidade a conexão com uma rede de *internet* que permite o envio da previsão destas trajetórias diretamente para os(as) agentes, de forma a que possa auxiliar numa melhor gestão do fluxo de tráfego aéreo e de toda a operação.

No documento [167] esta ferramenta foi implementada de forma a verificar se conseguiria, de facto, prever mais rapidamente as trajetórias das aeronaves, quando comparada com o FACET. Este objetivo foi cumprido, garantindo acima de tudo que a característica fidedigna dos dados não seria perdida ao longo da simulação, através da realização de uma comparação direta entre estas duas simulações, demonstrando a proximidade dos seus resultados e revelando que a principal diferença se baseia no tempo necessário de concretização da simulação.

3.3.4 CASA

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [13], [35], [39], [44], [46], [65], [77], [96], [169] e [170].

O CASA é uma ferramenta que tem como função determinar o período de tempo em que cada aeronave deverá ter autorização para descolar, definindo assim o EDCT. O modo de funcionamento desta ferramenta baseia-se num algoritmo que respeita a ordem de aterragem de cada aeronave, o que significa que a primeira a chegar a uma determinada infraestrutura aeroportuária possui um *slot* privilegiado, comparativamente com a aeronave seguinte. Isto significa que a ferramenta não tem em conta as aeronaves com carácter prioritário, tratando-as da mesma forma de acordo com o algoritmo FCFS, baseado no algoritmo designado em inglês por First In, First Out (FIFO). Por outro lado, a mesma possui uma ligação direta aos planeamentos definidos antes de cada voo, o que significa que não prevê as alterações que podem ocorrer, nomeadamente, os atrasos.

No documento [96] os autores implementaram esta ferramenta para efetuarem uma análise do impacto e da eficácia da sua utilização, comparando-a com outras medidas restritivas, principalmente em ocasiões com condições meteorológicas desfavoráveis. A ferramenta em causa tem como objetivo a minimização dos custos totais associados aos atrasos de cada aeronave e *slot*, tendo consciência de que os *slots* são quantidades físicas limitadas. Apesar da sua eficácia variar de acordo com as condições existentes e com as restrições impostas, foi possível obter uma redução dos atrasos em aproximadamente 6%.

É importante salientar que pelo facto deste programa computacional não ter em conta algumas características respeitantes a cada aeronave, não permite atribuir a priorização adequada, não conseguindo dessa forma impedir a acumulação de atrasos nas operações.

3.3.5 FACET

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [22], [40], [94], [121], [130], [147], [150], [166], [167], [171], [172], [173], [174], [175] e [176].

O FACET é uma ferramenta computacional utilizada para efetuar simulações precisas que retratam de forma bastante fidedigna a realidade existente no fluxo de tráfego aéreo, desenvolvida pela Administração Nacional da Aeronáutica e Espaço (ANAE), designada em inglês por National Aeronautics and Space Administration (NASA), sendo utilizada frequentemente na gestão do espaço aéreo norte-americano. O carácter benéfico da mesma deve-se ao facto de ser bastante multifacetada e, por outro lado, por poder ser amplamente aplicada devido à sua capacidade de utilização do histórico de dados para efetuar simulações e análises estatísticas bastante concretas e relevantes.

Esta ferramenta efetua uma simulação do tráfego aéreo e das trajetórias de cada aeronave, baseada nas informações recolhidas através dos planos de voo, produzindo dessa forma uma previsão que poderá impedir situações de congestionamento e/ou conflito entre aeronaves em determinadas regiões, permitindo que os(as) agentes alterem essas rotas. Em caso de previsão de situações indesejáveis, os(as) agentes poderão introduzir algumas das medidas já apresentadas anteriormente, observando cuidadosamente os resultados obtidos através de cada uma delas, garantindo que no momento da tomada de decisão irão optar pela melhor opção. Uma das principais medidas utilizadas pelos(as) agentes para evitar situações de congestionamento é a definição de MITs maiores, isto é, aumentando a separação física entre duas ou mais aeronaves, o fluxo de aeronaves para determinado ponto do espaço aéreo será reduzido, dando assim oportunidade para que essas aeronaves sejam geridas de uma forma mais cautelosa e eficaz.

No documento [171] os autores elaboraram um estudo utilizando um algoritmo que promove um conjunto de "recompensas" para os(as) agentes, consoante os resultados obtidos através das medidas implementadas. Estas "recompensas" são fruto de medidas de incentivo que pretendem maximizar o empenho dos(as) agentes. As "recompensas" foram associadas em quatro grupos, denominados como "métodos", com o intuito de ser averiguado, de forma adequada, qual deles melhorava o desempenho dos(as) agentes e aumentava a eficácia do sistema. Para além dos diferentes métodos foram efetuadas duas simulações, tendo como intuito verificar se o seu "comportamento" dependeria da complexidade do fluxo de tráfego aéreo. Em ambos os casos, foi possível comprovar que os resultados obtidos eram substancialmente superiores quando as "recompensas" atribuídas aos(às) agentes eram diferentes. Esta conclusão deve-se ao facto de cada agente implementar medidas que vão de encontro aos seus objetivos, sejam eles individuais ou comuns, nomeadamente, a maximização da eficiência da gestão do fluxo de tráfego aéreo, mas sem ter em conta o verdadeiro impacto que as medidas tomadas por terceiros podem ter no problema em análise quando o mesmo é observado como um todo.

No documento [173] esta ferramenta foi implementada considerando dois modos de operação, sendo um deles humanizado, isto é, tendo em conta a tomada de decisão dos(as) agentes, e o outro automatizado, estando este dependente da otimização obtida. O modelo criado pelos autores tinha como objetivo controlar as descolagens, as rotas e a separação entre as aeronaves, definindo as TMIs adequadas para cada situação. No modo humanizado o(a) agente poderia definir as TMIs de acordo com as circunstâncias existentes, enquanto que no modo automatizado a ferramenta providenciaria restrições de fluxo adequadas, assim como a duração das mesmas. Em todas as simulações executadas, o constrangimento analisado foi o agravamento das condições meteorológicas e, sendo assim, a definição de TMIs adequadas seria desejável para albergar a procura existente e evitar o impacto negativo desta restrição.

3.3.6 ISA

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [111], [152] e [169].

Apesar do ISA ter o mesmo objetivo do ATFM MOdeling Capability (AMOC), esta ferramenta sofreu alterações substanciais, integrando para isso inúmeras técnicas de otimização que promovem resultados muito mais realistas e adequados às necessidades dos(as) agentes envolvidos(as) nas operações de tráfego aéreo.

Em muitas ocasiões é possível efetuar uma comparação entre os resultados obtidos através deste programa computacional e os resultados provenientes do CASA, sendo muito semelhantes entre si. Por este facto, é possível afirmar que a criação do ISA se baseou em conceitos e em conclusões retiradas através da experiência decorrente da utilização recorrente do CASA.

Devido a um vasto conjunto de vantagens, a escolha de utilização do ISA tem aumentado ao longo do tempo, visto que o mesmo promove um conjunto de dados bastante eficazes, precisos e flexíveis às restrições e/ou condições existentes em cada tipo de operação.

No documento [152] os autores aplicaram o ISA de forma a analisarem os resultados provenientes de três estratégias de alocação de *slots*, nomeadamente:

- **Reduce Overall Delay (ROD):** Pretende promover a diminuição do tempo total de atraso, em minutos, que afeta cada aeronave. Esta medida é conseguida através do sequenciamento inteligente das aeronaves;
- **Reduce Delay per Seat (RDS):** É uma estratégia semelhante ao ROD, mas tendo como fator chave a quantidade de assentos existentes por aeronave. Desta forma, é realizado um sequenciamento das aeronaves com o objetivo de atribuir prioridade àquelas que possuiam o número de assentos mais elevado;

- **Optimise Delay according to Flight Duration (DFD):** Ao contrário das anteriores, esta estratégia pretende elaborar uma análise entre a extensão dos atrasos e o tipo de voo correspondente, isto é, a duração dos mesmos.

Ao longo do estudo foi realizada uma comparação direta entre os resultados obtidos através do ROD e do RDS, analisando de forma separada os resultados obtidos pelo DFD. Apesar do ROD e do RDS se basearem em fatores distintos, a implementação destas duas medidas de alocação de *slots* permitiu uma redução de atrasos entre 17% e 32%, respetivamente, comparativamente aos dados que seriam obtidos na implementação do CASA. Relativamente à implementação da estratégia DFD, comparativamente aos resultados obtidos pelo CASA, esta estratégia tem a capacidade de reduzir os atrasos dos voos curtos em cerca de 57%, conseguindo também uma redução dos atrasos de longo curso em cerca de 12%.

3.3.7 P2

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se a seguinte, [19].

O P2 representa uma melhoria obtida através do desenvolvimento do Integrated Impact Assessment Capability (IIAC) e que permite analisar o impacto da ocorrência de diversos procedimentos de gestão do fluxo de tráfego aéreo que ajudarão na tomada de decisão no futuro. Ao contrário do IIAC, é possível efetuar uma análise de um conjunto de medidas de forma simultânea, tornando o processo mais rápido e eficaz. Para além da rapidez evidenciada anteriormente, promove melhores resultados, quando comparado com o IIAC, em situações demasiado complexas, melhorando as previsões de tráfego e promovendo TMIs mais adequadas para cada situação. Com estas melhorias, o planeamento das operações é mais eficaz, diminuindo a necessidade da implementação de TMIs para resolverem problemas decorrentes das operações de tráfego aéreo.

No documento [19] foi realizada uma comparação do efeito da previsão de tráfego aéreo entre uma situação sem a aplicação do P2 e outra com a aplicação do mesmo. Apesar desta diferença é importante salientar que, em ambos os cenários, foi utilizado o IIAC, logo este estudo pretendeu verificar se de facto o P2 promovia uma alteração significativa. Após a análise dos cenários foi possível afirmar que as características benéficas do P2 não se sobrepunham às que já eram alcançadas pelo IIAC, mas este resultado não faz com que o P2 perca a sua utilidade. Complementarmente, verificou-se que em termos de precisão da previsibilidade, o uso do P2 era substancialmente benéfico, principalmente em situações bastante complexas em que o nível de constrangimento era significativamente superior ao normal. Salienta-se que a simulação não é a "vida real", sendo necessário estudar de forma contínua a melhoria da ferramenta para que os resultados da mesma consigam alcançar a meta esperada.

3.3.8 SWAP

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [44], [76], [126], [135], [177] e [178].

O SWAP é um programa computacional que foi desenvolvido para regiões em que existe uma grande probabilidade de ocorrência de eventos meteorológicos graves, dificultando a gestão do fluxo de tráfego aéreo.

No documento [177] os autores propuseram um modelo que tinha como objetivo reajustar as rotas das aeronaves, tendo em conta as características peculiares e, na grande maioria das vezes, a imprevisibilidade das condições meteorológicas que têm um impacto bastante acentuado no sucesso das operações do fluxo de tráfego aéreo. O modelo tem em conta o tipo de informação recebida, seja ela um valor determinístico ou estocástico. Com a criação do modelo foi possível verificar a poupança de aproximadamente 10%, no que diz respeito aos custos produzidos pelo impacto das condições meteorológicas adversas, antevendo estas condições e efetuando as modificações necessárias à operação das aeronaves. Esta redução de custos foi maior quando o conjunto de dados em análise era totalmente probabilístico. Dessa forma, foi possível verificar a variação na poupança dos custos tendo como base de análise três variáveis fundamentais neste modelo, nomeadamente, a localização, o(a) tamanho/extensão e a duração da intempérie.

No documento [126] os autores propuseram um modelo que fosse capaz de efetuar uma previsão fidedigna do fluxo de tráfego aéreo quando fossem verificadas condições meteorológicas adversas, sendo que a medida utilizada para contornar o problema existente relativamente ao aumento da procura foi a implementação de GDP. O modelo foi criado através de um conjunto de dados e informações recolhidos(as) de eventos ocorridos no passado, de forma a que pudessem ser analisados e, consequentemente, permitindo determinar em que momentos esses eventos se iriam repetir ao nível tático e estratégico.

É importante salientar que a tomada de decisão depende, em última instância, do(a) agente adequado(a) e do quanto ele(a) confia nas informações fornecidas através da previsão, podendo a implementação de uma TMI acabar por interferir no normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Através do modelo apresentado foi possível identificar uma relação estreita entre as condições meteorológicas existentes no momento da implementação do GDP e o aumento dos problemas operacionais decorrentes da execução do GDP SWAP.

3.4 Projetos

Todos os projetos de investigação que serão analisados têm algumas semelhanças, permitindo dessa forma uma rápida comparação, apesar de cada um deles possuir um determinado número de especificidades que o torna único e igualmente interessante, nomeadamente:

- São aplicados em períodos de tempo reduzidos;
- São aplicados para um número reduzido de aeronaves e/ou infraestruturas aeroportuárias e as respetivas TMAs;
- Têm em consideração as diferentes fases de voo de uma determinada aeronave;
- A tentativa de extensão destes projetos para áreas físicas maiores torna-se um desafio bastante complexo devido à quantidade de agentes e, acima de tudo, de dados necessários para que os mesmos sejam fiéis à realidade existente.

Apesar de existirem inúmeros projetos ao longo da literatura consultada e publicada nas últimas décadas relativamente à melhoria constante da gestão do fluxo de tráfego aéreo, dois deles merecem especial atenção devido às suas características e potenciais, nomeadamente, o Single European Sky ATM Research (SESAR) e o Next Generation Air Transportation System (NextGen). Tendo em conta o contexto de desenvolvimento deste trabalho de investigação e o âmbito geográfico de aplicação de cada projeto, o SESAR merece especial atenção, destacando-se as seguintes características, comparativamente ao NextGen, apresentadas na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Características Benéficas do SESAR [18, 35, 42, 44, 46, 57, 77, 78, 92, 104, 115, 140, 141, 142, 171, 173, 176, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186]

Características Benéficas do SESAR
Aplicação de TMIs preferencialmente de carácter estratégico, privilegiando a capacidade de antecipação do planeamento de alocação e de distribuição dos *slots* disponíveis.
As operações de tráfego aéreo planeadas têm em consideração a capacidade das infraestruturas aeroportuárias durante a ocorrência de um evento grave que poderá afetar o congestionamento, como por exemplo, a verificação de condições meteorológicas adversas.
Existe partilha de recursos das infraestruturas aeroportuárias entre os(as) agentes.
Fortemente dependente da colaboração justa, empenhada e transparente entre os(as) agentes.
Interesse na redução dos custos suportados pelos(as) clientes.
O espaço aéreo representa o principal ponto de congestionamento da TMA.
Obtenção de dados relativos às condições meteorológicas através de fontes tradicionais.
Projeto mais descentralizado.
Recorre ao sistema de "filas de espera" de forma a organizar e a sequenciar o fluxo de entrada e de saída de aeronaves nas TMAs.
Todo o fluxo de tráfego aéreo nesta região está sujeito ao controlo e gestão ATFM.

Adicionalmente, na Tabela 3.10 encontra-se um breve resumo de cada um dos projetos reunidos ao longo do processo de revisão bibliográfica, sendo que cada um deles será posteriormente detalhado de forma pormenorizada, definindo-os adequadamente, e explicitando, quando possível, exemplos da sua aplicação e das suas especificidades intrínsecas.

Tabela 3.10 – Projetos

Projetos		Resumo
Sigla	Significado	
Air MIDAS	Air Man-Machine Integrated Design and Analysis System	Analisa o comportamento humano assim como a relação entre o Ser Humano e as máquinas imprescindíveis para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.
CASSIOPEIA	Complex Adaptive Systems for Optimization of Performance in ATM	Analisa a relação causa *VS* efeito entre as medidas implementadas pelos(as) agentes e o seu impacto depois da implementação, tendo a capacidade de se adaptar às mudanças.

3.4.1 Air MIDAS

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [112] e [179].

O Air MIDAS analisa o comportamento dos(as) agentes no momento da aproximação final de uma determinada aeronave à pista de uma infraestrutura aeroportuária, tendo em especial atenção a interação entre os(as) pilotos e os(as) controladores(as) de tráfego aéreo, de forma a coordenar todo o procedimento. Muitos fenómenos psicológicos e fisiológicos são analisados, como por exemplo, a visão, a capacidade de concentração, a capacidade de memorização e as capacidades motoras.

No documento [112] foi implementado um modelo com o intuito de efetuar uma análise de risco relativamente ao comportamento de alguns(mas) agentes, principalmente os(as) controladores(as) de tráfego aéreo, tendo sido realizados dois tipos de análises, nomeadamente:

- **Micro:** Medição da carga de trabalho efetuada pelos(as) controladores(as) de tráfego aéreo e consequentemente do seu desempenho;
- **Macro:** Observação dos fluxos de tráfego aéreo originados pelas ações tomadas pelos(as) controladores(as) de tráfego aéreo e pelos(as) pilotos, analisando a eficiência das aterragens e a manutenção dos níveis de segurança desejados.

A partir da simulação de cenários efetuada, e comparando os resultados obtidos com o histórico recolhido, foi possível verificar que a implementação deste modelo promoveu uma melhor redistribuição da carga de trabalho dos(as) agentes e utilização das suas capacidades.

3.4.2 CASSIOPEIA

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [179] e [180].

O CASSIOPEIA é um projeto que pretende analisar a relação causa *VS* efeito entre as medidas implementadas pelos(as) agentes e o seu impacto após a implementação, tendo a capacidade de se adaptar às mudanças.

No documento [180] foi desenvolvido o CASSIOPEIA tendo por base as normas que regem o intuito da criação do sistema SESAR. Este sistema tem como pretensão ser uma ferramenta bastante útil para os(as) agentes na tomada de decisão, principalmente no que diz respeito à verificação de medidas corretivas, normas e/ou regulamentos e mecanismos que permitam uma melhor gestão do fluxo de tráfego aéreo. Para comprovar a sua utilidade foram elaborados três estudos, nomeadamente, o Estudo 1 (análise do efeito de novas regulamentações ambientais), o Estudo 2 (análise do efeito da imposição de restrições na capacidade das TMAs) e o Estudo 3 (análise de novos métodos de controlo da velocidade das aeronaves). A análise dos resultados obtidos permitiu obter diferentes conclusões, como por exemplo, as restrições de tráfego aéreo que ocorrem durante o período da manhã provocam um impacto bastante negativo no contexto económico, quando comparados com o mesmo impacto no caso da implementação destas restrições ocorrer no período da noite (Estudo 1); caso a negociação dos *slots* ocorra diretamente entre as companhias de transporte aéreo é possível obter uma redução de custos de aproximadamente 30% (Estudo 2); é possível obter uma redução dos atrasos caso seja implementada uma nova estratégia de voo que permita ajustar a velocidade (Estudo 3).

3.5 Sistemas

Para além dos programas computacionais mais simples apresentados anteriormente, existem sistemas bastante complexos e ainda em fase de estudo e/ou melhoria que prometem ser bastante úteis para uma mais fácil e eficaz gestão do fluxo de tráfego aéreo. Apesar da vasta variedade de sistemas existente no setor do transporte aéreo, serão apresentados na Tabela 3.11 aqueles cujas vantagens prometem atingir de forma mais eficaz os propósitos para os quais foram implementados, definindo-os adequadamente e explicitando exemplos da sua aplicação e das suas especificidades intrínsecas.

Tabela 3.11 – Sistemas

Sistemas		Resumo
Sigla	**Significado**	
SISCONFLUX	System of the Application and Management of the Decision Support Air Traffic Flow Control	Prevê a ocorrência de situações que podem afetar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, auxiliando na tomada de decisão dos(as) agentes.
STVD	Sistema de Tratamento e Visualização de Dados	Fornece informações relevantes aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo, de forma a auxiliá-los(as) na tomada de decisão que possa evitar a ocorrência de congestionamentos.
SYNCROMAX	Sistema de Gestão de Fluência de Tráfego Aéreo	Prevê a procura para uma determinada TMA e, por esse motivo, permite antever e prevenir situações de congestionamento.

3.5.1 SISCONFLUX

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [34], [45], [46], [60], [82], [84], [86], [87], [88], [94], [117] e [187].

O SISCONFLUX é uma ferramenta automatizada que tem como objetivo prever determinadas situações que colocam em causa o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo e que, por outro lado, auxilia no processo de tomada de decisão dos(as) agentes. Devido a este facto, a mesma deverá ser utilizada de forma semi-automatizada, garantindo a relevância das decisões tomadas pelos(as) agentes.

De acordo com os estudos desenvolvidos, existem diferentes metodologias que poderão ser analisadas e implementadas com o intuito de obter a funcionalidade pretendida para o SISCONFLUX, sendo que as principais poderão ser identificadas da seguinte forma, nomeadamente, a Modelação Discreta (Pesquisa Operacional), os Fluxos Contínuos (Teoria dos Grafos) e os Sistemas Distribuídos (Multiagentes). Esta ferramenta contém três componentes, nomeadamente, a de acompanhamento e previsão de cenário, a de avaliação e apoio à decisão e a de equilíbrio do fluxo.

A principal medida implementada automaticamente por este sistema é o GDP, sendo acionado quando se prevê que a capacidade de determinada TMA entrará brevemente em estado de saturação.

A eficácia desta ferramenta dependerá do tipo de algoritmo utilizado para determinar o fluxo de tráfego aéreo máximo. Estes algoritmos produzirão o mesmo valor de fluxo máximo de tráfego aéreo, mas farão uma (re)distribuição do mesmo de forma distinta. Independentemente do algoritmo implementado, o processo segue sempre os seguintes passos, nomeadamente, a obtenção da previsão de cenário e da distribuição da capacidade de cada setor aéreo e, por fim, o modelo sugere intervalos de tempo de descolagem e também diferentes formas para distribuir o fluxo de tráfego aéreo ao longo dos diversos setores aéreos.

No documento [82] foram implementados quatro algoritmos, nomeadamente, o Dinic, o Edmonds-Karp, o FIFO Preflow Push e o Highest Label Preflow Push. Neste estudo pretendeu-se analisar as formas de distribuição do fluxo de tráfego aéreo, que entra e que sai no setor aéreo de São Paulo, no Brasil, produzidas por cada algoritmo. Para além disso, foi possível verificar o impacto das diferentes distribuições nos setores aéreos adjacentes, tendo a particularidade de ter sido implementado em duas ocasiões, nomeadamente, num dia de fluxo elevado e num dia de fluxo reduzido. Estas ocasiões permitiram obter as seguintes conclusões, nomeadamente:

- **Dia de Fluxo Elevado**: Apesar de todos os algoritmos promoverem um fluxo máximo de tráfego aéreo, o Dinic conseguiu atingir um maior equilíbrio entre os diversos setores aéreos adjacentes;

- **Dia de Fluxo Reduzido:** Apesar de todos os algoritmos promoverem um fluxo máximo de tráfego aéreo, não se verifica uma diferença tão visível num dia de fluxo reduzido como em situações de fluxo elevado. O algoritmo Edmonds-Karp apresentou a distribuição de fluxo com maior desequilíbrio, enquanto os restantes algoritmos atingiram o mesmo grau de equilíbrio, tendo um impacto distinto em diferentes setores aéreos adjacentes.

No documento [34] foi implementado um algoritmo, o Q-Learning. A aplicação deste algoritmo tem como objetivo analisar o cenário existente em cada momento, de forma a sugerir uma medida restritiva que ajudará na distribuição e na gestão do fluxo de tráfego aéreo. Esta análise constante de cenário *VS* ação recorre a um vasto histórico, dando preferência a medidas cujos resultados já são conhecidos de implementações anteriores, garantindo o sucesso das mesmas. De forma a simplificar o estudo, a única medida utilizada foi a espera em solo, dando origem a diversos valores de atrasos consoante o momento do cenário. Concluiu-se que para que este algoritmo possa promover medidas eficientes é necessário ter uma base de dados completa, efetuar um elevado número de ciclos e complementá-la com um vasto histórico de medidas implementadas pelos(as) agentes.

No documento [84] pretendeu-se analisar e melhorar a gestão do fluxo de tráfego aéreo, tendo em especial atenção três componentes em particular, nomeadamente:

- ***Taxi* das Aeronaves:** Obteve-se um ganho de 22% de capacidade relativamente à taxa de descolagem, sendo possível dessa forma autorizar a descolagem de um maior número de aeronaves. Esta melhoria foi possível devido à fragmentação dos *taxiways*;
- **Filas de Aterragem e de Descolagem:** Obteve-se um ganho de 33% de capacidade relativamente à taxa de aterragem, tal como se tinha verificado no cenário anterior;
- **Deteção e Resolução de Conflitos:** Para analisar as melhorias obtidas foram utilizadas três abordagens, nomeadamente, a centralizada, a descentralizada e a híbrida. À medida que o fluxo de aeronaves aumenta, a centralizada é aquela que promove uma melhor gestão de conflitos e uma menor quantidade de colisões entre as aeronaves.

Com o intuito de testar diferentes resultados e complementar os cenários analisados, utilizaram-se duas políticas de distribuição, nomeadamente, a igualitária e a com priorização de fluxo, de forma a verificar qual delas promovia uma melhor qualidade de resultados, concluindo que recorrendo à primeira, as taxas de descolagem eram mais baixas, o que permite às infraestruturas aeroportuárias gerirem os seus recursos de uma forma mais adequada.

No documento [45] as atenções centraram-se no impacto da atribuição e da gestão correta dos *slots* de descolagem, tendo por base dois algoritmos específicos e o poder de negociação dos(as) agentes, sendo que os mesmos se distinguem devido aos seguintes factos, nomeadamente:

- **RBS:** Este algoritmo tem como objetivo garantir o cumprimento da sequência de descolagem das aeronaves;

- **Compression:** Este algoritmo permite a alteração da sequência devido, por exemplo, ao cancelamento de algum voo, antecipando todos os outros e, dessa forma, diminuindo o impacto operacional e o financeiro desse cancelamento.

Na Tabela 3.12 é possível efetuar uma rápida comparação entre as características benéficas e as prejudiciais da implementação deste sistema.

Tabela 3.12 – Pontos Fortes e Pontos Fracos do SISCONFLUX

Pontos Fortes	Melhor qualidade de resultados quando comparado com as medidas tomadas exclusivamente por agentes humanos(as). A vasta quantidade de algoritmos faz com que cada um deles possa ser implementado em situações distintas, de acordo com as necessidades existentes. Quantos mais algoritmos forem utilizados numa determinada situação, melhor será a solução obtida. Com as diferentes distribuições produzidas pelos algoritmos é possível gerir o fluxo de tráfego aéreo consoante o grau de congestionamento e de recursos disponíveis em cada TMA. A eficiência das políticas de ajuste de fluxo fornecidas por este método é tanto maior quanto maior for a interação entre os(as) agentes.
Pontos Fracos	Nem todos os algoritmos aplicados produzirão os resultados desejados. Não se encontram retratadas todas as restrições existentes nas TMAs. É necessário implementar diferentes restrições para ir de encontro à distribuição de fluxo de tráfego aéreo desejada. Devido à complexidade da gestão do tráfego aéreo, este modelo não alberga todas as variáveis existentes, apresentando dessa forma lacunas nos resultados produzidos. As bases de dados utilizadas para o estudo e a validação dos algoritmos não contemplam um elevado volume de tráfego como se verifica na realidade do setor. À medida que o conjunto de informações e interações entre os(as) agentes aumenta, surgem restrições ao nível do processamento das mesmas, assim como um aumento do tempo necessário para executar este procedimento.

A partir das fontes documentais utilizadas para construir e analisar a Tabela 3.12, é possível concluir que o SISCONFLUX é uma metodologia que permite promover melhorias em diferentes componentes ligadas ao setor, analisando-as de uma forma geral e procurando gerir o fluxo de tráfego aéreo da melhor forma possível e, por outro lado, focando os seus esforços em algumas componentes de todo este "processo" de forma a que a sua melhoria se traduza num impacto significativo. Os(as) autores(as) citados(as) utilizaram diferentes algoritmos e apesar de todos eles possuírem algumas condicionantes, é inegável a utilidade desta metodologia e o seu carácter benéfico para ultrapassar os obstáculos que surgem nas TMAs.

3.5.2 STVD

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [34], [45], [87] e [88].

O STVD é uma ferramenta computacional de extrema relevância para os(as) controladores(as) de tráfego aéreo.

Recorrendo à utilização da mesma, é possível visualizar informações importantes relativamente aos voos, estejam estes prestes a descolar ou já estando em rota, como por exemplo, os planos de voo e os dados de radar. Por outro lado, tem a capacidade de processar as informações relativas aos movimentos das aeronaves e de prever a evolução do nível de congestionamento do espaço aéreo.

No documento [34] o autor utilizou esta ferramenta, em conjunto com o SYNCROMAX, para melhorar os resultados obtidos pelo SISCONFLUX.

Na Tabela 3.13 é possível efetuar uma rápida comparação entre as características benéficas e as prejudiciais da implementação deste sistema.

Tabela 3.13 – Pontos Fortes e Pontos Fracos do STVD

Pontos Fortes	Quando utilizado em conjunto com o SYNCROMAX, e tendo em atenção as características do SISCONFLUX, torna-se numa ferramenta bastante importante para a gestão do fluxo de tráfego aéreo.
Pontos Fracos	Não tem a capacidade de avaliar a realidade existente de uma perspetiva complexa, isto é, englobando a TMA na totalidade e, por esse motivo, não é possível implementar medidas adequadas para combater as situações de congestionamento. Não dispensa a intervenção do(a) agente humano(a) para a tomada de decisões.

3.5.3 SYNCROMAX

As informações apresentadas seguidamente foram obtidas através de um vasto processo de pesquisa e análise, tendo por base inúmeras fontes bibliográficas, destacando-se as seguintes, [34], [46], [60], [86], [87], [88], [98], [117] e [183].

O SYNCROMAX é uma ferramenta computacional que permite obter a previsão da procura expectável para uma determinada TMA, de forma a prevenir situações de congestionamento, sendo o seu impacto bastante relevante para o planeamento estratégico e pré-tático.

No documento [34] o autor utilizou esta ferramenta, em conjunto com o STVD, para melhorar os resultados obtidos pelo SISCONFLUX e, por esse facto, é possível afirmar que os pontos fortes e os fracos do SYNCROMAX são, na sua grande maioria iguais aos do STVD. Tanto o STVD quanto o SYNCROMAX possuem um grande potencial para a gestão do fluxo de tráfego aéreo, mas a principal lacuna deve-se ao facto de a nível individual não serem capazes de produzir resultados suficientemente realistas. Por esse motivo, estes dois métodos são mais relevantes quando se encontram acoplados ao SISCONFLUX.

Na Tabela 3.14 é possível efetuar uma rápida comparação entre as características benéficas e as características prejudiciais da implementação deste sistema.

Tabela 3.14 – Pontos Fortes e Pontos Fracos do SYNCROMAX

Pontos Fortes	Quando utilizado em conjunto com o STVD, e tendo em atenção as características do SISCONFLUX, torna-se numa ferramenta bastante importante para a gestão do fluxo de tráfego aéreo. Tem a capacidade de disponibilizar informações com o intuito de auxiliarem na tomada de decisão, de forma a determinar medidas para atenderem aos cenários estratégicos, táticos ou operacionais.
Pontos Fracos	Não tem a capacidade de avaliar a realidade existente de uma perspetiva complexa, isto é, englobando a TMA na totalidade e, por esse motivo, não é possível implementar medidas adequadas para combater as situações de congestionamento. Não dispensa a intervenção do(a) agente humano(a) para a tomada de decisões. Na grande maioria das vezes, as decisões tomadas são baseadas nos planos de voo definidos na fase estratégica e, como tal, estes não incluem acontecimentos ocorridos após a descolagem de determinada aeronave, desconsiderando a evolução do fluxo de tráfego aéreo.

3.6 Análise e Síntese das Medidas Implementadas

Após a apresentação e a exemplificação das medidas existentes e recolhidas durante o processo de revisão bibliográfica, surge a necessidade de agrupar os tipos de medidas mais frequentemente implementadas nas ações de rotina da gestão do fluxo tráfego aéreo. De entre os(as) inúmeros(as) métodos e metodologias, e tendo em conta as(os) suas(eus) particularidades e objetivos a que se propõem, é possível criar três conjuntos, nomeadamente:

- **Táticas Específicas:** Agrupa as medidas que apenas possam ser implementadas em momentos e/ou locais específicos das operações de tráfego aéreo. Isto significa que não podem ser implementadas sem uma análise adequada dos(as) agentes, tendo em conta que se forem definidas sem cumprirem estes requisitos, colocarão em causa o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. De entre as diversas medidas existentes destacam-se as medidas em terminal e em rota;
- **Táticas Globais:** Têm como principal objetivo lidar com situações inesperadas, o que significa que a sua implementação, apesar de ponderada como qualquer outra medida, tenta minimizar os desequilíbrios e/ou as situações que afetam o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo de forma geral e que, no seu limite, colocam em causa a segurança de todos(as). De entre as diversas medidas existentes destacam-se as medidas estratégicas, as que combatem a redução de capacidade, as que combatem atrasos e as que combatem a imprevisibilidade das condições meteorológicas;
- **Táticas Transversais:** Independentemente do momento temporal, do local em que determinada aeronave se encontra, ou do conjunto de situações inesperadas que ocorrem diariamente, existe um vasto conjunto de medidas que podem ser utilizadas na rápida e adequada resolução destas situações, não se encontrando restritas apenas a uma das duas classificações citadas anteriormente. O GDP é uma das principais medidas classificadas como táticas transversais, visto que é uma medida aplicada em terminal, mas que, na grande maioria das vezes, é definida de forma a tentar resolver possíveis desequilíbrios entre a procura e a oferta em uma determinada TMA.

De entre as três classificações referidas anteriormente, a escolha da implementação de alguma TMI deverá recair na grande maioria das vezes em medidas transversais de forma a evitar a aplicação simultânea de diversas TMIs que poderão, de alguma forma, entrar em conflito e diminuir drasticamente o intuito da sua utilização.

Por outro lado, é importante salientar que todas as TMIs têm as suas vantagens e desvantagens e, por esse motivo, as suas limitações deverão merecer especial atenção de forma a que seja garantido que a sua implementação não trará um impacto negativo que seja insustentável e/ou inaceitável em determinado momento.

Apesar do carácter benéfico da implementação de medidas que facilitam e/ou auxiliam uma adequada gestão do fluxo de tráfego aéreo, caso seja atribuída a uma determinada aeronave mais do que uma medida restritiva, a TMI que terá prioridade deverá ser escolhida de acordo com a extensão do impacto que a mesma provocará em termos de atraso para toda a trajetória, não só desta aeronave como para as demais. A combinação de várias TMIs pode ter um impacto negativo, tendo em conta as características individuais de cada uma e o conflito que pode surgir da sua interação, como por exemplo, a implementação do GDP e do SWAP em momentos do dia em que as condições meteorológicas são desfavoráveis. Apesar do GDP ser uma das medidas mais usuais atualmente, ao implementá-la em simultâneo com o SWAP, acabará por imputar atrasos a todas as aeronaves que se encontrem numa determinada TMA, mesmo àquelas que não sofrerão qualquer alteração nas suas operações, tendo em conta as suas rotas.

Devido ao constante crescimento dos estudos desenvolvidos neste âmbito, surgem naturalmente com alguma frequência, inúmeras medidas e/ou ferramentas que procuram resolver as lacunas das TMIs. As principais medidas e/ou ferramentas reunidas através do processo de revisão bibliográfica e que não foram anteriormente detalhadas encontram-se devidamente listadas, por ordem alfabética, no Anexo A deste trabalho de investigação [12, 18, 19, 25, 32, 35, 36, 41, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 55, 57, 58, 61, 62, 63, 65, 66, 68, 69, 70, 71, 76, 80, 83, 90, 93, 98, 99, 100, 106, 110, 111, 120, 127, 132, 134, 135, 136, 139, 143, 144, 148, 149, 150, 151, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 168, 169, 170, 175, 176, 179, 183, 185, 186, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236].

Apesar das particularidades das TMIs apresentadas no Anexo A deste trabalho de investigação, existe um vasto conjunto de problemas e/ou lacunas que poderão colocar em causa o seu carácter benéfico, encontrando-se apresentados(as) por ordem alfabética, nomeadamente [85]:

- A disponibilização e partilha de informações entre os(as) agentes pode ser prejudicada pela falta de transparência e/ou cooperação entre eles(as);
- As decisões tomadas pelos(as) agentes nem sempre prezam a coordenação entre os(as) mesmo(as) e os objetivos comuns a todos(as);

- Nem sempre os(as) agentes procuram atingir a otimização das suas tarefas e/ou das ferramentas, menosprezando a utilidade de algumas TMIs;
- Nem sempre os dados utilizados pelos(as) agentes representam a amostra mais fidedigna e relevante;
- Os problemas são, muitas vezes, de carácter demasiado estocástico e qualitativo, diminuindo a facilidade da sua identificação e consequente resolução;
- Poderão ocorrer discrepâncias e até mesmo consequências graves, caso as decisões sejam tomadas com base na intuição de pelo menos um(a) agente;
- Quando as restrições são aplicadas com uma elevada antecedência poderão promover efeitos negativos, podendo causar outro tipo de restrições e afetar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo;
- Uma previsão incorreta da procura poderá resultar, consequentemente, numa aplicação inadequada de medidas restritivas, pois apesar da intenção ser positiva poderá prejudicar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

De acordo com os problemas descritos anteriormente, independentemente da classificação realizada e da variedade de métodos e/ou ferramentas existentes, a escolha de uma ou mais TMIs deverá respeitar os seguintes critérios genéricos e fulcrais que se encontram apresentados por ordem alfabética, nomeadamente [141, 183]:

- Ajustar e otimizar as rotas efetuadas pelas aeronaves, garantindo que as trajetórias planeadas são cada vez mais compatíveis com as trajetórias reais;
- Assegurar uma constante evolução e capacidade de aperfeiçoamento para tornar a gestão do fluxo de tráfego aéreo uma tarefa cada vez menos problemática;
- Aumentar a capacidade de utilização das TMAs;
- Aumentar a eficiência e a eficácia das TMIs selecionadas, promovendo resultados cada vez mais adequados para cada situação;
- Capacidade de formular e sugerir cenários alternativos consoante as circunstâncias verificadas em cada momento;
- Capacidade de minimização das assunções sem qualquer comprovação para basear qualquer tipo de afirmação, reduzindo a probabilidade de ocorrência de erros;
- Controlar e conhecer, em cada momento, os custos referentes à implementação de cada uma das medidas definidas;
- Controlar e/ou diminuir o impacto negativo da atividade desenvolvida pelo setor do transporte aéreo para o ambiente;
- Cumprir todos os objetivos a que se propõem, sejam eles individuais de cada agente e/ou comuns a todo o setor;
- Diminuir a probabilidade da seleção e da implementação de medidas táticas e, consequentemente, privilegiando as medidas estratégicas;

- Domínio e capacidade de evolução, de forma gradual e coordenada, dos(as) agentes responsáveis pelo desenvolvimento das tecnologias, de forma a formularem ferramentas cada vez mais precisas e auxiliarem os(as) utilizadores(as) no período de transição;
- Encontrar o melhor equilíbrio entre a importância da tomada de decisão dos(as) agentes e a automatização das ferramentas ao dispor de todos(as);
- Evitar a propagação de atrasos que afetem o normal funcionamento das operações de tráfego aéreo;
- Garantir a eficácia da resolução do problema;
- Garantir a segurança das operações de tráfego aéreo;
- Garantir o seu desenvolvimento de forma economicamente eficiente, salvaguardando a importância da manutenção e/ou o aumento dos níveis de segurança da sua utilização;
- Melhorar a gestão e a organização entre as descolagens e as aterragens de aeronaves em uma determinada infraestrutura aeroportuária;
- Melhorar a previsibilidade de todas as situações que possam, de alguma forma, alterar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo;
- Permitir a elaboração de um planeamento cada vez mais fidedigno e compatível com a realidade existente;
- Prever com a maior antecedência possível, as situações que podem ser originadas por variáveis que possuem um elevado grau de incerteza, nomeadamente, no que diz respeito às condições meteorológicas;
- Rapidez na resolução do problema;
- Reduzir a carga de trabalho imputada a cada agente;
- Respeitar as restrições e/ou regulamentações cujo respeito e/ou implementação é obrigatório(a) a nível nacional, regional e até mesmo mundial;
- Salientar a experiência dos(as) agentes como fator chave para a utilização da TMI e para a interpretação dos dados gerados pela mesma, auxiliando na tomada de decisão;
- Satisfazer os(as) agentes e os(as) utilizadores(as) deste meio de transporte;
- Utilizar as ferramentas necessárias à implementação de cada medida definida.

3.7 Discussão

O forte e rápido crescimento do setor do transporte aéreo tem impulsionado o interesse e a necessidade por parte de diferentes autores(as) para a análise, a criação e o desenvolvimento de métodos e metodologias que consigam lidar, da melhor forma possível, com a realidade da evolução e das alterações inesperadas do fluxo de tráfego aéreo. A variedade de métodos e metodologias revelam as inúmeras especificidades que, muitas vezes, os(as) limitam e que impossibilitam a sua utilização em determinados estudos. Por esse motivo, a seleção do método e/ou da metodologia adequado(a) para cada situação deverá ser um processo efetuado de forma consciente com o intuito de garantir os resultados desejados e, se necessário, poderão ser combinados(as) vários(as) métodos ou metodologias para cada situação específica.

Inevitavelmente, os esforços aplicados pelos(as) autores(as) e entidades, terão tendência a criar um(a) ou mais métodos ou metodologias que consigam aliar o grau adequado de detalhe que retrate de forma apropriada a situação em análise, podendo ser aplicado(a) com a antecedência pertinente que permita a sua implementação e que evite as situações de congestionamento e, por fim, que fumente o carácter tático dos(as) mesmos(as), salvaguardando uma atenção constante e contínua por parte dos(as) agentes.

Apesar da ampla diversidade citada anteriormente, as medidas poderão ser classificadas de acordo com os modelos através dos quais foram construídas, existindo três formas de classificação. Estas classificações auxiliam na complexa tarefa de agrupar os modelos, de analisar as suas características intrínsecas e de identificar o seu carácter benéfico de acordo com as situações em que podem ser aplicados. Os parâmetros de classificação destes modelos centram-se no grau de minuciosidade, na antecedência e no intuito da sua aplicação, sendo necessário analisar previamente estes parâmetros antes de ser selecionado um ou mais modelos.

Independentemente do modelo selecionado e da medida decorrente dessa escolha, salienta-se uma vez mais a necessidade de uma colaboração estreita entre os(as) agentes envolvidos(as) em cada tarefa, sendo fulcral a sua correta identificação, em primeiro lugar, e posteriormente, o reconhecimento dos objetivos individuais e comuns, salientando que os objetivos comuns deverão ser destacados, mas, em contrapartida, os objetivos individuais não poderão ser desvalorizados e/ou ignorados.

De entre as seis classificações apresentadas no subcapítulo 3.2, os programas que geram diferentes medidas destacam-se das demais precisamente pela capacidade intrínseca da conjugação e da união do caracter benéfico de várias TMIs que, dessa forma, poderão lidar de forma mais adequada com a realidade vivenciada em cada momento, assim como pelo potencial de ultrapassarem as limitações encontradas, em termos individuais, em cada TMI.

Uma das principais lacunas detetadas em diferentes TMIs analisadas durante o processo de revisão bibliográfica centra-se, principalmente, na dedicação e na concentração de medidas que tentam lidar com a problemática de forma atempada, evitando a ocorrência de situações de congestionamento através da implementação de medidas, em diferentes fases de voo, que impeçam a ocorrência desse evento aquando da aproximação das aeronaves nas TMAs.

Por esse motivo, destaca-se a necessidade da criação e/ou adaptação de medidas que lidem diretamente com as situações de constrangimento e/ou saturação nas TMAs e que possam, rápida e eficazmente, minimizar os problemas detetados e salvaguardar a segurança das operações de tráfego aéreo. De entre as duzentas e vinte e duas medidas auxiliares apresentadas no Anexo A deste trabalho de investigação é possível verificar uma forte tendência das mesmas para lidarem com alguns aspetos específicos que originam potenciais situações de congestionamento, encontrando-se apresentados por ordem alfabética, nomeadamente:

- A alocação adequada dos *slots* disponíveis em cada infraestrutura aeroportuária;

- A necessidade de evitar a ocorrência de conflitos entre as aeronaves;
- A previsão da ocorrência de condições meteorológicas adversas;
- A previsão da ocorrência de momentos de pico;
- O controlo da dimensão e das consequências dos atrasos registados em voo e no solo;
- O controlo do nível de congestionamento na superfície da infraestrutura aeroportuária;
- O sequenciamento das aterragens e das descolagens das aeronaves.

Apesar de todas as metas acima listadas serem fundamentais para o acompanhamento e a garantia do normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, é necessário que ocorra um investimento, seja através de recursos físicos, económicos e/ou académicos, para a construção de uma ou mais medidas que lidem diretamente com a ocorrência de situações de saturação em particular das TMAs pois, independentemente das medidas que possam ser implementadas durante o plano de voo, esta é a zona que despoleta uma maior preocupação nos dias de hoje devido à gravidade das consequências verificadas.

Por outro lado, é imprescindível que os(as) agentes tenham conhecimento de que estas situações ocorrerão, pois, nenhuma medida terá a capacidade de evitá-las, na totalidade, sendo por isso essencial a consciencialização de todos(as) e a respetiva preparação para que possam lidar, da melhor forma possível, de acordo com os recursos existentes em cada TMA e, complementarmente, alertar para o facto de que poderão ser verificadas situações inesperadas e/ou de emergência a qualquer momento.

Adicionalmente, e apesar de ser não ser um foco do presente trabalho de investigação, como já foi referido no Capítulo 1, seria importante, para um trabalho futuro, ter em consideração a resiliência das redes em análise especialmente em circunstâncias inesperadas e/ou improváveis, como por exemplo, situações de emergência, avarias e/ou incidentes de aeronaves na pista da infraestrutura aeroportuária, entre outros.

Capítulo 4

Modelação pelas Cadeias de Markov

Recordando as inúmeras medidas listadas e apresentadas no Anexo A deste trabalho de investigação, no que diz respeito às metodologias de previsão, existem inúmeros exemplos que procuram resolver os problemas do dia a dia de diversos setores. Todas elas possuem as suas especificidades e, consequentemente, as suas vantagens, sendo a sua seleção efetuada consoante estes parâmetros e a utilidade para cada estudo. Apesar desta variedade, a Teoria das Cadeias de Markov é uma das principais metodologias que tem sido desenvolvida e melhorada de forma a originar soluções cada vez mais compatíveis com os problemas identificados no Mundo.

As Cadeias de Markov foram denominadas desta forma devido ao responsável pelo seu desenvolvimento e pela sua implementação, em 1907, o Professor Andrei Andreevich Markov [1856-1922] [237, 238]. Por outro lado, é possível definir as Cadeias de Markov como sendo um caso especial dos modelos estocásticos que possuem um parâmetro denominado por Propriedade de Markov [239, 240]. A Propriedade de Markov, também denominada por vários(as) autores(as) como Propriedade Markoviana, é um conceito que representa a distribuição da probabilidade condicional de um determinado estado no futuro, tendo em conta o estado em que se encontra anteriormente, dependendo apenas do estado presente e não do passado [237, 241].

De forma bastante simplificada, é possível descrever a modelação pelas Cadeias de Markov como sendo um processo dinâmico e aleatório em que toda a informação sobre o futuro de uma determinada rede dinâmica está contida em um determinado estado presente [237, 242, 241]. Em outras palavras, significa que conhecendo o estado presente, aliado a um histórico de dados, é possível prever o comportamento da rede dinâmica criada, não se encontrando o comportamento futuro dependente do comportamento passado. Desta forma, é possível caracterizar este processo de modelação como sendo um processo "sem memória". Realça-se, porém, que, apesar do processo ser caracterizado e denominado desta forma, é importante salientar que a informação do presente de uma determina rede dinâmica contém, de forma implícita, o impacto e a relevância da informação do passado dessa mesma rede dinâmica.

O presente capítulo é constituído por seis subcapítulos, sendo que cada um deles será apresentado de forma resumida. O subcapítulo 4.1 apresenta os conceitos teóricos que envolvem a criação de uma determinada Cadeia de Markov. O subcapítulo 4.2 descreve os tipos de Cadeias de Markov. O subcapítulo 4.3 descreve a metodologia para a realização da previsão do comportamento futuro de determinado fenómeno. O subcapítulo 4.4 apresenta alguns dos exemplos recolhidos através do processo de pesquisa onde a aplicabilidade das Cadeias de Markov se revelou bastante benéfica e interessante para a gestão do fluxo de tráfego aéreo.

O subcapítulo 4.5 inicia a criação de diversas redes dinâmicas que serão personalizadas de acordo com o histórico recolhido relativamente à TMA de Lisboa. O subcapítulo 4.6 condensa os principais pontos analisados durante o Capítulo 4 e sugere medidas benéficas consequentes da análise crítica efetuada durante a sua redação.

4.1 Princípios das Cadeias de Markov

As Cadeias de Markov têm a capacidade de modelarem a sequência de um conjunto de variáveis aleatórias, sendo que essas variáveis representam os estados que constituem uma determinada rede dinâmica [238]. De forma simplificada, e apesar desta metodologia ser aplicada em problemas de complexidades diversas, é possível, através de um exemplo prático, demonstrar a sua relevância e simplicidade. Tendo em conta o contexto deste trabalho de investigação, imaginemos as operações verificadas em uma determinada TMA, nomeadamente, as aterragens e as descolagens. Através da análise diária das operações verificadas, é possível verificar que em um determinado período de tempo, podem ocorrer aterragens e/ou descolagens, sendo a probabilidade de ocorrência superior a zero em qualquer uma das situações. A partir da análise deste simples exemplo podem surgir algumas questões relevantes, nomeadamente [243]:

- Qual será a probabilidade de o fluxo de tráfego aéreo permanecer com uma determinada densidade durante um determinado período de tempo?
- Qual será a probabilidade de o fluxo de tráfego aéreo ser adequadamente gerido sem promover atrasos e/ou filas de espera?
- Qual será a probabilidade de o fluxo de tráfego aéreo sofrer uma alteração abrupta, nomeadamente, uma redução ou um acréscimo inesperada(o)?
- Qual será a probabilidade de ser verificada, em pelo menos um momento, uma situação de congestionamento do fluxo de tráfego aéreo?

As respostas às questões listadas anteriormente poderão ser obtidas através da aplicação da Teoria das Cadeias de Markov, visto que o comportamento do fluxo de tráfego aéreo depende da situação verificada no presente e, dessa forma, conhecendo o setor na atualidade é possível prever a sua variação a um curto, médio e/ou longo prazo.

Tendo em conta o carácter estocástico das Cadeias de Markov e a pretensão de analisar e de prever o comportamento de uma determinada rede dinâmica, é possível afirmar que a mesma é descrita por um conjunto de variáveis e características intrínsecas (Equação 4.1).

$$X_n \tag{4.1}$$

De forma a prever esse comportamento, é necessário definir um conjunto de estados que, apesar de representarem um conjunto finito de situações, deverá ser suficientemente detalhado para fornecer uma resposta útil e em concordância com a complexidade verificada na rede dinâmica em análise (Equação 4.2).

Esta escolha deverá ser ponderada e adequada, pois um número reduzido de estados, apesar de facilitar a modelação, não terá a capacidade de representar a realidade da rede dinâmica e, em contrapartida, um número elevado de estados, apesar de representar a realidade da mesma, irá dificultar a sua modelação.

$$n = 1, 2, 3, \ldots \tag{4.2}$$

Os estados são constituídos, inevitavelmente, por variáveis, sendo que estas, apesar de poderem ser numéricas ou não numéricas, deverão ser numéricas de forma a facilitarem a sua interpretação e análise. Por outro lado, as variáveis selecionadas para cada estado poderão ser classificadas da seguinte forma, nomeadamente [244]:

- **Discretas**: Representam uma variável cuja quantificação permite, facilmente, determinar o seu impacto em cada momento, tratando-se de uma cadeia finita, como por exemplo, o número de aeronaves que entram em uma determinada TMA, num horário pré-definido e em um dia concreto;
- **Contínuas**: Representam uma variável cuja quantificação se torna mais complexa pelo facto de sofrer alterações, de forma constante, em diferentes momentos, tratando-se de uma sequência infinita, como por exemplo, o número de aeronaves que entram em uma determinada TMA ao longo de um determinado período de tempo.

Antes de serem analisados os diferentes parâmetros que permitem criar e analisar uma Cadeia de Markov, é necessário apresentar a sua distribuição inicial (π^0), sendo fulcral para que seja possível antever o comportamento da rede dinâmica ao longo do tempo (Equação 4.3).

$$\pi^0(i) = P(X_0 = i) \tag{4.3}$$

Esta distribuição inicial é representada, frequentemente, em formato de vetor e retrata as probabilidades de ocorrência de cada estado, sendo esta probabilidade uma probabilidade não condicional no presente momento. A partir deste estado inicial, o processo irá mover-se, ao longo da rede dinâmica, através dos estados que a compõem.

Sabendo que, ao longo do tempo, o processo em análise irá transitar entre os estados definidos, é importante definir a probabilidade de transição do estado *i* para o estado *j* (P_{ij}), reconhecendo que esta transição representa uma probabilidade condicional, pois terá em consideração o estado anterior para prever qual será o estado seguinte (Equação 4.4).

$$P_{ij} = P(X_{n+1} = j | X_n = i) \tag{4.4}$$

Salienta-se uma vez mais que a probabilidade da rede dinâmica se encontrar no estado *j* no instante *n+1* depende apenas do estado em que a mesma se encontrava no instante *n*, sem qualquer dependência do histórico registado neste processo que antecedeu o instante *n*. Desta forma, é possível obter a definição do conceito de Processo de Cadeia de Markov.

Por outro lado, no que diz respeito à probabilidade de transição, é importante salvaguardar as duas condições apresentadas na Equação 4.5. Em primeiro lugar, caso não ocorra transição entre os estados será impossível prever o comportamento do sistema [242]. Em segundo lugar, a análise geral do comportamento durante um determinado período de tempo deverá representar a totalidade das transições ocorridas entre os estados, não podendo o seu somatório ser diferente de um, caso contrário a rede dinâmica construída não estará completa, pois não representará a totalidade do comportamento registado pela mesma [245].

$$P_{ij} \geq 0$$

$$\sum_{j=0}^{\infty} P_{ij} = 1 \tag{4.5}$$

De forma simplificada, as probabilidades de transição entre os estados da rede dinâmica podem ser representadas sob a forma de uma matriz, sendo a mesma denominada por Matriz de Probabilidade de Transição (P) (Equação 4.6).

$$P = \begin{bmatrix} P_{00} & P_{01} & \cdots \\ P_{10} & P_{11} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \tag{4.6}$$

O número de parâmetros presentes na Matriz de Probabilidade de Transição é proporcional à fiabilidade dos resultados promovidos pela Teoria das Cadeia de Markov, mas, em contrapartida, quanto maior for a quantidade de parâmetros, maior será o grau de descontentamento e desmotivação dos(as) autores(as) que recorrem a estes modelos matemáticos [239]. Uma das principais características que pode ser observada através da Matriz de Probabilidade de Transição é o facto da mesma poder ou não variar de acordo com o período de tempo em análise. Caso as probabilidades de transição entre os estados não dependam do tempo n, então significa que se trata de uma Cadeia de Markov Estacionária. Aliando a Equação 4.5 e a Equação 4.6, é importante salientar que a validade desta matriz só será verificada se o somatório em cada linha for igual a um, representando dessa forma o universo de probabilidades de transição através de cada estado que compõe a rede dinâmica em análise.

Por outro lado, é importante salientar que, até ao momento, se destacam os conceitos mais simplificados das Cadeias de Markov de primeira ordem, sendo que este conceito poderá ser extrapolado e, dessa forma, aproximar-se-á cada vez mais da realidade. Na situação inicial é analisada apenas a probabilidade de transição do estado i para o estado j, ocorrendo a transição direta entre estes dois estados, sendo que nas Cadeias de Markov mais complexas é possível obter essa mesma probabilidade após n transições adicionais ao longo da rede dinâmica em análise e contemplando o conjunto total de estados (M) (Equação 4.7).

$$P_{ij}^{(n+1)} = \sum_{k=0}^{M} P_{ik}^{(n)} P_{kj} \tag{4.7}$$

Para além da Matriz de Probabilidade de Transição é também possível construir a Matriz de Transição de Estados (N) que permite quantificar o número de transições verificadas entre os estados que compõem a rede dinâmica (Equação 4.8).

$$N = \begin{bmatrix} n_{00} & n_{01} & \cdots \\ n_{10} & n_{11} & \cdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

Através da correta construção da Matriz de Probabilidade de Transição é possível antever o comportamento da rede dinâmica, tendo em conta que o raciocínio aplicado é, de forma simplificada, o cálculo de uma probabilidade condicional que tem em consideração apenas dois aspetos, nomeadamente, o estado inicial e o final. Dessa forma, a previsão pode ser obtida através do produto entre uma linha e uma coluna da Matriz de Probabilidade de Transição, sendo esta expressão conhecida por Equação de Chapman-Kolmogorov (Equação 4.9). De forma simplificada, é possível determinar a probabilidade da rede dinâmica em análise transitar do estado i para o estado j, tendo em conta que transitará, de forma intermédia, através do estado k e, como tal, representará a relação entre a probabilidade de transição do estado i para o estado k, assim como, a probabilidade de transição do estado k para o estado j. A transição descrita anteriormente ocorrerá ao longo de várias etapas, sendo este valor elevado.

$$P_{ij}^{(n)} = \sum_{k=0}^{M} P_{ik}^{(m)} P_{kj}^{(n-m)} \tag{4.9}$$

Salienta-se que a aplicação da Equação de Chapman-Kolmogorov ocorre quando se pretende calcular a probabilidade de transição de forma individual para cada um dos elementos que contempla a Matriz de Probabilidade de Transição e, adicionalmente, a sua utilidade torna-se substancialmente imprescindível quando se efetua a análise de uma determinada rede dinâmica ao longo de n etapas, sendo esse número de etapas relativamente elevado.

Consequentemente, é possível calcular as probabilidades de transição de uma determinada rede dinâmica em n etapas, tal como se encontra exemplificado na aplicação da Equação 4.10 que tem como intuito prever as probabilidades de transição na etapa n=2.

$$P^2 = P.P \tag{4.10}$$

Complementarmente à informação expressa na Equação 4.8 e na Equação 4.9, através do cálculo da distribuição de probabilidades estacionária será possível determinar a tendência do comportamento a um médio ou longo prazo da rede dinâmica em análise.

Dessa forma, será possível obter os valores estacionários de cada estado que compõe uma determinada rede dinâmica (Equação 4.11), tendo em especial atenção a informação expressa na Equação 4.12 e contemplando o conjunto total de estados (S) [245].

$$\pi_i = \sum_{j \in S} \pi_j P_{ij} \tag{4.11}$$

$$\sum_{j \in S} \pi_j = 1 \tag{4.12}$$

Recorrendo à aplicação da determinação da distribuição de probabilidades estacionária tornará o processo mais simplificado, evitando a realização de inúmeras interações da Matriz de Probabilidade de Transição, otimizando, em termos de rapidez, a obtenção da verificação dos valores para os quais cada estado converge. Reconhecendo a importância desta capacidade de previsão, a mesma poderá ser aprimorada, caso seja possível determinar a distribuição de probabilidades dos estados (π^n) que compõem a rede dinâmica no instante de interesse. Esse elemento é calculado através do produto entre a distribuição inicial de probabilidades dos estados e a respetiva Matriz de Probabilidade de Transição para o instante em análise (Equação 4.13).

$$\pi^n = \pi^0 P^n \tag{4.13}$$

Comparando a aplicabilidade e a utilidade entre a Equação 4.9 e a Equação 4.13, é possível afirmar que, tendo em conta as características intrínsecas das redes dinâmicas analisadas e, essencialmente, a elevada capacidade de cálculo recorrendo a ferramentas informáticas, a Equação de Chapman-Kolmogorov é utilizada com uma menor regularidade.

Após a definição e análise dos estados pré-estabelecidos, é importante classificá-los de acordo com os seguintes conceitos, nomeadamente [238, 241, 245, 246, 247]:

- **Estado Alcançável ou Acessível**: Diz-se que o estado *j* é alcançável a partir do estado *i* se a probabilidade de transição do estado *i* para o estado *j* for superior a zero, isto é, se é possível entrar no estado *j*, partindo do estado *i*, através de um determinado número finito de transições (Equação 4.14);

$$P_{ij}^{(n)} > 0 \tag{4.14}$$

- **Estado Comunicável**: Diz-se que o estado *i* e o estado *j* são comunicáveis se o estado *i* e o estado *j* forem alcançáveis ou acessíveis entre si. Através deste conceito surgem diferentes tipos de estados comunicáveis que deverão ser reconhecidos, nomeadamente:
    - O estado *i* poderá comunicar com ele próprio, validando a condição reflexiva (Equação 4.15);

$$P_{ii} > 0 \tag{4.15}$$

- Se o estado i comunicar com o estado j então o estado j comunica com o estado i, validando a condição simétrica;
- Quando a condição simétrica não é validada, significa que o estado i pode ser considerado um estado não essencial para a rede dinâmica (Equação 4.16);

$$\begin{aligned} P_{ij} &> 0 \\ P_{ji} &= 0 \end{aligned} \tag{4.16}$$

- Se o estado i comunicar com o estado j e o estado j comunicar com o estado k então o estado i comunica com o estado k, validando a condição transitiva;
- O estado i é classificado como recorrente ou persistente quando uma determinada rede dinâmica se inicia nesse estado em um determinado instante e, nos instantes seguintes, volta a passar pelo mesmo estado (Equação 4.17);

$$f_i = 1 \tag{4.17}$$

- Tendo em conta a presença de um estado i classificado como recorrente ou persistente, é imprescindível descrever a forma de cálculo do tempo médio de recorrência esperado, de forma a determinar se a rede dinâmica voltará ao estado i com alguma brevidade ou não (Equação 4.18);

$$\mu_{ii} = \frac{1}{\pi_i} \tag{4.18}$$

- O estado i é classificado como transiente quando uma determinada rede dinâmica não pode regressar ao mesmo estado, o que significa que se a rede dinâmica transitar do estado i para o estado j, não regressará ao estado i (Equação 4.19);

$$f_i < 1 \tag{4.19}$$

- Se um determinado estado for classificado como recorrente ou persistente não poderá ser, simultaneamente, classificado como sendo um estado transiente;
- Se o estado i é classificado como recorrente ou persistente e se comunica com o estado j, então o estado j também é classificado como recorrente ou persistente;
- Se o estado i é classificado como transiente e se comunica com o estado j, então o estado j também é classificado como transiente;
- Se todos os estados de uma determinada rede dinâmica forem comunicáveis, então todos eles serão recorrentes ou transientes;
- O estado i é classificado como absorvente se, a partir do instante em que uma determinada rede dinâmica atinge esse estado, não for capaz de transitar para qualquer outro estado. Em outras palavras, é possível afirmar que um estado absorvente é, por sua vez, recorrente (Equação 4.20);

$$P_{ii} = 1 \tag{4.20}$$

- O período do estado i é o maior divisor comum e representa a frequência com que uma determinada rede dinâmica pode voltar ao estado i ao longo do tempo (Equação 4.21). Se, porventura, essa probabilidade de transição for nula, então o período também será (Equação 4.22). Salienta-se que estados comunicáveis possuem o mesmo período;

$$P_{ii} > 0 \qquad d(i) > 0 \tag{4.21}$$

$$P_{ii} = 0 \qquad d(i) = 0 \tag{4.22}$$

- Se dois estados comunicam entre si, significa que pertencem à mesma classe.

No seguimento da definição do conceito de estados comunicáveis, caso todos os estados de uma determinada rede dinâmica pertençam à mesma classe, significa que a Cadeia de Markov em análise é denominada por irredutível. Esta característica é facilmente percetível através da análise da Matriz de Probabilidade de Transição, nomeadamente, mediante a observação de valores nulos na transição entre dois estados e recordando a condição transitiva apresentada anteriormente. Por outro lado, uma determinada Cadeia de Markov é irredutível quando a rede dinâmica consegue transitar ao longo de todos os estados que a compõem.

É importante salientar que tanto a definição e a representação dos estados, assim como o cálculo da probabilidade de transição entre os mesmos, representam parâmetros fundamentais e essenciais para que a Cadeia de Markov possa prever o comportamento da rede dinâmica em análise, sendo que os parâmetros em análise são obtidos através da observação cuidada e frequente do normal funcionamento de cada rede dinâmica [240]. Tanto as probabilidades de transição de estados, quanto a respetiva matriz, podem ser identificadas como sendo os parâmetros fulcrais para a verificação de alterações dinâmicas que poderão ser verificadas na rede dinâmica ao longo do tempo.

De qualquer forma, é necessário salientar que independentemente da validade de uma rede dinâmica construída através da Teoria das Cadeias de Markov, nem sempre a mesma será uma ferramenta útil para a previsão do comportamento dessa mesma rede dinâmica, dependendo este objetivo das variáveis complementares que poderão ser associadas à mesma.

A análise efetuada anteriormente permite verificar se uma determinada Cadeia de Markov pode ser considerada como ergódica, pois esta classificação permite verificar se existe uma distribuição limitada na rede dinâmica em análise. Resumindo a análise efetuada até ao momento, esta verificação pode ser dividida em três parâmetros, nomeadamente, Cadeia de Markov Irredutível, Cadeia de Markov de Periodicidade e Estados Recorrentes e Transientes [243].

A verificação do carácter ergódico de uma determinada rede dinâmica, permite concluir que esta terá uma tendência, a médio ou longo prazo, a estacionar, o que significa que a distribuição de probabilidade dos estados terá tendência a ser constante ao longo do tempo [248].

Por fim, é fundamental explicar em que medida as Cadeias de Markov permitem otimizar o fluxo de tráfego aéreo, sendo um dos principais objetivos da realização do presente trabalho de investigação. A sua aplicação permite a obtenção de uma solução ótima para a gestão do nível de ocupação da TMA de Lisboa, maximizando o fluxo de tráfego aéreo com o intuito de satisfazer a procura registada, mas salvaguardando o nível de segurança operacional pretendido a qualquer momento e, simultaneamente, minimizando os atrasos verificados nas operações de tráfego aéreo. Esta otimização é conseguida através da análise da dinâmica verificada no fluxo de tráfego aéreo registado e da identificação de padrões de procura, sendo dessa forma possível analisar a variação do congestionamento do fluxo de tráfego aéreo ao longo do tempo.

De forma prática, o processo de otimização está intimamente ligado à capacidade de compreender e manipular, de forma adequada, a estrutura e a relevância da Matriz de Probabilidade de Transição pois, através da imposição de alterações nesta matriz, poderão ser obtidas diferentes respostas na observação da rede dinâmica em estudo.

4.2 Descrição dos Tipos de Cadeias de Markov

Tendo em conta o carácter benéfico e transversal da aplicação da Teoria das Cadeias de Markov em inúmeras áreas, ao longo do tempo foram desenvolvidos diferentes tipos, com o intuito de lidarem, da melhor forma possível, com diferentes realidades e auxiliando na obtenção de diferentes resultados. Por esse motivo, a Tabela 4.1 condensa os tipos de Cadeias de Markov de forma a descrever, teórica e resumidamente, o seu interesse matemático e prático.

Tabela 4.1 – Tipos de Cadeias de Markov [238, 240, 248, 249, 250, 251]

	Principais Características
Cadeias de Markov Discretas	A modelação deste tipo de Cadeias de Markov decorre ao longo de um período de tempo finito e contável. Desta forma, será possível representar de forma clara e correta a evolução de uma determinada rede dinâmica ao longo do tempo. Por outro lado, as probabilidades de transição entre os estados que compõem determinada rede dinâmica são constantes ao longo do tempo. Tendo em conta as suas características, este tipo de Cadeia de Markov é denominado como Processo Estocástico. A análise do subcapítulo 4.1 caracteriza, de forma mais aprofundada, este tipo de Cadeias de Markov, sendo o foco deste trabalho de investigação.

	Principais Características
Cadeias de Markov Contínuas	Este tipo de Cadeias de Markov analisa a variável temporal de forma contínua, representando instantes ou momentos, em vez de períodos de tempo, como no caso das Cadeias de Markov Discretas. A rede dinâmica construída com recurso às Cadeias de Markov Contínuas tem como principal intuito analisar o tempo gasto em cada estado e, consequentemente, a distribuição de transições entre os estados. Desta forma, em vez de analisar a ocorrência de um determinado evento em um determinado instante, como ocorre nas Cadeias de Markov Discretas, as Cadeias de Markov Contínuas analisam um determinado intervalo de tempo. A determinação do tempo que uma determinada rede dinâmica permanece em cada estado que a compõe é um aspeto bastante relevante para este tipo de Cadeia de Markov. Ao contrário das Cadeias de Markov Discretas, existem dois parâmetros que facilmente as distinguem dos demais tipos, em primeiro lugar, o somatório de cada linha que compõe a Matriz de Probabilidade de Transição é igual a zero; em segundo lugar, não existe a representação da possibilidade de cada estado transitar para ele mesmo. Tendo em conta as suas características, este tipo de Cadeias de Markov é denominado como Processo de Poisson.
Cadeias de Markov Escondidas	As Cadeias de Markov Escondidas não permitem ter um acesso direto aos estados que compõem cada rede dinâmica em análise. Neste tipo de Cadeias de Markov, cada rede dinâmica é constituída por dois tipos de estados, nomeadamente, os observáveis e os escondidos e, por este facto, é impossível identificar uma correspondência clara e concreta entre eles, o que significa que é impossível determinar, de forma precisa, qual deles será verificado com maior probabilidade. Tendo em conta as suas características, este tipo de Cadeias de Markov é denominado como Processo Duplamente Estocástico.

Complementarmente à Tabela 4.1, a Tabela 4.2 apresenta, de forma genérica, a utilidade dos diferentes tipos de Cadeias de Markov, de acordo com o contexto em que são aplicados.

Tabela 4.2 – Utilidade dos Diferentes Tipos de Cadeias de Markov [238, 240, 248, 249, 250, 251]

	Utilidade dos Diferentes Tipos de Cadeias de Markov
Cadeias de Markov Discretas	Apesar de surpreendente, vários(as) autores(as) consideram este tipo de Cadeias de Markov como sendo mais complexo, comparativamente às Cadeias de Markov Contínuas. A aplicação deste tipo de Cadeias de Markov é fundamental quando se pretende analisar, particularmente, o comportamento de uma determinada rede dinâmica em diferentes intervalos de tempo, representando uma unidade que não tem qualquer significado numérico, no caso das Cadeias de Markov Contínuas.
Cadeias de Markov Contínuas	Ao contrário do que é verificado nas Cadeias de Markov Discretas, o conceito de periodicidade não pode ser analisado nas Cadeias de Markov Contínuas. Este tipo de Cadeias de Markov revela-se bastante útil para a análise do comportamento de uma determinada rede dinâmica durante um longo período de tempo, pois ocorre uma convergência da distribuição de probabilidades, de forma a tornar-se cada vez mais estacionária. Uma das principais dificuldades na utilização deste tipo de Cadeias de Markov é a impossibilidade da recolha de dados de forma contínua.
Cadeias de Markov Escondidas	Este tipo de Cadeias de Markov possui uma enorme capacidade de adaptabilidade e versatilidade, apesar da sua estrutura ser complexa, de acordo com as suas características. Devido à incerteza dos dados utilizados na sua modelação, a análise torna-se complexa, sem a realização de algumas assunções que auxiliam na simplificação dos problemas em análise.

Um dos casos especiais e particulares intimamente ligados às Cadeias de Markov, e que deve ser citado apesar de não se encontrar representado nas duas tabelas anteriores, é a aplicabilidade e a relevância das Redes Bayesianas. A sua estrutura é bastante semelhante à de uma Cadeia de Markov comum, com a particularidade de que cada nó representa uma variável de interesse para o sistema em análise e, por sua vez, cada arco formado entre duas variáveis representa a relação causal entre as mesmas [252, 244].

À semelhança das características básicas de qualquer Cadeia de Markov, o número de nós definidos para a criação de uma Rede Bayesiana também deverá ser restrito de forma a que a complexidade dessa mesma rede não dificulte e/ou impossibilite a sua análise. Por outro lado, é recomendável que a seleção desses nós seja realizada de forma cuidada, evitando a escolha de variáveis demasiado semelhantes, dificultando a perceção e a análise dessa rede [244, 252].

Por fim, mas não menos importante que a informação expressa na Tabela 4.1 e na Tabela 4.2, a Tabela 4.3 contempla as principais limitações da aplicação prática das Cadeias de Markov, sendo estas lacunas comuns aos diferentes tipos de Cadeias de Markov.

Tabela 4.3 – Limitações das Cadeias de Markov [253, 254]

Principais Limitações das Cadeias de Markov
Se o período de tempo selecionado para a recolha de dados for demasiado reduzido, a aplicação das Cadeias de Markov revela-se inadequada porque as variações decorridas nesse período de tempo tornar-se-ão determinísticas em vez de estocásticas, como seria expectável, diminuindo a capacidade de previsão produzida por esta metodologia. Quanto mais robusta for a rede dinâmica criada, apesar de contemplar mais parâmetros que a aproximam da realidade vivenciada, mais complexa será a sua análise e mais recursos computorizados serão necessários para que essa análise ocorra. A Propriedade de Markov deverá ser sempre validada no início da criação de qualquer Cadeia de Markov, pois a sua inexistência colocará em risco toda a análise que poderá decorrer da rede dinâmica desejada. Uma das principais características das Cadeias de Markov, nomeadamente, a falta de memória, poderá ser considerada uma limitação quando este facto afeta diretamente a análise dos dados e, em alguns contextos, seria importante conhecer o passado para delinear medidas úteis para o futuro.

4.3 Fundamentos da Metodologia de Previsão

Após a descrição teórica dos conceitos relativos à Teoria das Cadeias de Markov, assim como a respetiva distinção dos diferentes tipos de Cadeias de Markov, é necessário descrever os fundamentos para a realização de qualquer procedimento de previsão que recorra à metodologia selecionada para o presente trabalho de investigação.

De forma simplificada, encontra-se apresentado na Figura 4.1 o diagrama que retrata o passo a passo da metodologia que deverá ser respeitada para a obtenção da previsão de qualquer fenómeno que se pretende estudar, sendo este procedimento constituído, de forma resumida, por quatro etapas [271].

Figura 4.1 – Algoritmo de Previsão do Fenómeno

Em primeiro lugar, tendo em conta que o intuito de qualquer previsão é a capacidade de antecipar e antever o comportamento e a respetiva evolução cronológica de um determinado fenómeno, é necessário recolher, através de uma ou mais fontes fiáveis e relevantes, um vasto conjunto de dados que descrevam o comportamento desse fenómeno ao longo de um determinado período pré-definido. Este período, apesar de ser estabelecido pelo responsável pela realização desse estudo, deverá ter em conta inúmeros parâmetros, como por exemplo, a acessibilidade aos dados pretendidos, a variedade de fontes que possam fornecer esses dados e até mesmo a dificuldade e a morosidade para o manuseamento e o tratamento desses dados.

Em segundo lugar, tendo em conta a dimensão da amostra de dados recolhidos, é necessário implementar diversas técnicas de tratamento que, apesar de nem sempre serem citadas em inúmeros estudos desenvolvidos, representam uma etapa fundamental para o sucesso da criação e da respetiva análise das redes dinâmicas que permitirão a obtenção da previsão do comportamento futuro do fenómeno em estudo. O grau de complexidade desta etapa depende, obrigatoriamente, da extensão dos dados e da pluralidade da aplicação desses dados em diversas análises complementares que serão bastante úteis para as conclusões finais obtidas através de cada uma das redes dinâmicas que poderá ser construída. Realça-se ainda a fragilidade desta etapa pois dela poderão decorrer inúmeros(as) erros e/ou lacunas que terão um impacto direto e, muitas vezes negativo, na correta interpretação e análise crítica de cada rede dinâmica.

Em terceiro lugar, de acordo com as especificidades do fenómeno em estudo, várias redes dinâmicas provisórias poderão ser pré-definidas única e exclusivamente com o intuito de assinalarem, por exemplo, diferentes períodos de análise que poderão suscitar interesse de uma investigação e análise pormenorizada, dando origem, por exemplo, a períodos de sobreposição que poderão ser contemplados em apenas uma rede dinâmica. Caso esta etapa não seja obrigatória no contexto do estudo em análise, o término da segunda etapa poderá dar origem ao início da quarta etapa. Mesmo que esta etapa não seja crucial para o estudo do comportamento do fenómeno em análise, poderá ser uma etapa intermédia útil para a pré-definição dos estados que constituirão a(s) rede(s) dinâmica(s) definitiva(s), como por exemplo, a enumeração da quantidade de estados, os respetivos intervalos e o seu significado e/ou impacto para cada uma das redes dinâmicas que poderá ser construída no contexto do estudo desenvolvido.

Em quarto lugar, surge a última etapa desta metodologia que permitirá a construção das duas matrizes principais na Teoria das Cadeias de Markov e o cálculo de inúmeros parâmetros complementares que auxiliarão na obtenção da previsão da evolução do comportamento do fenómeno em análise. Como resultado da análise crítica realizada ao longo desta etapa, poderá surgir a necessidade de readaptar uma ou mais redes dinâmicas em inúmeros aspetos, como por exemplo, reajustando o período de análise e/ou a quantidade de estados e/ou os seus intervalos representativos, dando assim origem a outras análises complementares.

4.4 Aplicabilidade na Gestão de TMA

Após a breve caracterização da construção de uma Cadeia de Markov, é importante verificar a sua aplicabilidade no contexto do setor de transporte aéreo, de forma a garantir a sua utilidade e o carácter benéfico na respetiva implementação. Por esse motivo, e após uma vasta análise, é possível afirmar que as Cadeias de Markov são utilizadas em inúmeros setores industriais, para além do setor do transporte aéreo, sendo que esta variedade e abrangência é justificável pela sua capacidade eficiente de previsão do comportamento a curto, médio e/ou longo prazo, tanto de sistemas como de pessoas [239, 240].

As Cadeias de Markov são também amplamente utilizadas em modelos cuja implementação se dedica ao estudo e à análise da obtenção de previsões referentes às intenções dos(as) agentes envolvidos(as) na realização de diferentes tarefas, principalmente naquelas que se encontram isoladas das demais e que são realizadas com uma maior frequência. O Ser Humano, independentemente da área profissional que exerce, é, muitas vezes, denominado popularmente por "animal de rotinas", porque a sua experiência aliada à sua formação e aos conhecimentos obtidos proporcionam o sequenciamento das tarefas mais comuns. Dessa forma, a previsão da ocorrência destas tarefas poderá facilitar a ação dos(as) agentes, garantindo que adquiram mais tempo para se dedicarem ao processo da tomada de decisão, em vez de ocuparem o seu tempo na realização de tantas tarefas que poderão ser facilmente automatizadas [255].

No caso particular da implementação das Cadeias de Markov para a gestão do fluxo de tráfego aéreo, em particular na região definida pela TMA, após a sua implementação e análise é expectável que este estudo tenha a capacidade de confirmar ou desmentir a validade tanto da veracidade dos dados recolhidos e utilizados na sua construção, assim como do método de previsão do comportamento futuro da rede dinâmica construída, podendo ser útil para a criação, o desenvolvimento ou a melhoria de alguma TMI para utilização futura no setor.

Uma das principais aplicações desta metodologia no contexto aeronáutico foi apresentada por diversos autores com o intuito de prever a probabilidade de ocorrência de possíveis conflitos entre as aeronaves, de forma a evitá-los e auxiliando na gestão do fluxo de tráfego aéreo [256, 257, 258, 259].

De forma a concretizar o objetivo pretendido, foi introduzido um modelo contemplando a análise específica do comportamento de duas aeronaves, tendo em consideração a correlação existente entre duas variáveis específicas, nomeadamente, as posições tomadas por cada aeronave e o comportamento do vento durante esse período de tempo. Através da utilização desta metodologia, e considerando que cada aeronave cumpria de forma rigorosa o plano de voo atribuído inicialmente, foi possível antever, de forma probabilística, a possibilidade de pelo menos uma das aeronaves "invadir" o "raio de segurança" de voo de outra aeronave, revelando a necessidade de efetuar alterações nos dados de voo em pelo menos uma das aeronaves de forma a evitar a ocorrência de conflitos.

Interligado com o exemplo anterior, existem também diversos estudos que foram desenvolvidos com o intuito de anteverem a probabilidade de ocorrência de condições meteorológicas adversas que possam, de alguma forma, prejudicar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo [260, 261]. O resultado destas análises, para além de ser útil na verificação da praticidade e da utilidade desta metodologia, auxilia na tomada de decisão dos(as) agentes, no que diz respeito à necessidade de reajustar os planos de voo das aeronaves, como também no controlo dos atrasos imputados pelas condições meteorológicas adversas que podem afetar não só inúmeras aeronaves como também congestionar o normal funcionamento das TMAs.

Para além da relevância da aplicabilidade expressa anteriormente para as Cadeias de Markov, a metodologia demonstrou a sua praticidade e utilidade no contexto da automatização da gestão e da definição de rotas para as aeronaves [254]. O intuito deste estudo pretendia otimizar as trajetórias efetuadas pelas aeronaves, de forma a minimizar os atrasos registados devido às condições meteorológicas adversas. A utilização desta metodologia permitiu otimizar a estratégia utilizada para a definição das rotas das aeronaves, promovendo ainda uma redução de custos relativos ao combustível e a minimização do tempo de deslocação. Os(as) autores(as) concluíram que o recurso a esta metodologia promovia duas vantagens substanciais para a gestão do fluxo de tráfego aéreo, nomeadamente, a atribuição de rotas menos complexas para qualquer aeronave que se encontre sujeita a condições meteorológicas adversas e uma menor sobrecarga de aeronaves nos setores aéreos circundantes das localizações previstas para a ocorrência de condições meteorológicas adversas.

Mais especificamente, e retratando as fases mais complexas das operações de tráfego aéreo, torna-se relevante analisar e otimizar o sequenciamento das aterragens e das descolagens das aeronaves em determinadas infraestruturas aeroportuárias, auxiliando na gestão do fluxo de tráfego aéreo e no impacto dessas fases da operação para as restantes que ocorrem em simultâneo [262]. Tendo em conta a interligação entre o sucesso destas fases da operação e os atrasos decorrentes das mesmas, vários estudos foram desenvolvidos com o intuito de alocarem corretamente as pistas disponíveis em cada infraestrutura aeroportuária, para permitir a ocorrência apropriada destas fases de voo para as aeronaves.

Interligado ao exemplo apresentado anteriormente, vários estudos foram desenvolvidos com o intuito de aferirem o grau de congestionamento verificado no solo, nomeadamente, nas infraestruturas aeroportuárias, colocando em causa o normal funcionamento das operações de tráfego aéreo e, consequentemente, o sucesso da gestão imputada às demais aeronaves e/ou interligações existentes entre as infraestruturas aeroportuárias [263]. Para além da otimização da alocação das pistas existentes em cada infraestrutura aeroportuária, o presente estudo analisou os atrasos imputados pelo tempo de circulação das aeronaves para o acesso a essas pistas e/ou aos portões de destino, verificando paralelamente o consumo de combustível e as emissões gasosas decorrentes desta fase do voo.

O conceito transversal a todo o setor, e alvo de vários estudos, é a segurança e, como tal, vários estudos já foram desenvolvidos com o intuito de analisarem a fiabilidade e a segurança dos sistemas que apoiam e controlam as aeronaves [264, 265, 266]. Recorrendo à utilização das Cadeias de Markov foi possível prever a probabilidade de ocorrência de alguma falha destes sistemas tão importantes para o controlo de cada voo, nomeadamente, na gestão dos parâmetros fulcrais para o voo e na garantia do cumprimento dos requisitos legais impostos.

4.5 Modelação do Fluxo

Conhecendo a variedade de metodologias existentes, a seleção da Teoria das Cadeias de Markov para o desenvolvimento do presente trabalho de investigação é justificável pelo facto de promover diversas vantagens comparativamente às demais, nomeadamente, a facilidade de análise e o facto de não requerer um conhecimento aprofundado, por parte dos(as) utilizadores(as), relativamente às variáveis que sofrem alterações devido ao carácter dinâmico da rede dinâmica em análise. Adicionalmente, as Cadeias de Markov permitem a realização de uma análise bastante intuitiva através dos dados recolhidos e do significado dos mesmos [240].

No caso particular dos modelos que serão criados e estudados no presente subcapítulo, as previsões obtidas através das Cadeias de Markov permitirão antever o comportamento do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa e, dessa forma, antecipar as situações de congestionamento que poderão ocorrer em determinados períodos do dia, da semana, do mês e/ou do ano, tendo em conta o período de implementação de cada modelo, e de acordo com as variáveis selecionadas. Salienta-se que, apesar de existirem dois tipos de variáveis, na modelação desenvolvida no presente subcapítulo serão consideradas apenas as variáveis discretas.

Após a apresentação do objetivo da criação e da modelação do fluxo de tráfego aéreo através da utilização das Cadeias de Markov, é fundamental apresentar a sequência que deverá ser cumprida de forma a atingir esse objetivo, tendo em conta que a análise dos resultados obtidos se encontra no Capítulo 5, nomeadamente [240, 243]:

- **Passo 1**: Definir os estados da rede dinâmica;
- **Passo 2**: Calcular a Matriz de Transição de Estados e a Matriz de Probabilidade de Transição;
- **Passo 3**: Verificar o tipo de rede dinâmica obtida, nomeadamente, garantindo que a mesma representa uma Cadeia de Markov ergódica;
- **Passo 4**: Calcular os valores de probabilidade do Processo de Markov, nomeadamente, a distribuição de probabilidades estacionária e o tempo médio de recorrência, entre outros parâmetros que possam ser considerados como pertinentes e relevantes para o trabalho de investigação realizado;
- **Passo 5**: Realizar a previsão do comportamento da rede dinâmica e efetuar, consequentemente, a sua validação.

Para a construção de uma determinada rede dinâmica que tenha a capacidade de permitir uma análise realista da TMA de Lisboa, foi solicitada uma proposta comercial à AirNav Systems com o intuito de obter um histórico de dados em um período de tempo pré-estabelecido, sendo que o documento recebido contém as características apresentadas na Tabela 4.4.

Tabela 4.4 – Características dos Dados Enviados pela AirNav Systems

Denominação da Característica	Descrição da Característica
Tipo de Documento	Foi enviado um ficheiro de excel denominado por ficheiro Comma Separated Values (CSV), isto é, um ficheiro cujos valores se encontram separados através da utilização de vírgulas.
Período de Recolha dos Dados – Amostra	Foi solicitada, inicialmente, uma amostra que contemplava o período de apenas uma semana, com o intuito de serem realizados(as) testes e análises preliminares de forma a testar a validade e o carácter benéfico das informações cedidas.
Período de Recolha dos Dados – Completo	O ficheiro completo contemplava as aterragens e as descolagens no/do Aeroporto de Lisboa no período de 31/12/2018 a 31/01/2020. Excecionalmente foram mantidos os registos dos voos do dia 01/01/2020 com o intuito de, posteriormente, definir e analisar alguns períodos de elevada procura e consequente pico de congestionamento registado na TMA de Lisboa. A proposta comercial acordada entre a AirNav Systems e a UBI tinha como intuito reunir os dados referentes ao período de um ano, tendo sido escolhido o ano de 2019 para evitar que os constrangimentos decorrentes da COVID-19 interferissem na análise e nas posteriores conclusões obtidas das redes dinâmicas construídas. É importante realçar que as redes dinâmicas serão criadas com base em uma análise estatística de dados reais e, como tal, quanto maior for o período de tempo analisado, maior será a precisão da capacidade de previsão de cada rede dinâmica.
Organização Original dos Dados	O ficheiro original, após o tratamento devido para a transformação do formato CSV em colunas, de forma a facilitar a interpretação dos dados disponibilizados, é constituído por treze colunas que possuem as seguintes informações: • 01 – Data e Horário Registada(o) da Aterragem ou da Descolagem (*date*): Indica, para cada voo, a data e o horário em que foi registada a aterragem ou a descolagem de determinada aeronave no/do Aeroporto de Lisboa; • 02 – Número do Voo (*flight_number*): Indica o número de identificação concreto de cada voo; • 03 – Código IATA da Infraestrutura Aeroportuária de Destino (*destination_iata*): Indica, para cada voo, o código de identificação IATA da infraestrutura aeroportuária de destino; • 04 – Código ICAO da Infraestrutura Aeroportuária de Destino (*destination_icao*): Indica, para cada voo, o código de identificação ICAO da infraestrutura aeroportuária de destino; • 05 – Código IATA da Infraestrutura Aeroportuária de Origem (*origin_iata*): Indica, para cada voo, o código de identificação IATA da infraestrutura aeroportuária de origem; • 06 – Código ICAO da Infraestrutura Aeroportuária de Origem (*origin_icao*): Indica, para cada voo, o código de identificação ICAO da infraestrutura aeroportuária de origem; • 07 – Data e Horário Planeada(o) para a Descolagem (*scheduled_departure_time*): Indica, para cada voo, a data e o horário planeada(o) para a descolagem; • 08 – Data e Horário Planeada(o) para a Aterragem (*scheduled_arrival_time*): Indica, para cada voo, a data e o horário planeada(o) para a aterragem; • 09 – Data e Horário Real para a Descolagem (*actual_departure_time*): Indica, para cada voo, a data e o horário real para a descolagem; • 10 – Data e Horário Real para a Aterragem (*actual_arrival_time*): Indica, para cada voo, a data e o horário real para a aterragem; • 11 – Tipo de Aeronave (*aircraft_type*): Indica o tipo de aeronave presente em cada voo; • 12 – Identificação Completa da Aeronave (*aircraft_type_name*): Representa a identificação completa da aeronave presente em cada voo;

Denominação da Característica	Descrição da Característica
	• 13 – Registo da Aeronave (*aircraft_registration*): Indica a matrícula de registo de cada aeronave.
Seleção dos Dados	De entre as treze colunas identificadas anteriormente, as redes dinâmicas serão construídas através da análise de apenas seis dessas colunas, nomeadamente, a coluna 04, a 06, a 07, a 08, a 09 e a 10. Esta seleção foi realizada com o intuito de condensar exclusivamente as datas e os horários, tanto planeadas(os) quanto reais, das aeronaves que aterraram ou descolaram no/do Aeroporto de Lisboa, sendo os dados suficientes para uma análise complexa e inicial das redes dinâmicas que serão criadas. Posteriormente, e de forma a enriquecer as redes dinâmicas criadas, as restantes informações poderão ser acrescentadas, em análises futuras, com o intuito de serem obtidas conclusões complementares.
Especificidades da Rede Dinâmica	Tendo em conta a vasta variedade de dados recolhidos, realçando que o ficheiro recebido é constituído por 239473 voos, foi necessário estipular algumas particularidades e/ou restrições iniciais de forma a agilizar o processo de criação das redes dinâmicas e a posterior análise do seu comportamento, nomeadamente: • Ao longo da análise efetuada não haverá qualquer distinção entre as aeronaves e, como tal, não será atribuído qualquer carácter prioritário às mesmas; • Apesar do longo período de dados enviados, serão removidos os voos cujas informações não se encontram completas para as colunas selecionadas e/ou para aqueles que não se realizaram no período pré-definido.

Após a determinação da quantidade inicial de aeronaves no instante inicial, é possível calcular a quantidade de aeronaves no instante seguinte, adicionando as aterragens nesse novo instante e eliminando as descolagens que ocorreram nesse instante. Desta forma, é possível afirmar que uma determinada rede dinâmica em construção representa um sistema que possui conservação de massa pelo facto de as aeronaves não desaparecerem, sendo que na realidade as mesmas se deslocam e, em determinados instantes, o número total de aeronaves permanece inalterado. De forma genérica, é possível antever que o número de aeronaves presentes na TMA de Lisboa não será constante ao longo do tempo e, como tal, a densidade de ocupação dessa mesma TMA também sofrerá alterações em determinados períodos de tempo. Realça-se que, pelo facto de cada rede dinâmica ter o intuito de permitir a obtenção da previsão da capacidade da TMA de Lisboa, existe a probabilidade de ocorrerem erros e, por esse motivo, é necessário estabelecer uma margem de erro, sendo a mesma devido à incerteza de algumas variáveis e até mesmo do período de dados utilizados para a respetiva construção.

4.5.1 Tratamento dos Dados

O processo de tratamento de dados que precede a respetiva interpretação, análise e reflexão é relativamente complexo, devido à sua extensão e, como tal, o presente subcapítulo apresentará a metodologia selecionada para a utilização adequada dos dados. Salienta-se, porém, que todas as análises serão elaboradas com recurso único e exclusivo ao Microsoft Excel.

Após a receção do documento que englobava um conjunto de 239473 voos que contém todos os voos que aterraram ou descolaram no/do Aeroporto de Lisboa no período de 31/12/2018 a 31/01/2020, foi necessário, em primeiro lugar, eliminar todos os voos que não foram registados durante o ano de 2019, visto que a pretensão das redes dinâmicas que se pretendem construir é analisar o período de um ano de funcionamento do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa.

Excecionalmente foram mantidos os registos dos voos do dia 01/01/2020 com o intuito de, posteriormente, definir e analisar alguns períodos de elevada procura e consequente pico de congestionamento registado na TMA de Lisboa. Após esta etapa restaram 223581 voos, tendo sido removida aproximadamente 7% da amostra inicial.

Em simultâneo ao tratamento descrito no parágrafo anterior, foram também eliminados todos os voos cujas informações relevantes relativamente à data e ao horário de aterragem ou descolagem reais não se encontravam apresentadas(os), tornando impossível a sua utilização para a amostra das redes dinâmicas que se pretendem construir. Após esta etapa restaram 221277 voos, tendo sido removida aproximadamente 8% da amostra inicial.

Tendo em conta a relevância da análise que será desenvolvida, o próximo passo do tratamento dos dados consiste na separação entre as aterragens e as descolagens. Desta fase foram omitidas algumas informações de forma a simplificar e agilizar o processo, ordenando os voos para garantir o seu correto sequenciamento e encontrando-se os mesmos distribuídos da seguinte forma, nomeadamente:

- **Voos que Aterraram no Aeroporto de Lisboa Oriundos de Outras Infraestruturas Aeroportuárias**: 110535 voos. Salienta-se que, após a abordagem específica de cada fase de voo, foram removidos 25 voos cuja intenção de aterragem no Aeroporto de Lisboa não se verificou, tendo restado para a amostra em uso 110510 voos;
- **Voos que Descolaram do Aeroporto de Lisboa com Destino a Outras Infraestruturas Aeroportuárias**: 110292 voos;
- **Voos que Descolaram do Aeroporto de Lisboa e que Aterraram no Aeroporto de Lisboa**: 550 voos.

Apesar do número de aterragens ser superior ao de descolagens, é importante referir que os valores são bastante aproximados e que, por outro lado, esta diferença pode ser justificada de duas formas, nomeadamente, em primeiro lugar o tratamento de dados efetuado anteriormente poderá ter tido um maior impacto no número de descolagens e, em segundo lugar, tendo em conta que o Aeroporto de Lisboa representa um dos principais *hubs* europeus, o número superior de aterragens demonstra o interesse não só das companhias de transporte aéreo como também dos(as) passageiros(as). Consequentemente, é necessário ter em conta que o terceiro valor indicado poderá representar as situações de emergência em que os voos foram cancelados e/ou obrigados a aterrarem no Aeroporto de Lisboa por diversos motivos, como por exemplo, as condições meteorológicas adversas e/ou o relato de algum problema técnico com as aeronaves.

Por outro lado, apesar do Aeroporto de Lisboa funcionar de forma ininterrupta, durante as vinte e quatro horas diárias, existem períodos de tempo em que a taxa de ocupação é substancialmente inferior, comparativamente aos períodos de pico, nomeadamente, entre as 00h00 e as 06h00. Independentemente desta circunstância, serão utilizados os voos realizados ao longo de todo o dia, sem excluir os períodos de tempo menos procurados ou evidenciando os períodos de congestionamento.

De forma detalhada, é possível retirar algumas conclusões iniciais relativamente à amostra final e que serão importantes para a construção das redes dinâmicas, encontrando-se os diferentes parâmetros apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Análise Genérica dos Voos ao Longo de 366 Dias

Relação Entre o Número de Voos Diários e a Fase de Voo	**Descolagens**	**Aterragens**	**Descolagens e Aterragens**
Número Máximo de Voos	471	375	757
Data Registada	22/02/2019	12/04/2019	12/04/2019
Relação Entre o Número de Voos Diários e a Fase do Voe	**Descolagens**	**Aterragens**	**Descolagens e Aterragens**
Número Mínimo de Voos	217	0	255
Data Registada	22/01/2019 25/12/2019	07/03/2019	07/03/2019
Relação Entre o Número de Voos Diários e a Fase do Voe	**Descolagens**	**Aterragens**	**Descolagens e Aterragens**
Número Médio de Voos	301	302	603

Da análise da Tabela 4.5 salienta-se que existem dias cujo número de aterragens registado foi significativamente reduzido, nomeadamente, no dia 07/03/2019 não foram registadas quaisquer aterragens enquanto que no dia 08/03/2019 foi registada apenas uma aterragem. Estes valores irrisórios são resultado do tratamento dos dados descrito anteriormente, representando um conjunto de 1090 voos que foram removidos da amostra devido à falta de dados apresentados no ficheiro recebido.

Esta discrepância poderá ser devido a inúmeros fatores, como por exemplo, erro da plataforma e/ou do *software* utilizada(o) para a recolha e o armazenamento dos dados, voos cancelados pelas companhias de transporte aéreo, alteração dos planos de voo das aeronaves causando a modificação da infraestrutura aeroportuária de destino, entre outros.

Através da amostra tratada de acordo com o procedimento explicado anteriormente, serão realizadas diferentes análises e, por esse motivo, serão criadas, primeiramente, diferentes redes dinâmicas provisórias, com o intuito de diferenciar as conclusões obtidas, de acordo com o nível de complexidade definido. Dessa forma, as diferentes redes dinâmicas provisórias encontram-se apresentadas na Tabela 4.6, condensando dessa forma a sua identificação e as respetivas especificidades.

Tabela 4.6 – Apresentação das Redes Dinâmicas Provisórias

Identificação da Rede Dinâmica	Denominação da Rede Dinâmica	Período em Análise	Relevância
RD1	Amostra Completa	366 dias Dia Inicial: 01/01/2019 Dia Final: 01/01/2020	Analisa um ano de operações, de forma a ser possível detetar a tendência de evolução do normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.
RD2	Verão IATA	210 dias Dia Inicial: 31/03/2019 Dia Final: 26/10/2019	Analisa o impacto da época alta no contexto do setor do transporte aéreo.
RD3	Verão em Portugal	95 dias Dia Inicial: 21/06/2019 Dia Final: 23/09/2019	Analisa o impacto da época alta no contexto do setor do turismo.
RD4	Carnaval	3 dias Dia Inicial: 04/03/2019 Dia Final: 06/03/2019	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em épocas festivas.
RD5	Páscoa	17 dias Dia Inicial: 12/04/2019 Dia Final: 28/04/2019	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em épocas festivas.
RD6	Greve dos Motoristas de Matérias Perigosas	9 dias Dia Inicial: 15/04/2019 Dia Final: 23/04/2019	Analisa o impacto desta greve para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, tendo em conta que o Aeroporto de Lisboa necessitou de recorrer às reservas de combustível de emergência, de forma a ultrapassar a falta de distribuição de combustível.
RD7	Dia da Liberdade	5 dias Dia Inicial: 24/04/2019 Dia Final: 28/04/2019	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em fins de semana prolongados.
RD8	Estoril Open	9 dias Dia Inicial: 27/04/2019 Dia Final: 05/05/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos desportivos mundialmente atrativos para os(as) adeptos(as).
RD9	Aparição de Nossa Sra. de Fátima aos 3 Pastorinhos	5 dias Dia Inicial: 10/05/2019 Dia Final: 14/05/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos religiosos mundialmente atrativos para os(as) crentes.
RD10	Rali de Portugal	4 dias Dia Inicial: 30/05/2019 Dia Final: 02/06/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos desportivos mundialmente atrativos para os(as) adeptos(as).
RD11	Final da Liga das Nações da Union of European Football Associations (UEFA) de 2018–19	5 dias Dia Inicial: 05/06/2019 Dia Final: 09/06/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos desportivos mundialmente atrativos para os(as) adeptos(as).
RD12	NOS Primavera Sound	3 dias Dia Inicial: 06/06/2019 Dia Final: 08/06/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD13	Trail World Championships (TWC) 2019	4 dias Dia Inicial: 06/06/2019 Dia Final: 09/06/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos desportivos mundialmente atrativos para os(as) adeptos(as).
RD14	Dia de Portugal	4 dias Dia Inicial: 07/06/2019 Dia Final: 10/06/2019	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em fins de semana prolongados.
RD15	Santo António	4 dias Dia Inicial: 12/06/2019 Dia Final: 15/06/2019	Analisa o impacto do aumento do turismo nesta festa popular da cidade de Lisboa.
RD16	Corpo de Deus	5 dias Dia Inicial: 19/06/2019 Dia Final: 23/06/2019	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em fins de semana prolongados.

Identificação da Rede Dinâmica	Denominação da Rede Dinâmica	Período em Análise	Relevância
RD17	Sumol Summer Fest	2 dias Dia Inicial: 05/07/2019 Dia Final: 06/07/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD18	NOS Alive	3 dias Dia Inicial: 11/07/2019 Dia Final: 13/07/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD19	Super Bock Super Rock	3 dias Dia Inicial: 18/07/2019 Dia Final: 20/07/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD20	MEO Marés Vivas	3 dias Dia Inicial: 19/07/2019 Dia Final: 21/07/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD21	UNITE Tomorrowland	1 dia Dia Inicial: 27/07/2019 Dia Final: 27/07/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD22	Volta a Portugal	12 dias Dia Inicial: 31/07/2019 Dia Final: 11/08/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos desportivos mundialmente atrativos para os(as) adeptos(as).
RD23	MEO Sudoeste	5 dias Dia Inicial: 06/08/2019 Dia Final: 10/08/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD24	Vodafone Paredes de Coura	4 dias Dia Inicial: 14/08/2019 Dia Final: 17/08/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD25	Assunção de Nossa Senhora	5 dias Dia Inicial: 14/08/2019 Dia Final: 18/08/2019	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em fins de semana prolongados.
RD26	Dia de Todos os Santos	4 dias Dia Inicial: 31/10/2019 Dia Final: 03/11/2019	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em fins de semana prolongados.
RD27	Web Summit	3 dias Dia Inicial: 05/11/2019 Dia Final: 07/11/2019	Analisa o impacto do acolhimento de inúmeros(as) participantes desta conferência que ocorre a nível mundial, reunindo estudiosos(as), empreendedores(as), profissionais e estudantes de inúmeras áreas.
RD28	Super Bock em Stock	2 dias Dia Inicial: 22/11/2019 Dia Final: 23/11/2019	Analisa o impacto da ocorrência de eventos musicais mundialmente atrativos para os(as) admiradores(as).
RD29	Visita da Ativista Ambientalista Sueca Greta Thunberg	1 dia Dia Inicial: 03/12/2019 Dia Final: 03/12/2019	Analisa o impacto da chegada e da partida de ativistas mundiais que acompanharam a jovem ativista com destino à Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP25) que se realizou em Madrid.
RD30	Depressão Daniel, Depressão Elsa e Depressão Fabien	4 dias Dia Inicial: 18/12/2019 Dia Final: 21/12/2019	Analisa o impacto de três acontecimentos oriundos de condições meteorológicas adversas que avassalaram a maior parte do país.
RD31	Natal e Fim de Ano	13 dias Dia Inicial: 20/12/2019 Dia Final: 01/01/2020	Analisa o impacto da movimentação de passageiros(as) em épocas festivas.

Após a análise das diferentes redes dinâmicas apresentadas na Tabela 4.6 é possível verificar a sobreposição de diferentes períodos de interesse e, por esse motivo, e de forma a reduzir o número de redes dinâmicas que serão formuladas, alguns dos períodos de interesse serão associados de forma a potenciar a veracidade e a utilidade da análise efetuada.

Dessa forma, a condensação anteriormente descrita encontra-se apresentada na Tabela 4.7 através da listagem das redes dinâmicas definitivas que serão analisadas.

Tabela 4.7 – Apresentação das Redes Dinâmicas Definitivas

Identificação da Rede Dinâmica	Denominação da Rede Dinâmica	Período em Análise	Condensação das Redes Dinâmicas Provisórias
RD-A	Amostra Completa	366 dias Dia Inicial: 01/01/2019 Dia Final: 01/01/2020	RD1
RD-B	Verão IATA + Verão em Portugal	210 dias Dia Inicial: 31/03/2019 Dia Final: 26/10/2019	RD2 + RD3
RD-C	Carnaval	3 dias Dia Inicial: 04/03/2019 Dia Final: 06/03/2019	RD4
RD-D	Páscoa + Greve dos Motoristas de Matérias Perigosas + Dia da Liberdade + Estoril Open + Aparição de Nossa Sra. de Fátima aos 3 Pastorinhos	33 dias Dia Inicial: 12/04/2019 Dia Final: 14/05/2019	RD5 + RD6 + RD7 + RD8 + RD9
RD-E	Rali de Portugal + Final da Liga da UEFA de 2018–19 + NOS Primavera Sound + TWC 2019 + Dia de Portugal + Santo António + Corpo de Deus	25 dias Dia Inicial: 30/05/2019 Dia Final: 23/06/2019	RD10 + RD11 + RD12 + RD13 + RD14 + RD15 + RD16
RD-F	Sumol Summer Fest + NOS Alive + Super Bock Super Rock + MEO Marés Vivas + UNITE Tomorrowland	23 dias Dia Inicial: 05/07/2019 Dia Final: 27/07/2019	RD17 + RD18 + RD19 + RD20 + RD21
RD-G	Volta a Portugal + MEO Sudoeste + Vodafone Paredes de Coura + Assunção de Nossa Senhora	19 dias Dia Inicial: 31/07/2019 Dia Final: 18/08/2019	RD22 + RD23 + RD24 + RD25
RD-H	Dia de Todos os Santos + Web Summit + Super Bock em Stock + Visita da Ativista Ambientalista Sueca Greta Thunberg	34 dias Dia Inicial: 31/10/2019 Dia Final: 03/12/2019	RD26 + RD27 + RD28 + RD29
RD-I	Depressão Daniel, Depressão Elsa e Depressão Fabien + Natal e Fim de Ano	15 dias Dia Inicial: 18/12/2019 Dia Final: 01/01/2020	RD30 + RD31

4.5.2 Estados

De forma simplificada, os estados de cada rede dinâmica representam os limites da mesma e deverão ser definidos de forma consciente entre a realidade verificada no histórico recolhido do comportamento do fluxo de tráfego aéreo e os objetivos a que se propõe o presente trabalho de investigação, nomeadamente, a gestão e o controlo da capacidade da TMA de Lisboa. Realça-se por isso que a capacidade de previsão de uma determinada rede dinâmica está diretamente relacionada com a quantidade de estados e a respetiva relevância dos mesmos. Por outro lado, tendo em conta que se pretende determinar a capacidade como sendo a percentagem de ocupação dessa mesma TMA, cada estado irá representar um intervalo específico, de forma a albergar todos os valores possíveis. A apresentação desses estados e o respetivo intervalo de aplicação encontra-se representada(o) na Equação 4.23.

$$
\begin{aligned}
n &= 0, 1, 2, 3, 4 \\
0 &= 0\% - 59\% \\
1 &= 60\% - 79\% \\
2 &= 80\% - 89\% \\
3 &= 90\% - 94\% \\
4 &= 95\% - 100\%
\end{aligned}
\tag{4.23}
$$

De forma mais detalhada, é necessário compreender o motivo pelo qual foram selecionados os estados apresentados na Equação 4.23, a sua relevância e as suas implicações, de forma a demonstrar que a seleção foi realizada de forma adequada. A análise em causa encontra-se apresentada na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 – Análise da Definição dos Estados

Número do Estado	Intervalo de Ocupação	Nível de Ocupação	Implicações de Cada Estado
0	0% - 59%	Insignificante	Neste estado a gestão do fluxo de tráfego aéreo é realizada de forma equilibrada e tranquila, sem requerer grande esforço por parte dos(as) agentes.
1	60% - 79%	Moderado	Neste estado a gestão do fluxo de tráfego aéreo é realizada de forma equilibrada e tranquila, verificando-se um aumento faseado do número de aeronaves em operação na TMA.
2	80% - 89%	Elevado	Neste estado a gestão do fluxo de tráfego aéreo é realizada de forma otimista e ritmada, pois as decisões tomadas pelos(as) agentes são eficazes.
3	90% - 94%	Significativo	Neste estado a gestão do fluxo de tráfego aéreo torna-se cada vez mais complexa, sendo percecionada a dificuldade por parte dos(as) agentes envolvidos(as) na tomada de decisões eficazes que possam evitar a ocorrência de congestionamentos.
4	95% - 100%	Preocupante	Neste estado a gestão do fluxo de tráfego aéreo torna-se caótica e, na grande maioria das vezes, as decisões tomadas pelos(as) agentes refletem a necessidade da resolução de problemas em cada instante decorrentes de fortes situações de congestionamento.

Ressalva-se, porém, que o número de estados e os respetivos intervalos de ocupação representativos são informações fulcrais e intrínsecas a cada TMA, sendo que através das mesmas será possível percecionar a rapidez de transição do comportamento do fluxo de tráfego aéreo. Apesar da informação apresentada na Tabela 4.8 é necessário salientar que nenhuma rede dinâmica se encontra restrita, continuamente, aos estados definidos e, como tal, existirão, previsivelmente, instantes em que a ocupação da TMA de Lisboa irá superar os 100%, enfatizando por isso a necessidade de gerir de forma mais adequada o fluxo de tráfego aéreo de entrada e de saída desta TMA.

Tal como foi indicado no subcapítulo 4.5.1, foram criadas nove redes dinâmicas com o intuito de analisar diferentes períodos temporais, sendo importante salientar que, para todas elas, foram estabelecidos os mesmos estados e os respetivos intervalos apresentados na Tabela 4.8 e, em algumas delas, foram verificados intervalos cuja taxa de ocupação ultrapassou os 100%. Estes períodos de tempo revelam situações críticas de ocorrência de congestionamento, sendo importante antevê-los, de forma a evitar as consequências negativas provenientes desses momentos.

Para uma correta identificação da taxa de ocupação da TMA de Lisboa é necessário, em primeiro lugar, apresentar a metodologia utilizada para o tratamento dos dados recolhidos, de forma a facilitar a adequada interpretação. Tendo em conta a extensão destes dados, a tabela de dados condensados de cada uma das nove redes dinâmicas encontra-se apresentada no Anexo B deste trabalho de investigação, sendo que a Tabela 4.9 contempla os parâmetros de construção desse anexo e permite efetuar as ressalvas necessárias.

Tabela 4.9 – Explicação da Apresentação dos Dados Iniciais das Redes Dinâmicas

<table>
<tr><th colspan="2">Identificação das Colunas</th><th>Justificação da Relevância das Colunas</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Período Horário</td><td>Inicial</td><td rowspan="2">Com o intuito de apresentar de forma mais detalhada e realista o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, o período diário de vinte e quatro horas foi repartido em vinte e quatro intervalos de uma hora.</td></tr>
<tr><td>Final</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Quantidade de Movimentos</td><td>Aterragens</td><td rowspan="3">Foram contabilizadas as aeronaves que se movimentaram dentro da TMA de Lisboa em cada hora.</td></tr>
<tr><td>Descolagens</td></tr>
<tr><td>Total</td></tr>
<tr><td colspan="2">Taxa de Ocupação</td><td>Foi calculada a taxa de ocupação da TMA de Lisboa em cada hora e tendo em conta a quantidade de movimentos de aeronaves registados e os limites de movimentos e de capacidade definidos pela ANA Aeroportos. Esta taxa é obtida através do rácio entre o número de aeronaves e o volume limite deste espaço. Esta variável é incerta pois depende da intensidade do fluxo de tráfego aéreo em cada momento.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos</td><td rowspan="2">Estes dois parâmetros limitantes da TMA de Lisboa são estipulados pela ANA Aeroportos e são divulgados, anualmente, por esta entidade através do seu website. Durante a realização deste trabalho de investigação verificou-se que o website não registava o histórico de informações divulgadas à comunidade e, como tal, contendo apenas a apresentação dos limites estipulados para o ano de 2020. Os valores em causa foram utilizados de forma confiante, pois a variação dos mesmos não ocorre com demasiada frequência.</td></tr>
<tr><td colspan="2">Capacidade na Aproximação</td></tr>
</table>

Após a apresentação da metodologia de construção da tabela de dados para cada uma das redes dinâmicas e a respetiva análise do Anexo B deste trabalho de investigação, é possível fazer uma breve análise destes dados, obtendo algumas informações preliminares que serão úteis no Capítulo 5, encontrando-se apresentados na Tabela 4.10 os períodos de tempo em que a taxa de ocupação de cada rede dinâmica foi superior a 100%.

Tabela 4.10 – Análise Preliminar de Situações de Congestionamento das Redes Dinâmicas

Identificação das Redes Dinâmicas	Intervalos de Congestionamento
RD-A	[09h00; 09h59]
RD-B	[09h00; 09h59], [10h00; 10h59], [13h00; 13h59], [17h00; 17h59]
RD-C	N/A
RD-D	[06h00; 06h59], [09h00; 09h59], [12h00; 12h59], [13h00; 13h59], [15h00; 15h59], [17h00; 17h59], [18h00; 18h59]
RD-E	[06h00; 06h59], [09h00; 09h59], [10h00; 10h59], [13h00; 13h59], [17h00; 17h59]
RD-F	[09h00; 09h59], [10h00; 10h59], [13h00; 13h59], [17h00; 17h59]
RD-G	[09h00; 09h59], [10h00; 10h59], [17h00; 17h59]
RD-H	[10h00; 10h59]
RD-I	N/A

4.5.3 Probabilidades de Transição

Recordando alguns dos principais conceitos apresentados no subcapítulo 4.1, para que seja efetuada uma análise concreta de cada uma das redes dinâmicas é imprescindível a construção da Matriz de Transição de Estados e da Matriz de Probabilidade de Transição, tendo em conta os dados apresentados no Anexo B deste trabalho de investigação.

Tal como o nome indica, a construção da Matriz de Transição de Estados pretende apresentar a frequência da transição de cada rede dinâmica ao longo dos estados que a compõem e, dessa forma, é possível verificar se ocorre a transição entre todos eles, sendo possível antecipar a ocorrência de situações de congestionamento. Consequentemente, a construção da Matriz de Probabilidade de Transição pretende apresentar a probabilidade de transição entre os estados e auxilia nas conclusões que poderão ser obtidas de forma preliminar na análise da Matriz de Transição de Estados.

No que diz respeito à metodologia de construção de cada uma das matrizes citadas, é necessário explicar, em termos concetuais, o processo da sua construção, do seu desenvolvimento e até mesmo de análise para facilitar não só a sua interpretação posterior, como também para frisar a sua relevância no âmbito da Teoria das Cadeias de Markov. Para cada uma das nove redes dinâmicas foram filtradas as descolagens e as aterragens efetuadas no período de interesse, agrupando-as de acordo com o horário em que foram registadas, tendo em atenção os vinte e quatro períodos de uma hora que foram estipulados na Tabela 4.9. Desta forma, para cada um dos períodos foi possível determinar a taxa de ocupação registada e, dessa forma, identificar claramente o estado de ocupação da TMA de Lisboa em cada momento.

Através da definição do estado que representa a taxa de ocupação da TMA de Lisboa em cada hora do dia do seu funcionamento, foi possível observar a variação que ocorria ao longo do dia e, dessa forma, iniciar o processo de criação da Matriz de Transição de Estados.

Após a correta classificação dos vinte e quatro estados vivenciados entre as 00h00 e as 23h59, foi possível terminar a construção desta matriz, representando dessa forma a frequência da transição de cada rede dinâmica ao longo dos estados que a compõem. Salienta-se que, para além do somatório das transições descritas na matriz ser, obrigatoriamente, vinte e quatro, é possível também, rápida e facilmente, efetuar uma análise preliminar e reconhecer as transições que ocorrem com uma maior frequência para cada uma das nove redes dinâmicas.

Complementarmente ao processo descrito para a Matriz de Transição de Estados, a construção da Matriz de Probabilidade de Transição distingue-se da anterior apenas pelo facto de representar a probabilidade de transição de cada rede dinâmica ao longo dos estados que a compõem, em vez de representar a frequência. Por este facto, a construção da Matriz de Probabilidade de Transição possui uma etapa adicional. Após a classificação dos vinte e quatro estados vivenciados entre as 00h00 e as 23h59, a construção desta matriz deverá ter em conta o somatório de cada uma das cinco linhas que compõem cada rede dinâmica, garantindo, em primeiro lugar, a representação das vinte e quatro transições distribuídas pelas cinco linhas e, em segundo lugar, o somatório de cada uma dessas linhas deverá ser igual a um, validando dessa forma a correta construção da matriz em análise.

De uma forma dinâmica e lúdica, o processo citado anteriormente pode ser compreendido facilmente através da observação da Figura 4.2 que representa, de forma simplificada, uma determinada rede dinâmica constituída por três estados e cujas probabilidades de transição entre esses três estados se encontram representadas junto de cada arco.

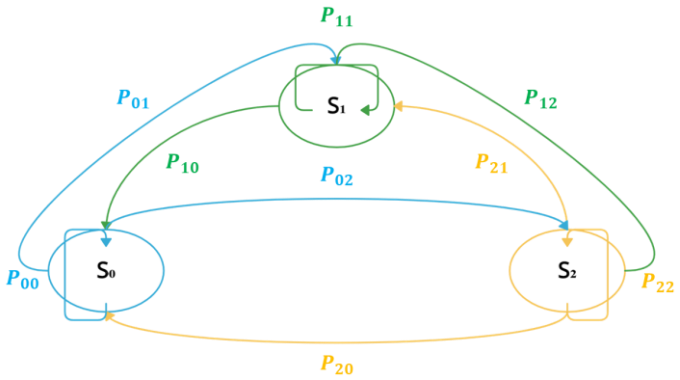

Figura 4.2 – Grafo do Fenómeno [267]

O cálculo da probabilidade da ocorrência da transição entre um determinado par de estados é obtido, à semelhança dos conceitos explicitados no subcapítulo 4.1, através da aplicação de uma simples equação que tem em conta dois parâmetros, nomeadamente, o número de transições ocorridas entre os dois estados sob análise e o número total de transições verificadas na rede dinâmica (Equação 4.24).

$$P_{ij} = \frac{n_{ij}}{\sum_{k=0}^{M} n_{ik}} \tag{4.24}$$

Para ambas as matrizes em análise, existe uma correspondência compatível entre a sua estrutura, nomeadamente, o significado das linhas e das colunas. Tendo em conta que se pretende, em cada uma delas, descrever as transições que ocorrem entre os cinco estados que compõem cada rede dinâmica, em termos temporais e simplificadamente, é possível afirmar que as linhas representam o momento presente e as colunas representam o momento futuro.

Por fim, mas não menos importante, é necessário relembrar que cada rede dinâmica poderá sofrer alterações nas probabilidades de transição de estados ao longo do tempo, tendo em conta as suas especificidades e/ou as variáveis externas direta ou indiretamente interligadas com a mesma. Relativamente às transições de possível ocorrência ao longo da rede dinâmica, distinguem-se aquelas cuja probabilidade é superior a zero, mas inferior a um, significando que a sua verificação ocorre por diversas vezes de acordo com a probabilidade calculada e, consequentemente, as transições que possuem a probabilidade de um representam a certeza de que tal transição iniciada no estado *i* atingirá apenas o estado *j*.

Para cada uma das nove redes dinâmicas criadas serão apresentadas as duas matrizes citadas anteriormente, contemplando duas especificidades, nomeadamente, nas transições existentes, o respetivo valor de frequência ou de probabilidade será apresentado no local devido e, contrariamente, nas transições inexistentes serão colocados valores nulos nesses locais. A primeira matriz apresentada será sempre a Matriz de Transição de Estados e a segunda matriz apresentada será sempre a Matriz de Probabilidade de Transição.

4.5.3.1 RD-A

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-A} = \begin{bmatrix} 6 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 3 & 3 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.25}$$

$$P_{RD-A} = \begin{bmatrix} 6/7 & 0 & 1/7 & 0 & 0 \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 3/8 & 3/8 & 1/8 \\ 0 & 1/4 & 2/4 & 1/4 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{4.26}$$

4.5.3.2 RD-B

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-B} = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 4 \\ 0 & 1 & 0 & 4 & 3 \end{bmatrix} \tag{4.27}$$

$$P_{RD-B} = \begin{bmatrix} 5/6 & 1/6 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/6 & 1/6 & 4/6 \\ 0 & 1/8 & 0 & 4/8 & 3/8 \end{bmatrix} \tag{4.28}$$

4.5.3.3 RD-C

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Por motivos alheios a esta circunstância, e dependendo da estrutura desta rede dinâmica, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, não será possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-C} = \begin{bmatrix} 10 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 3 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 2 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.29}$$

$$P_{RD-C} = \begin{bmatrix} 10/11 & 1/11 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3/6 & 3/6 & 0 & 0 \\ 1/6 & 2/6 & 2/6 & 0 & 1/6 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.30}$$

4.5.3.4 RD-D

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-D} = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 2 & 8 \end{bmatrix} \tag{4.31}$$

$$P_{RD-D} = \begin{bmatrix} 5/6 & 1/6 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 0 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \\ 0 & 1/11 & 0 & 2/11 & 8/11 \end{bmatrix} \tag{4.32}$$

4.5.3.5 RD-E

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-E} = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 3 \\ 0 & 1 & 1 & 4 & 3 \end{bmatrix} \tag{4.33}$$

$$P_{RD-E} = \begin{bmatrix} 5/6 & 1/6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1/3 & 0 & 1/3 & 0 & 1/3 \\ 0 & 0 & 1/4 & 0 & 3/4 \\ 0 & 1/9 & 1/9 & 4/9 & 3/9 \end{bmatrix} \tag{4.34}$$

4.5.3.6 RD-F

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-F} = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 2 & 8 \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

$$P_{RD-F} = \begin{bmatrix} 5/6 & 1/6 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/3 & 2/3 \\ 0 & 1/12 & 1/12 & 2/12 & 8/12 \end{bmatrix} \tag{4.36}$$

4.5.3.7 RD-G

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-G} = \begin{bmatrix} 5 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 2 & 1 & 2 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 4 \end{bmatrix} \tag{4.37}$$

$$P_{RD-G} = \begin{bmatrix} 5/6 & 1/6 & 0 & 0 & 0 \\ 1/3 & 0 & 0 & 2/3 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 & 1/3 & 1/3 \\ 0 & 0 & 2/5 & 1/5 & 2/5 \\ 0 & 1/7 & 1/7 & 1/7 & 4/7 \end{bmatrix} \tag{4.38}$$

4.5.3.8 RD-H

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

$$N_{RD-H} = \begin{bmatrix} 7 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 2 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 2 \end{bmatrix} \tag{4.39}$$

$$P_{RD-H} = \begin{bmatrix} 7/8 & 1/8 & 0 & 0 & 0 \\ 1/4 & 1/4 & 2/4 & 0 & 0 \\ 0 & 1/8 & 5/8 & 1/8 & 1/8 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 0 & 2/3 \end{bmatrix} \tag{4.40}$$

4.5.3.9 RD-I

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Por motivos alheios a esta circunstância, e dependendo da estrutura desta rede dinâmica, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, não será possível, a partir de qualquer estado i, atingir qualquer outro estado j.

$$N_{RD-I} = \begin{bmatrix} 6 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 9 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{4.41}$$

$$P_{RD-I} = \begin{bmatrix} 6/7 & 1/7 & 0 & 0 & 0 \\ 1/4 & 2/4 & 1/4 & 0 & 0 \\ 0 & 1/11 & 9/11 & 0 & 1/11 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 0 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{4.42}$$

4.5.4 Redes Dinâmicas

A modelação efetuada com recurso à Teoria das Cadeias de Markov permite a análise de diversas redes dinâmicas, independentemente da sua complexidade, sendo que estes modelos são denominados frequentemente por diagramas de espaço de estado/transição ou por gráficos de estado, sendo comummente designados apenas por grafos. Recordando a Teoria dos Grafos, estes podem ser classificados como grafos direcionados ou não direcionados.

Genericamente, cada grafo é constituído por três elementos distintos, nomeadamente:

- **Nós**: Representam os estados que compõem cada rede dinâmica;
- **Arcos**: Representam as possíveis transições que se verificam entre cada par de estados que compõem cada rede dinâmica;
- **Pesos**: Representam as probabilidades de transição que se verificam entre cada par de estados que compõem cada rede dinâmica.

No caso particular das nove redes dinâmicas construídas para o presente trabalho de investigação, estas podem ser classificadas como direcionadas, pois os arcos que ligam cada par de estados possuem a indicação clara de saída e de entrada em cada um dos estados que compõem cada rede dinâmica [247].

Com base nas Matrizes de Probabilidade de Transição apresentadas no subcapítulo 4.5.3, serão apresentados os grafos que representam as diferentes redes dinâmicas criadas.

À semelhança do formato apresentado para estas matrizes, os valores correspondentes às transições verificadas pelos estados que compõem cada rede dinâmica, encontrar-se-ão apresentados em formato fracionário com o intuito de agilizar e facilitar a/na compreensão de todas as probabilidades contempladas em cada grafo.

4.5.4.1 RD-A

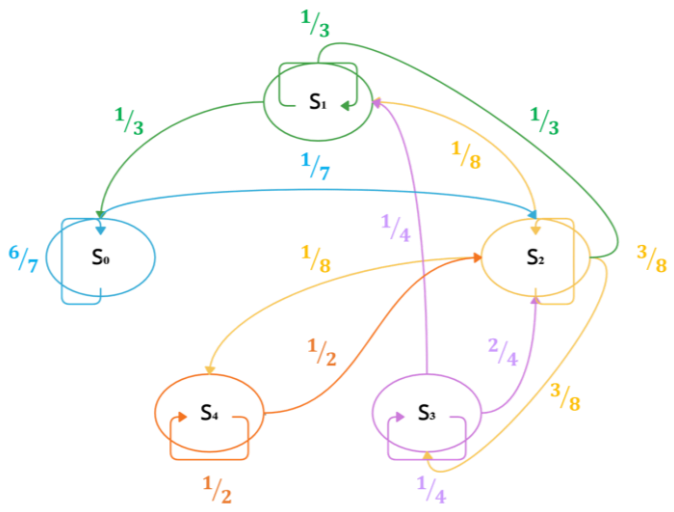

Figura 4.3 – Grafo da RD-A [267]

Através da observação da Figura 4.3, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

5.5.4.2 RD-B

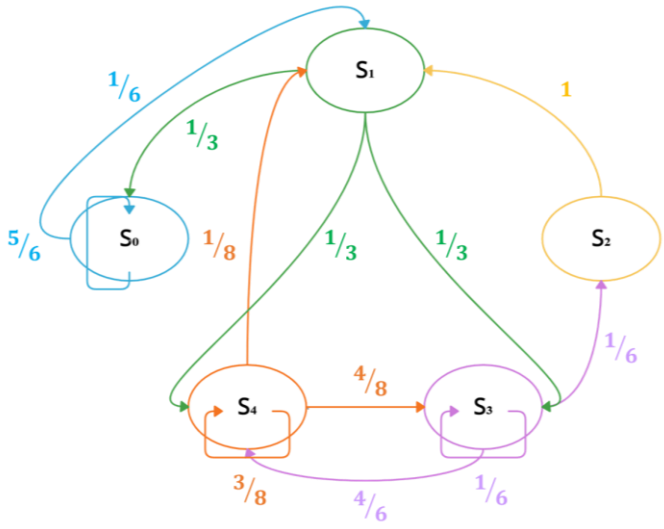

Figura 4.4 – Grafo da RD-B [267]

Através da observação da Figura 4.4, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

4.5.4.3 RD-C

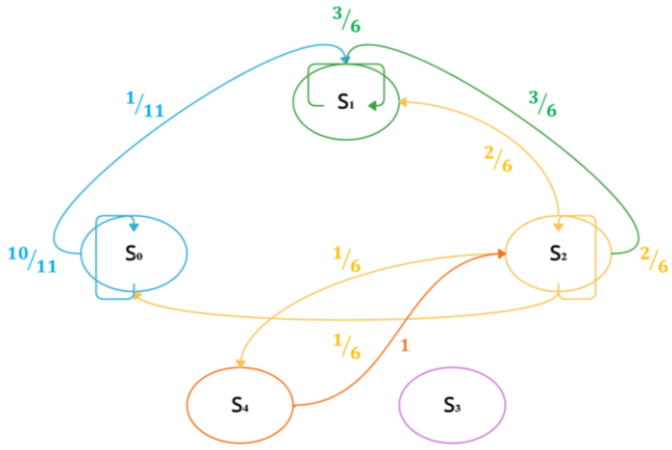

Figura 4.5 – Grafo da RD-C [267]

Através da observação da Figura 4.5, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise não conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como desconexo.

4.5.4.4 RD-D

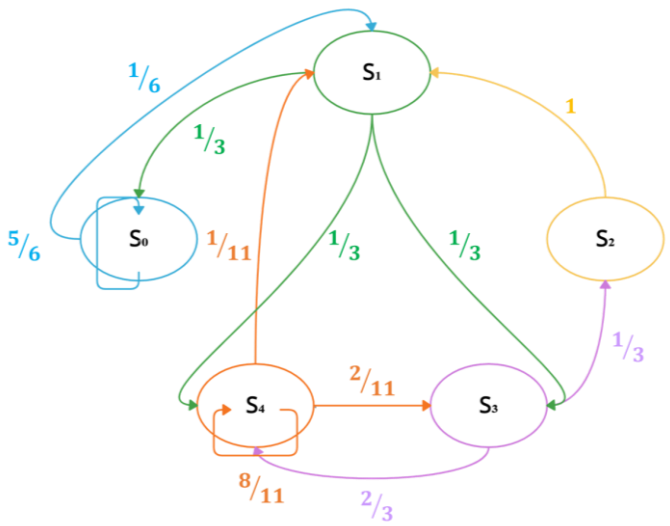

Figura 4.6 – Grafo da RD-D [267]

Através da observação da Figura 4.6, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

4.5.4.5 RD-E

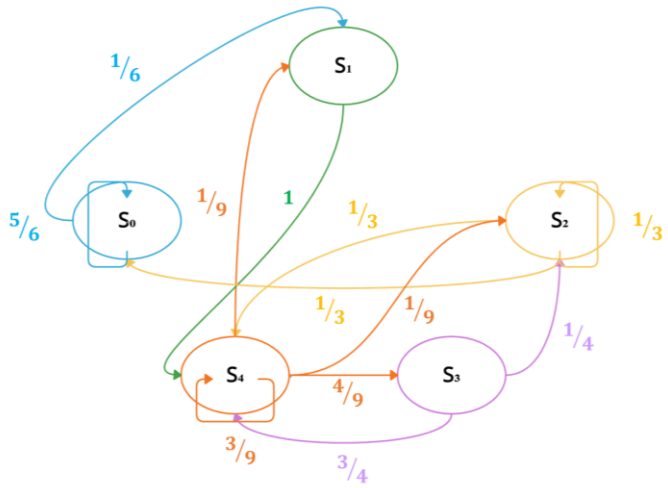

Figura 4.7 – Grafo da RD-E [267]

Através da observação da Figura 4.7, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

4.5.4.6 RD-F

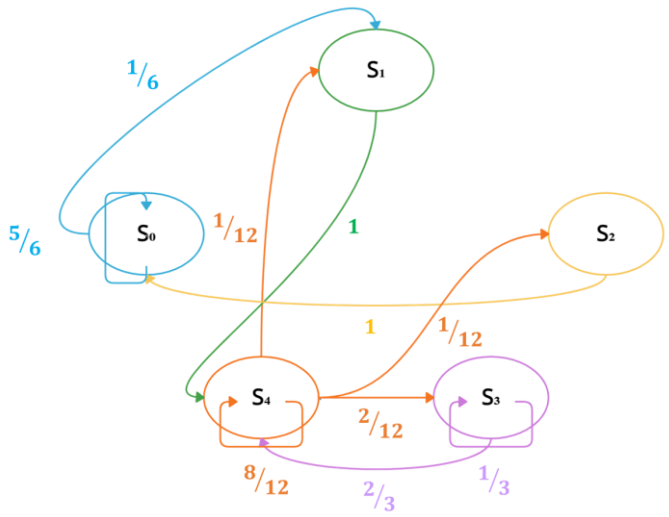

Figura 4.8 – Grafo da RD-F [267]

Através da observação da Figura 4.8, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

5.5.4.7 RD-G

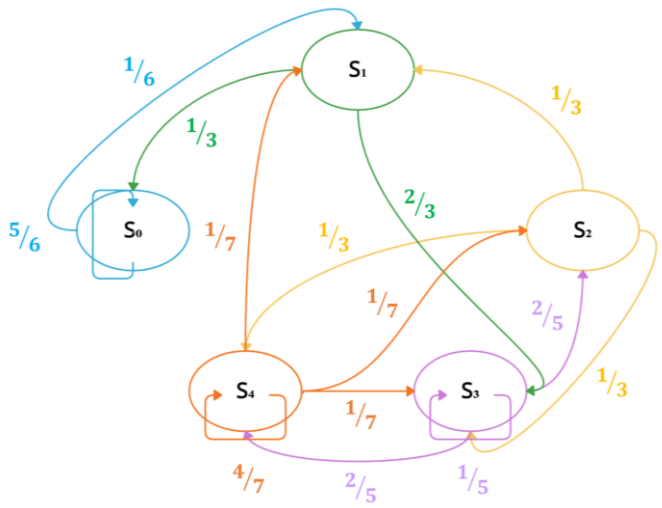

Figura 4.9 – Grafo da RD-G [267]

Através da observação da Figura 4.9, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

4.5.4.8 RD-H

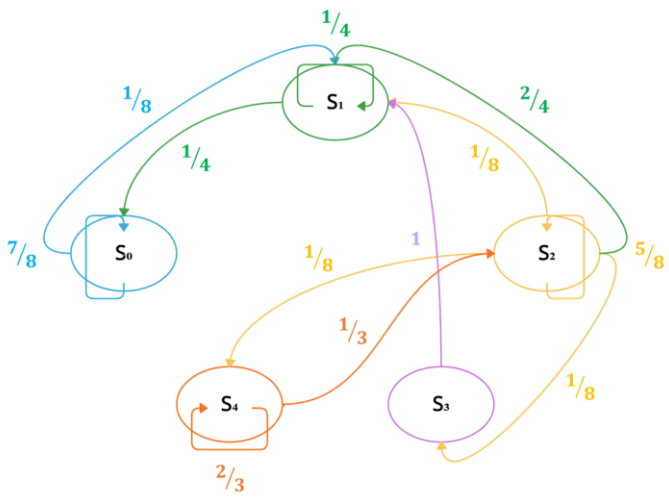

Figura 4.10 – Grafo da RD-H [267]

Através da observação da Figura 4.10, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

4.5.4.9 RD-I

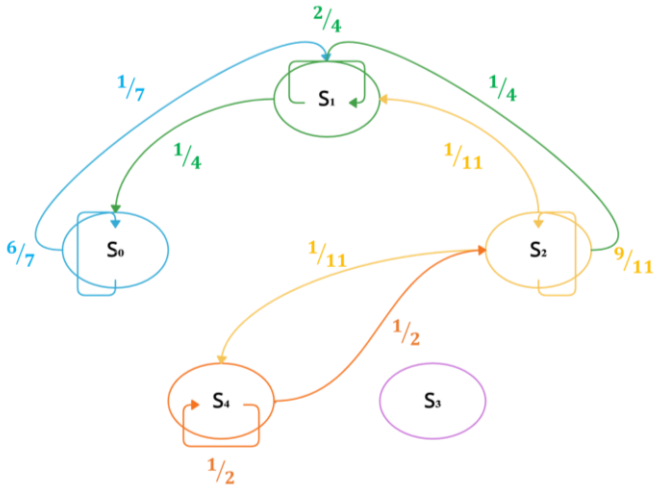

Figura 4.11 – Grafo da RD-I [267]

Através da observação da Figura 4.11, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise não conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como desconexo.

4.6 Discussão

Relembrando as inúmeras características, particularidades e vantagens da utilização da Teoria das Cadeias de Markov, salienta-se a sua flexibilidade de construção e interpretação e, complementarmente, a sua simplicidade relativamente ao facto de não serem necessários muitos estados para descrever um determinado fenómeno. Por estes motivos, e tantos outros apresentados e comprovados por outros(as) autores(as), esta metodologia é amplamente aplicável tanto em outras indústrias como no caso particular do setor do transporte áereo. Tendo em conta o carácter benéfico e transversal da aplicação da Teoria das Cadeias de Markov em inúmeras áreas, têm sido desenvolvidos estudos com o intuito de analisar o impacto e os resultados promovidos por esta metodologia. No caso particular deste setor, a mesma foi aplicada para permitir a obtenção e a respetiva análise de previsões das atitudes dos(as) agentes envolvidos(as) em diferentes tarefas que afetam diretamente a gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Especificamente no contexto da análise de TMAs, a aplicação da Teoria das Cadeias de Markov permitiu também criar métodos de previsão de diversos parâmetros, como por exemplo, da probabilidade de ocorrência de possíveis conflitos entre as aeronaves, da probabilidade de ocorrência de condições meteorológicas adversas, da automatização e da otimização da definição de rotas para as aeronaves. Complementarmente, a aplicação desta metodologia permitiu também analisar e otimizar o sequenciamento de aeronaves que circulam nas TMAs, aferindo consequentemente o grau de congestionamento verificado tanto em voo como no solo.

Por outro lado, é necessário ter em conta as limitações das Cadeias de Markov e, sempre que possível, combatê-las através de decisões apropriadas para cada situação. No caso particular da dimensão dos dados, foi definido um período de tempo suficientemente alargado que permitirá uma análise e interpretação concreta do padrão de comportamento do fluxo de tráfego aéreo e consequente obtenção de previsão de comportamento futuro. Salienta-se, porém, que a dimensão dos dados foi um dos fatores de complexidade e morosidade na construção das redes dinâmicas, devido à necessidade de tratamento e de triagem inicial. Adicionalmente, este fator conseguirá lidar com outra limitação, nomeadamente, a falta de memória, sendo possível observar o comportamento do fluxo de tráfego aéreo ao longo de diversos períodos de tempo, permitindo prever e pré-definir medidas que poderão ser implementadas.

Inicialmente, pretendia-se efetuar a modelação de uma única rede dinâmica, mas, após o estudo das potencialidades das Cadeias de Markov e a riqueza dos dados recolhidos, foram definidas nove redes dinâmicas com o intuito de albergarem o máximo de informação possível. Dessa forma, será possível verificar a disparidade ou a semelhança do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, dependendo do período de tempo em análise e/ou dos horários de funcionamento do Aeroporto de Lisboa. Salienta-se que o número de estados e os respetivos intervalos de ocupação foram definidos após várias tentativas com o intuito de representarem, da forma mais fidedigna possível, a realidade vivenciada na TMA de Lisboa.

Folha em branco

Capítulo 5

Análise Numérica das Redes Markovianas

Por fim, e após uma vasta e detalhada análise das metodologias e dos métodos desenvolvidas(os) por inúmeros(as) autores(as) com o intuito de lidarem com os principais problemas que se destacam da observação do normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, é necessário, de uma forma prática e dinâmica, analisar de forma numérica e crítica as nove redes dinâmicas criadas no Capítulo 4.

Após a análise efetuada ao longo deste trabalho de investigação é possível afirmar que o comportamento do fluxo de tráfego aéreo é gerido por inúmeras redes, nomeadamente, de metodologias, de ferramentas e até mesmo de pessoas, sendo que a operação das aeronaves pode também ser representada através de uma rede. Essa rede é constituída por um conjunto de nós que representam as TMAs e por arcos que representam as rotas efetuadas pelas aeronaves para que se possam deslocar entre dois nós distintos. A título exemplificativo, a Figura 5.1 representa uma visão geral do fluxo de tráfego aéreo no espaço europeu a 02/02/2019, de forma a ser mais fácil a representação da rede referida anteriormente, sendo possível identificar algumas das características benéficas e prejudiciais da mesma. Apesar de não ser o intuito deste subcapítulo efetuar essa identificação, é possível concluir que esta estrutura permite uma melhor organização e elaboração dos planeamentos das operações de tráfego aéreo, tendo como intenção garantir os níveis de segurança pretendidos, apesar da sua complexidade ser extremamente elevada devido à quantidade de infraestruturas aeroportuárias existentes e, principalmente, do facto de cada uma delas se encontrar localizada em países regidos por especificidades legislativas distintas. Para além disso, é fundamental referir que as aterragens e as descolagens são processos relativamente rápidos e, tendo em conta a simultaneidade permitida em inúmeras infraestruturas aeroportuárias, para além da dependência de voos e das respetivas escalas, a otimização destes processos permitirá uma maior rapidez de resposta por parte dos(as) agentes envolvidos(as).

Independentemente das pretensões dos modelos criados até aos dias de hoje e, principalmente, a necessidade de salvaguardar um tratamento de equidade entre as aeronaves que entram, circulam e saem de cada TMA, é importante listar, por ordem alfabética e não de importância, alguns dos principais voos que representam uma exceção à regra anteriormente citada, encontrando-se os mesmos apresentados na Tabela 5.1. Por este motivo, os voos em causa não se encontram contemplados neste trabalho de investigação.

Tabela 5.1 – Principais Voos com Prioridade [36]

Voos com Prioridade de Aterragem e/ou de Descolagem
Voos de carácter médico validados por alguma autoridade médica
Voos de emergência

Voos com Prioridade de Aterragem e/ou de Descolagem
Voos de testes de aeronaves e/ou de algum tipo de verificação e/ou de inspeção de aeronaves
Voos decorrentes de operações militares, como por exemplo, em missões de guerra, de segurança interna ou de manobras militares
Voos em missões de busca e salvamento
Voos em missões de defesa nacional
Voos que transportem pessoas relevantes no contexto político e/ou religioso
Voos realizados por razões humanitárias
Voos sujeitos a interferências ilegais

A qualquer momento, tal como é possível verificar através da Figura 5.1, existem milhares de aeronaves que voam simultaneamente e, consequentemente, também já estão planeados milhares de voos para os(as) próximos(as) segundos, minutos, horas, dias, semanas e meses. Por este facto, é importante manter presente a principal característica do setor do transporte aéreo, nomeadamente, a promessa da constante conectividade com todos os nós e, por outro lado, a garantia da equidade entre as aeronaves, independentemente do tipo e da duração de(o) voo, da companhia de transporte aéreo que efetua o voo e de tantas outras características intrínsecas aos(às) clientes que optam por este meio de transporte [270].

Figura 5.1 – Exemplo de Rede Europeia [268]

A grande maioria dos sistemas existentes são dinâmicos e têm como principal particularidade a sua complexidade, sendo que a mesma só poderá ser adequadamente descrita se os dados recolhidos forem reais, mas, no caso do fluxo de tráfego aéreo, a disponibilização dos mesmos não se encontra tão facilitada quanto seria expectável. Para além de dinâmico, o sistema que rege este setor é aberto, visto que muitas variáveis externas têm impacto sobre o mesmo [62]. O estudo e a consequente análise do comportamento deste tipo de sistemas permitem antever reações futuras de acordo com as variáveis pré-estabelecidas, auxiliando no planeamento e na tomada de decisões a curto, médio e/ou longo prazo, consoante o carácter de urgência e o impacto das mudanças que possam ocorrer no sistema em causa.

A complexidade visível desta rede dinâmica é também devida à vasta heterogeneidade de operações e de agentes envolvidos(as) e, por outro lado, devido ao facto de cada um(a) deles(as) possuir objetivos e metas operacionais, temporais e financeiras distintas, aliada a uma vasta componente de incerteza que existe constantemente. O aumento da procura e a intenção do cumprimento de todos(as) estes(as) objetivos e metas impõe uma elevada pressão a todos(as), mas, apesar dos esforços, a limitação dos recursos persiste como sendo a maior lacuna encontrada.

O culminar deste trabalho de investigação é alcançado através da aplicação prática dos conceitos teóricos apresentados anteriormente e na análise aprofundada das redes dinâmicas criadas preliminarmente no subcapítulo 4.5, realçando que a validade das mesmas dependerá da veracidade e da relevância dos dados utilizados. Caso este objetivo seja verificado, será possível, em futuros trabalhos de investigação, extrapolar as conclusões obtidas para outras TMAs, salvaguardando as devidas circunstâncias e particularidades.

O presente capítulo é constituído por três subcapítulos, sendo que cada um deles será apresentado de forma resumida. O subcapítulo 5.1 e o subcapítulo 5.2 reúnem a análise detalhada das diferentes redes dinâmicas criadas neste trabalho de investigação, assim como o seu impacto para a temática e para os objetivos pré-definidos. O subcapítulo 5.3 condensa os principais pontos analisados durante o Capítulo 5 e sugere medidas benéficas consequentes da análise crítica efetuada durante a sua redação.

5.1 Apresentação dos Dados

Antes de cada uma das nove redes dinâmicas ser analisada de forma detalhada, existem inúmeras especificidades e/ou particularidades que deverão ser apresentadas e contextualizadas devido ao seu impacto direto não só na análise que se pretende efetuar, como também na implementação de novas redes dinâmicas no contexto da Teoria das Cadeias de Markov.

5.1.1 Tipos de Aeronaves

Através da análise da tipologia das aeronaves presentes na amostra utilizada, é possível evidenciar o seu grau de complexidade operacional e a quantidade de passageiros(as), carga e correio transportados(as) por cada uma delas. Os tipos de aeronaves encontram-se listados, por ordem alfabética, no Anexo C deste trabalho de investigação, recordando que estes dados foram recolhidos através de uma amostra de 220277 voos. Após a análise do Anexo C é possível validar a afirmação anterior, visto que na amostra recolhida foram registados voos em 594 aeronaves diferentes, possuindo cada uma delas especificidades de aeronavegabilidade distintas, assim como parâmetros de classificação igualmente díspares.

Na amostra recolhida existem tanto aeronaves ultraligeiras que transportam apenas duas pessoas, como também as maiores aeronaves de transporte comercial que transportam centenas de pessoas. Por este motivo, a complexidade das aeronaves torna-se ainda mais patente, pois os(as) agentes também necessitam de ter em conta as especificidades estruturais destas aeronaves com o intuito de salvaguardarem a sua segurança e consequente segurança dos(as) envolvidos(as). Adicionalmente, existe ainda o facto de o Aeroporto de Lisboa ser um *hub* internacional de reconhecida importância, requerendo por isso uma coordenação exemplar entre os(as) agentes que asseguram a interligação correta entre as aeronaves e os(as) respetivos(as) passageiros(as), carga e/ou correio transportados(as).

5.1.2 Impacto das Variáveis

Recordando a vasta listagem de variáveis apresentadas no subcapítulo 2.4, a título exemplificativo será analisado o impacto das condições meteorológicas na gestão da capacidade existente para a TMA de Lisboa. De forma genérica, no âmbito dos valores de precipitação registados pelo Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA), foram registados impactos significativamente negativos em três meses, nomeadamente, abril, novembro e dezembro. Destes três meses destaca-se o mês de dezembro em que se verificou a passagem de três depressões, originando precipitação persistentemente forte e rajadas de vento muito fortes entre o período de 12/12/2019 a 22/12/2019 [269].

Tendo em conta que o período indicado anteriormente diz respeito a um evento em particular, nenhuma das redes dinâmicas criadas no subcapítulo 4.5.4 descreve, corretamente, o período em concreto, sendo necessário definir a nova Matriz de Transição de Estados (Equação 5.1), a nova Matriz de Probabilidade de Transição (Equação 5.2) e o novo grafo da rede dinâmica que se encontra apresentado na Figura 5.2.

$$N_{RD} = \begin{bmatrix} 6 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 5 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \tag{5.1}$$

$$P_{RD} = \begin{bmatrix} 6/7 & 1/7 & 0 & 0 & 0 \\ 1/5 & 2/5 & 1/5 & 1/5 & 0 \\ 0 & 1/7 & 5/7 & 1/7 & 0 \\ 0 & 1/3 & 1/3 & 0 & 1/3 \\ 0 & 0 & 0 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \tag{5.2}$$

Verifica-se que nem todas as transições representadas na segunda matriz possuem um valor atribuído, o que significa que, no respetivo grafo, não terão qualquer representação. Apesar desta especificação, iniciando a análise do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é possível, a partir de qualquer estado *i*, atingir qualquer outro estado *j*.

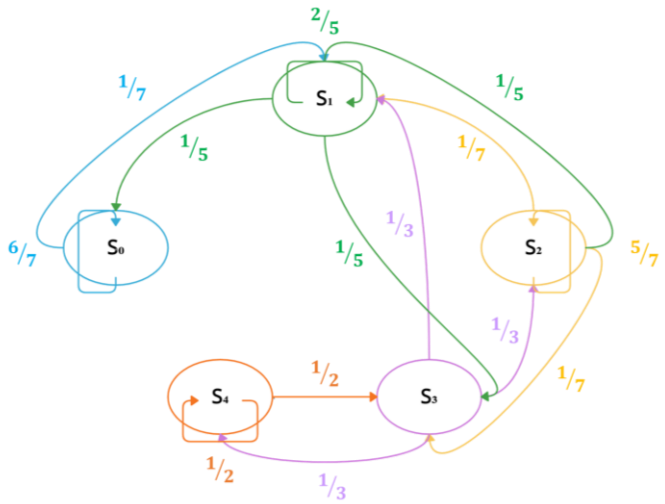

Figura 5.2 – Grafo da Rede Dinâmica [267]

Através da observação da Figura 5.2, é possível verificar que partindo de um determinado estado *i*, utilizando somente os arcos definidos para efetuar os seus movimentos, a rede dinâmica em análise conseguirá atingir qualquer estado *j*, sendo que por este motivo o grafo é classificado como conexo.

Por outro lado, verifica-se que a taxa de ocupação da TMA de Lisboa é significativamente preocupante neste período de tempo, visto que ao longo dos vinte e quatro intervalos de uma hora estipulados para a rede dinâmica, em 50% deles a taxa de ocupação é superior a 80% e, mais preocupante ainda, em 42% deles a taxa de ocupação é superior a 90%.

Adicionalmente, quando a rede dinâmica atinge o estado S_4, a probabilidade da capacidade de redução do congestionamento de aeronaves é significativamente reduzida, revelando a complexidade da gestão adequada de tantas aeronaves em operação nesta TMA.

Aliada à quantidade de aeronaves em operação simultânea na TMA de Lisboa, verificaram-se ainda condições meteorológicas com impacto negativo nestas operações, afetando, por exemplo, a visibilidade para a aterragem ou para a descolagem das aeronaves, a contaminação das pistas da infraestrutura aeroportuária, a velocidade dos ventos que requer cuidados especiais e adaptações no desempenho de inúmeras tarefas por parte dos(as) agentes e até mesmo atrasos na realização das inúmeras tarefas que compõem a rotação de uma determinada aeronave.

5.1.3 Taxa de Ocupação

A análise da variação da taxa de ocupação da TMA de Lisboa permite observar o seu comportamento ao longo dos vinte e quatro períodos horários de cada rede dinâmica, verificando em quais desses períodos se constata uma ou mais situações de congestionamento, sendo primordial assinalar a duração destas situações graves que afetam o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo [243, 270, 271].

Para cada uma das nove redes dinâmicas construídas neste trabalho de investigação, será apresentada a variação da taxa de ocupação sob a forma de gráfico, sendo efetuada uma análise sucinta dos dados apresentados. Adicionalmente, salienta-se que o conhecimento da taxa de ocupação e, nomeadamente, a sua variação ao longo do dia, é um dos parâmetros fundamentais que, aliado à aplicabilidade da Teoria das Cadeias de Markov, permitirá a realização de previsões relativamente ao comportamento de cada uma das nove redes dinâmicas criadas.

5.1.3.1 RD-A

Através do Gráfico 5.1 é possível verificar que existem duas situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 20h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente catorze horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em três momentos ao longo do dia, nomeadamente, entre as 13h00 e as 13h59, entre as 15h00 e as 15h59, e entre as 17h00 e as 18h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

Salienta-se ainda que entre as 09h00 e as 09h59 a capacidade da TMA de Lisboa torna-se insuficiente para albergar todas as aeronaves, originando a imputação de atrasos a inúmeras aeronaves.

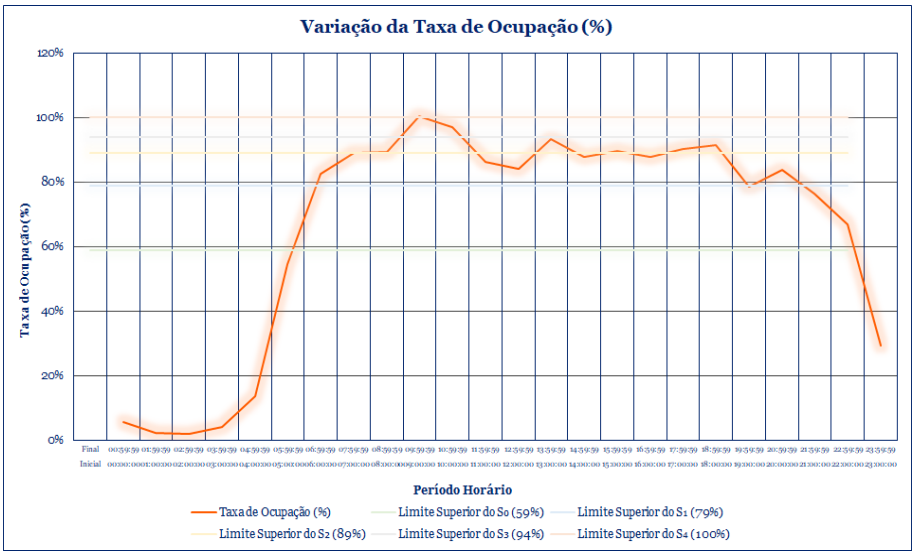

Gráfico 5.1 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-A

5.1.3.2 RD-B

Através do Gráfico 5.2 é possível verificar que existem duas situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 21h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente quinze horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em dois momentos ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 20h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

Salienta-se ainda que entre as 09h00 e as 10h59, entre as 13h00 e as 13h59, e entre as 17h00 e as 17h59 a capacidade da TMA de Lisboa torna-se insuficiente para albergar todas as aeronaves, originando a imputação de atrasos a inúmeras aeronaves.

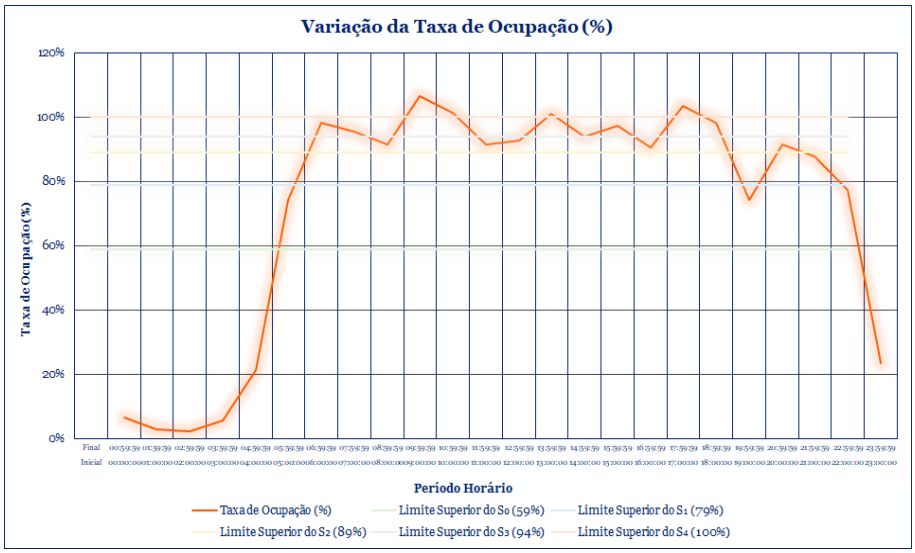

Gráfico 5.2 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-B

5.1.3.3 RD-C

Através do Gráfico 5.3 é possível verificar que existem três situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 08h00 e as 10h59, entre as 15h00 e as 16h59, e entre as 18h00 e as 19h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente sete horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em um momento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 09h00 e as 09h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

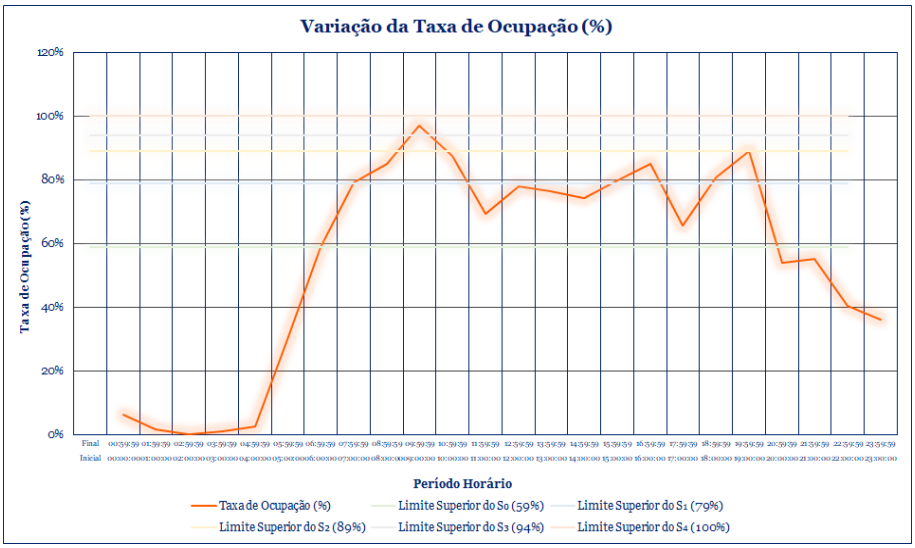

Gráfico 5.3 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-C

5.1.3.4 RD-D

Através do Gráfico 5.4 é possível verificar que existem duas situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 21h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente quinze horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em dois momentos ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 20h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

Salienta-se ainda que entre as 06h00 e as 06h59, entre as 09h00 e as 09h59, entre as 12h00 e as 13h59, entre as 15h00 e as 15h59, e entre as 17h00 e as 18h59 a capacidade da TMA de Lisboa torna-se insuficiente para albergar todas as aeronaves, originando a imputação de atrasos a inúmeras aeronaves.

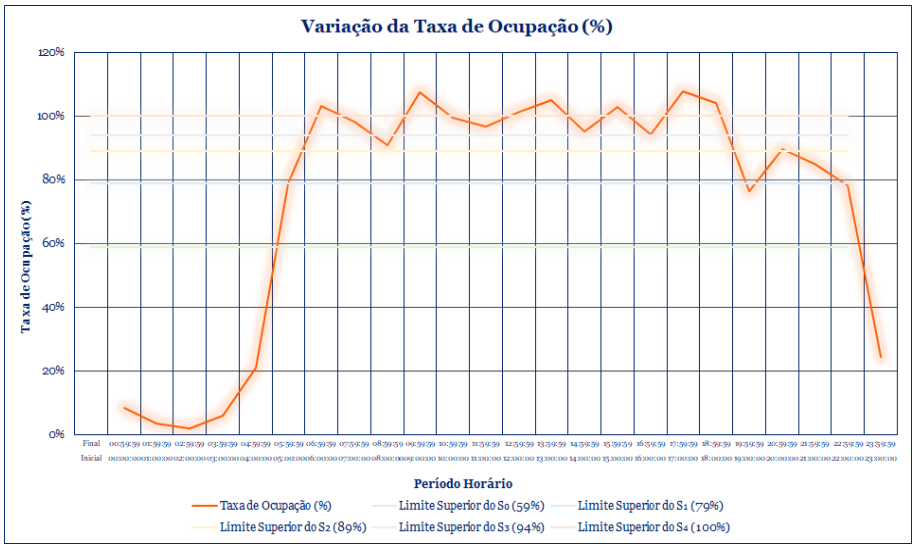

Gráfico 5.4 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-D

5.1.3.5 RD-E

Através do Gráfico 5.5 é possível verificar que existem duas situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 22h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente dezasseis horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em três momentos ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 07h59, entre as 09h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 20h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

Salienta-se ainda que entre as 06h00 e as 06h59, entre as 09h00 e as 10h59, entre as 13h00 e as 13h59, e entre as 17h00 e as 17h59 a capacidade da TMA de Lisboa torna-se insuficiente para albergar todas as aeronaves, originando a imputação de atrasos a inúmeras aeronaves.

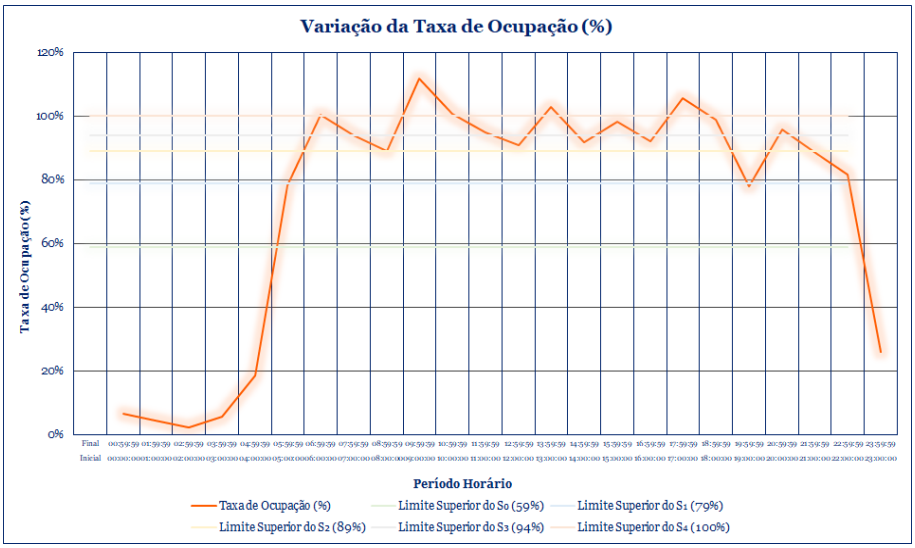

Gráfico 5.5 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-E

5.1.3.6 RD-F

Através do Gráfico 5.6 é possível verificar que existem duas situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 22h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente dezasseis horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em dois momentos ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 21h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

Salienta-se ainda que entre as 09h00 e as 10h59, entre as 13h00 e as 13h59, e entre as 17h00 e as 17h59 a capacidade da TMA de Lisboa torna-se insuficiente para albergar todas as aeronaves, originando a imputação de atrasos a inúmeras aeronaves.

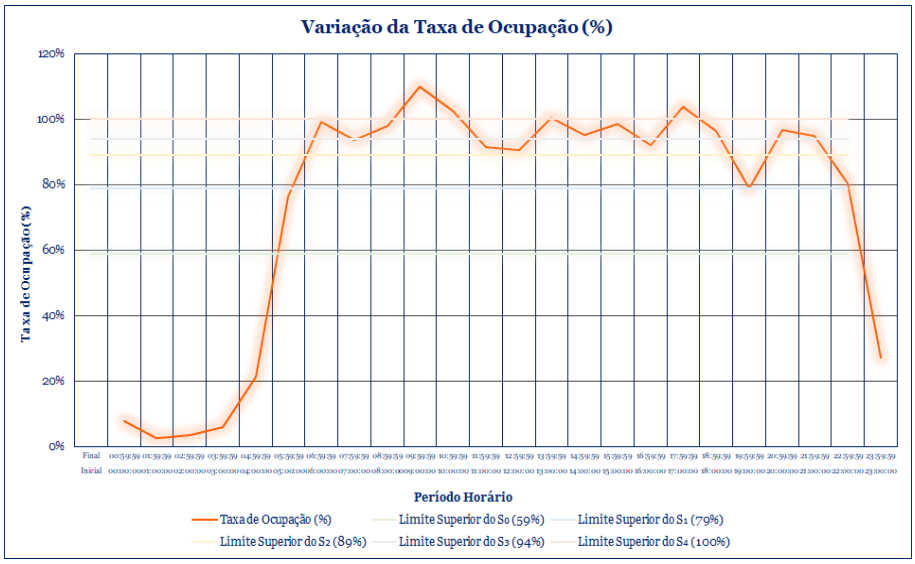

Gráfico 5.6 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-F

5.1.3.7 RD-G

Através do Gráfico 5.7 é possível verificar que existem duas situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 21h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente quinze horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em quatro momentos ao longo do dia, nomeadamente, entre as 06h00 e as 06h59, entre as 08h00 e as 15h59, entre as 17h00 e as 18h59, e entre as 20h00 e as 20h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

Salienta-se ainda que entre as 09h00 e as 10h59, e entre as 17h00 e as 17h59 a capacidade da TMA de Lisboa torna-se insuficiente para albergar todas as aeronaves, originando a imputação de atrasos a inúmeras aeronaves.

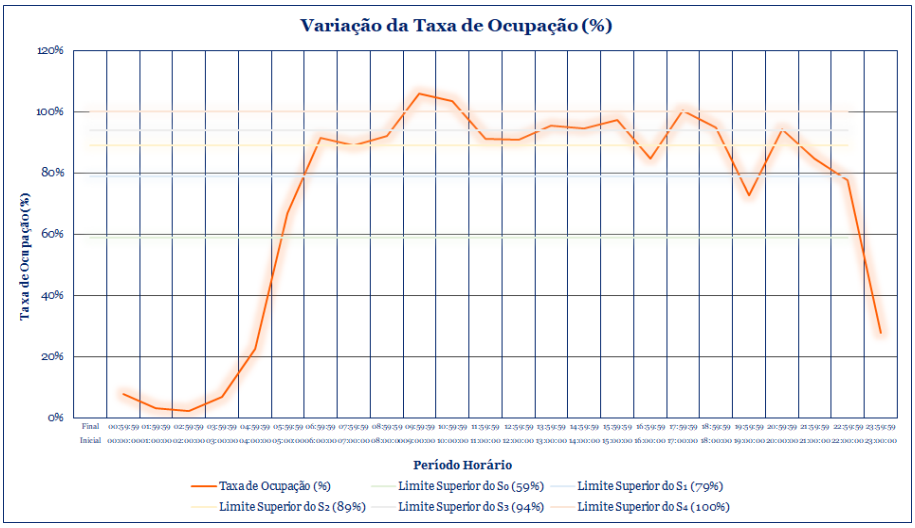

Gráfico 5.7 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-G

5.1.3.8 RD-H

Através do Gráfico 5.8 é possível verificar que existem duas situações de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 07h00 e as 11h59, e entre as 13h00 e as 19h59, sendo que nestes períodos de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando momentos que requerem a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente doze horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em dois momentos ao longo do dia, nomeadamente, entre as 08h00 e as 10h59, e entre as 19h00 e as 19h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

Salienta-se ainda que entre as 10h00 e as 10h59 a capacidade da TMA de Lisboa torna-se insuficiente para albergar todas as aeronaves, originando a imputação de atrasos a inúmeras aeronaves.

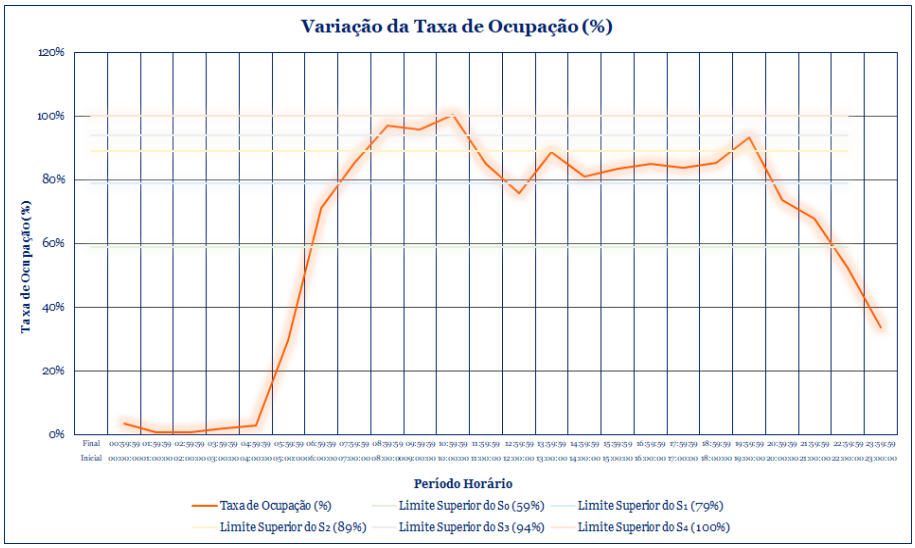

Gráfico 5.8 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-H

5.1.3.9 RD-I

Através do Gráfico 5.9 é possível verificar que existe uma situação de congestionamento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 08h00 e as 20h59, sendo que neste período de tempo a taxa de ocupação é igual ou superior a 80%, representando um momento que requer a implementação de medidas, tornando a gestão do fluxo de tráfego aéreo bastante exaustiva, pois o período de tempo em causa dura aproximadamente treze horas.

Por outro lado, o grau de saturação da capacidade torna-se preocupante quando a taxa de ocupação atinge e/ou supera os 90%, ocorrendo em um momento ao longo do dia, nomeadamente, entre as 09h00 e as 10h59, podendo originar uma situação catastrófica de congestionamento descontrolado e sendo impossível responder ativa e prontamente a qualquer situação de emergência.

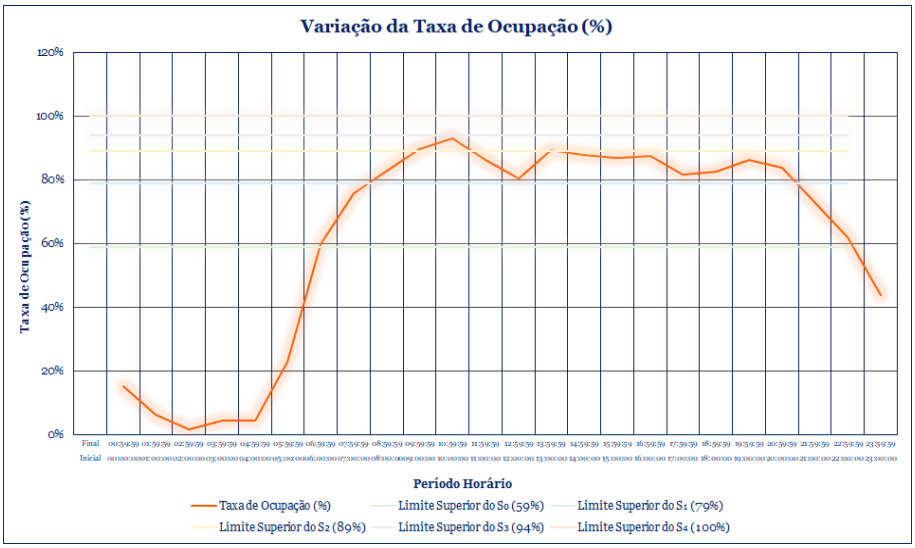

Gráfico 5.9 – Variação da Taxa de Ocupação da RD-I

5.1.4 Análise das Redes Dinâmicas

Após a realização dos três primeiros passos apresentados no subcapítulo 4.5, é necessário responder ao quarto passo, designadamente, calcular os valores de probabilidade do Processo de Markov, nomeadamente, a distribuição de probabilidades estacionária e o tempo médio de recorrência, entre outros parâmetros que possam ser considerados como pertinentes e relevantes para o trabalho de investigação realizado [240]. Para que este passo seja adequadamente realizado é necessário efetuar uma análise pormenorizada de cada uma das nove redes dinâmicas criadas, examinando a sua estrutura e os seus estados.

A determinação da distribuição de probabilidades estacionária de cada rede dinâmica permitirá descrever o seu comportamento com o intuito de efetuar uma previsão a um longo prazo, sendo que a validade deste resultado se encontra diretamente dependente da extensão dos dados recolhidos e da sua veracidade. Este dado é apresentado sob a forma de uma matriz de uma linha com um valor adequado para cada um dos estados que compõem as diferentes redes dinâmicas. Observando este parâmetro será possível verificar se existe uma tendência significativa para que cada rede dinâmica permaneça em estados considerados como problemáticos e/ou preocupantes. Alerta-se para o facto de que este parâmetro só poderá ser obtido se a rede dinâmica em análise for, simultaneamente, irredutível e aperiódica [243, 270, 271].

Além disso, é fundamental calcular o tempo médio de recorrência esperado de forma precisa com o intuito de identificar quanto tempo, em média, determinados estados voltam a ser observados em cada rede dinâmica.

Este dado é apresentado sob a forma de uma matriz e é imprescindível para que os(as) agentes possam definir a organização das TMIs que deverão implementar em cada momento.

Paralelamente ao parâmetro apresentado anteriormente, o cálculo do tempo médio de transição entre dois quaisquer estados de uma determinada rede dinâmica é fundamental para verificar quando ocorrerá a revisita a cada um dos estados que compõem a rede dinâmica em análise.

5.1.4.1 RD-A

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Estados da RD-A

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_2
	Desde S_1	S_0, S_1 e S_2
	Desde S_2	S_1, S_2, S_3 e S_4
	Desde S_3	S_1, S_2 e S_3
	Desde S_4	S_2 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
	Condição Simétrica	$S_1 \Leftrightarrow S_2$, $S_2 \Leftrightarrow S_3$ e $S_2 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma

Posteriormente, verifica-se através da observação da Figura 4.3 que é possível, partindo de um determinado estado inicial, alcançar todos os demais estados e, como tal, a rede dinâmica é classificada como irredutível e a mesma é considerada como aperiódica. Consequentemente, a rede dinâmica em causa pode ser classificada como ergódica por respeitar os dois parâmetros citados anteriormente. Através desta conclusão é possível determinar a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.3 e Equação 5.4).

$$\begin{cases} \pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40} \\ \pi_1 = \pi_0 P_{01} + \pi_1 P_{11} + \pi_2 P_{21} + \pi_3 P_{31} + \pi_4 P_{41} \\ \pi_2 = \pi_0 P_{02} + \pi_1 P_{12} + \pi_2 P_{22} + \pi_3 P_{32} + \pi_4 P_{42} \\ \pi_3 = \pi_0 P_{03} + \pi_1 P_{13} + \pi_2 P_{23} + \pi_3 P_{33} + \pi_4 P_{43} \\ \pi_4 = \pi_0 P_{04} + \pi_1 P_{14} + \pi_2 P_{24} + \pi_3 P_{34} + \pi_4 P_{44} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \end{cases} \tag{5.3}$$

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{7}{24} & \frac{1}{8} & \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{12} \end{bmatrix} \tag{5.4}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.4, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Após a conclusão de que a RD-A representa uma Cadeia de Markov ergódica, existem dois parâmetros de especial interesse que poderão ser determinados, nomeadamente, o tempo médio de recorrência esperado a um determinado estado e o tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise. Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.3. A unidade de medida deste parâmetro é facilmente adaptável a cada rede dinâmica em análise, sendo genericamente denominada por passos e/ou observações.

Tabela 5.3 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-A – Versão Inicial

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	24/7
μ_{11}	8
μ_{22}	3
μ_{33}	6
μ_{44}	12

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.3, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Por fim, os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (f_{ij}) (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.4.

$$f_{ij}(2) = P_{ij}(2) - f_{ij}(1)P_{jj}$$
$$f_{ij}(2) = P_{ij}(2) - P_{ij}P_{jj} \tag{5.5}$$

Tabela 5.4 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-A

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	1/56
$S_0 \Rightarrow S_2$	6/49
$S_0 \Rightarrow S_3$	3/56
$S_0 \Rightarrow S_4$	1/56
$S_1 \Rightarrow S_0$	1/9
$S_1 \Rightarrow S_2$	10/63
$S_1 \Rightarrow S_3$	1/8
$S_1 \Rightarrow S_4$	1/24
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/24
$S_2 \Rightarrow S_1$	9/64
$S_2 \Rightarrow S_3$	9/64
$S_2 \Rightarrow S_4$	3/64
$S_3 \Rightarrow S_0$	1/12
$S_3 \Rightarrow S_1$	1/8
$S_3 \Rightarrow S_2$	5/24
$S_3 \Rightarrow S_4$	1/16
$S_4 \Rightarrow S_0$	0
$S_4 \Rightarrow S_1$	1/16
$S_4 \Rightarrow S_2$	1/4
$S_4 \Rightarrow S_3$	3/16

Por fim, mas não menos importante, torna-se também relevante avaliar a reversibilidade de cada rede dinâmica (Equação 5.6), encontrando-se os resultados dessa análise apresentados na Tabela 5.5.

$$\pi_i P_{ij} = \pi_j P_{ji} \tag{5.6}$$

Tabela 5.5 – Reversibilidade da RD-A – Versão Inicial

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☑
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☒

Através da observação e da análise da Tabela 5.5 salienta-se que, na coluna denominada por "Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados" existe um símbolo amarelo. Nestas situações, apesar da igualdade em avaliação ser verificada, a mesma não representa a reversibilidade entre os dois estados em averiguação.

Por outro lado, e relembrando a Figura 4.3, é possível afirmar que existe reversibilidade entre três pares de estados, sendo que essa informação não se encontra retratada na Tabela 5.5. Desta forma, é possível afirmar que a distribuição de probabilidades estacionária representada na Equação 5.4 caracteriza um sistema de equações possível e indeterminado, sendo necessário acrescentar à Equação 5.3 as três condições de reversibilidade demonstradas pelo grafo da RD-A, obtendo-se assim um novo sistema de equações (Equação 5.7) e a respetiva distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.8).

$$\begin{cases} \pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40} \\ \pi_1 = \pi_0 P_{01} + \pi_1 P_{11} + \pi_2 P_{21} + \pi_3 P_{31} + \pi_4 P_{41} \\ \pi_2 = \pi_0 P_{02} + \pi_1 P_{12} + \pi_2 P_{22} + \pi_3 P_{32} + \pi_4 P_{42} \\ \pi_3 = \pi_0 P_{03} + \pi_1 P_{13} + \pi_2 P_{23} + \pi_3 P_{33} + \pi_4 P_{43} \\ \pi_4 = \pi_0 P_{04} + \pi_1 P_{14} + \pi_2 P_{24} + \pi_3 P_{34} + \pi_4 P_{44} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \\ \pi_1 P_{12} = \pi_2 P_{21} \\ \pi_2 P_{23} = \pi_3 P_{32} \\ \pi_2 P_{24} = \pi_4 P_{42} \end{cases} \tag{5.7}$$

$$\pi = \left[\frac{7}{26} \quad \frac{3}{26} \quad \frac{4}{13} \quad \frac{3}{13} \quad \frac{1}{13}\right] \tag{5.8}$$

No seguimento da determinação da nova distribuição de probabilidades estacionária, surge a necessidade de recalcular o tempo médio de recorrência esperado (Tabela 5.6) e, por fim, a reversibilidade desta rede dinâmica (Tabela 5.7), confirmando a informação presente no respetivo grafo.

Tabela 5.6 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-A – Versão Final

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	26/7
μ_{11}	26/3
μ_{22}	13/4
μ_{33}	13/3
μ_{44}	13

Tabela 5.7 – Reversibilidade da RD-A – Versão Final

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☑
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☑
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☒

5.1.4.2 RD-B

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.8.

Tabela 5.8 – Estados da RD-B

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_0, S_3 e S_4
	Desde S_2	S_1
	Desde S_3	S_2, S_3 e S_4
	Desde S_4	S_1, S_3 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_3 e S_4
	Condição Simétrica	$S_0 \Leftrightarrow S_1$, $S_1 \Leftrightarrow S_4$ e $S_3 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma

À semelhança do raciocínio efetuado para a RD-A, a RD-B é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica, sendo por isso possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.9), através da aplicação da Equação 5.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{24} & \frac{1}{4} & \frac{1}{3} \end{bmatrix} \tag{5.9}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.9, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-B

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	4
μ_{11}	8
μ_{22}	24
μ_{33}	4
μ_{44}	3

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.9, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-B

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	5/36
$S_0 \Rightarrow S_2$	0
$S_0 \Rightarrow S_3$	1/18
$S_0 \Rightarrow S_4$	1/18
$S_1 \Rightarrow S_0$	0
$S_1 \Rightarrow S_2$	1/18
$S_1 \Rightarrow S_3$	1/6
$S_1 \Rightarrow S_4$	2/9
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/3
$S_2 \Rightarrow S_1$	0
$S_2 \Rightarrow S_3$	1/3
$S_2 \Rightarrow S_4$	1/3
$S_3 \Rightarrow S_0$	0
$S_3 \Rightarrow S_1$	1/4
$S_3 \Rightarrow S_2$	1/36
$S_3 \Rightarrow S_4$	1/9
$S_4 \Rightarrow S_0$	1/24
$S_4 \Rightarrow S_1$	3/64
$S_4 \Rightarrow S_2$	1/12

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_4 \Rightarrow S_3$	11/48

Por fim, a Tabela 5.11 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-B.

Tabela 5.11 – Reversibilidade da RD-B

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☑
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☑
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☒
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☑

5.1.4.3 RD-C

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 – Estados da RD-C

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_1 e S_2
	Desde S_2	S_0, S_1, S_2 e S_4
	Desde S_3	N/A
	Desde S_4	S_2
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_1 e S_2
	Condição Simétrica	$S_1 \Leftrightarrow S_2$ e $S_2 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1. S_2 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma, ignorando a existência do S_3

No caso particular da RD-C, é possível verificar que o estado S_3 para além de não ser essencial, torna-se inútil tendo em conta os intervalos de ocupação da TMA de Lisboa definidos para cada estado que compõe a presente rede dinâmica. Por esse motivo, sugere-se a readequação da RD-C, unindo em um único estado o estado S_3 e o estado S_2, sendo que a nova RD-C será constituída por quatro estados em vez de cinco estados como foi inicialmente delineada.

Desta forma, é possível afirmar que a RD-C é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica e, como tal, é possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.10), através da aplicação da Equação 5.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{11}{24} & \frac{1}{4} & \frac{1}{4} & \frac{1}{24} \end{bmatrix} \tag{5.10}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.10, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.13 os resultados obtidos para os estados que compõem a rede dinâmica em análise.

Tabela 5.13 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-C – Versão Inicial

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	24/11
μ_{11}	4
μ_{22}	4
μ_{33}	24

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.13, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-C

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	10/121
$S_0 \Rightarrow S_2$	1/22
$S_0 \Rightarrow S_3$	0
$S_1 \Rightarrow S_0$	1/12
$S_1 \Rightarrow S_2$	1/4
$S_1 \Rightarrow S_3$	1/12
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/18
$S_2 \Rightarrow S_1$	25/198
$S_2 \Rightarrow S_3$	4/9
$S_3 \Rightarrow S_0$	1/6
$S_3 \Rightarrow S_1$	1/3
$S_3 \Rightarrow S_2$	0

Por fim, a Tabela 5.15 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-C.

Tabela 5.15 – Reversibilidade da RD-C – Versão Inicial

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☑

Por outro lado, e relembrando a Figura 4.5, é possível afirmar que existe reversibilidade entre dois pares de estados, sendo que essa informação não se encontra retratada na Tabela 5.15. Desta forma, é possível afirmar que a distribuição de probabilidades estacionária representada na Equação 5.10 caracteriza um sistema de equações possível e indeterminado, sendo necessário acrescentar à Equação 5.3, devidamente ajustada devido à redução do número de estados da rede dinâmica em análise, as duas condições de reversibilidade demonstradas pelo grafo da RD-C, obtendo-se assim um novo sistema de equações (Equação 5.11) e a respetiva distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.12).

$$\begin{cases} \pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} \\ \pi_1 = \pi_0 P_{01} + \pi_1 P_{11} + \pi_2 P_{21} + \pi_3 P_{31} \\ \pi_2 = \pi_0 P_{02} + \pi_1 P_{12} + \pi_2 P_{22} + \pi_3 P_{32} \\ \pi_3 = \pi_0 P_{03} + \pi_1 P_{13} + \pi_2 P_{23} + \pi_3 P_{33} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 = 1 \\ \pi_1 P_{12} = \pi_2 P_{21} \\ \pi_2 P_{23} = \pi_3 P_{32} \end{cases} \tag{5.11}$$

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{2}{11} & \frac{3}{11} & \frac{1}{22} \end{bmatrix} \tag{5.12}$$

No seguimento da determinação da nova distribuição de probabilidades estacionária, surge a necessidade de recalcular o tempo médio de recorrência esperado (Tabela 5.16) e, por fim, a reversibilidade desta rede dinâmica (Tabela 5.17), confirmando a informação presente no respetivo grafo.

Tabela 5.16 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-C – Versão Final

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	2
μ_{11}	11/2
μ_{22}	11/3
μ_{33}	22

Tabela 5.17 – Reversibilidade da RD-C – Versão Final

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☑
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☑

5.1.4.4 RD-D

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 – Estados da RD-D

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_0, S_3 e S_4
	Desde S_2	S_1
	Desde S_3	S_2 e S_4
	Desde S_4	S_1, S_3 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0 e S_4
	Condição Simétrica	$S_0 \Leftrightarrow S_1$, $S_1 \Leftrightarrow S_4$ e $S_3 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma

À semelhança do raciocínio efetuado para a RD-A, a RD-D é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica, sendo por isso possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.13), através da aplicação da Equação 5.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{24} & \frac{1}{8} & \frac{11}{24} \end{bmatrix} \tag{5.13}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.13, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5.19 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-D

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	4
μ_{11}	8

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{22}	24
μ_{33}	8
μ_{44}	24/11

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.19, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5.20 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-D

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	5/36
$S_0 \Rightarrow S_2$	0
$S_0 \Rightarrow S_3$	1/18
$S_0 \Rightarrow S_4$	1/18
$S_1 \Rightarrow S_0$	0
$S_1 \Rightarrow S_2$	1/9
$S_1 \Rightarrow S_3$	2/33
$S_1 \Rightarrow S_4$	2/9
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/3
$S_2 \Rightarrow S_1$	0
$S_2 \Rightarrow S_3$	1/3
$S_2 \Rightarrow S_4$	1/3
$S_3 \Rightarrow S_0$	0
$S_3 \Rightarrow S_1$	13/33
$S_3 \Rightarrow S_2$	0
$S_3 \Rightarrow S_4$	0
$S_4 \Rightarrow S_0$	1/33
$S_4 \Rightarrow S_1$	8/121
$S_4 \Rightarrow S_2$	2/33
$S_4 \Rightarrow S_3$	59/363

Por fim, a Tabela 5.21 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-D.

Tabela 5.21 – Reversibilidade da RD-D

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☑
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☑
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☒
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☑

5.1.4.5 RD-E

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.22.

Tabela 5.22 – Estados da RD-E

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_4
	Desde S_2	S_0, S_2 e S_4
	Desde S_3	S_2 e S_4
	Desde S_4	S_1, S_2, S_3 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_2 e S_4
	Condição Simétrica	$S_1 \Leftrightarrow S_4$, $S_2 \Leftrightarrow S_4$ e $S_3 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma

À semelhança do raciocínio efetuado para a RD-A, a RD-E é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica, sendo por isso possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.14), através da aplicação da Equação 5.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{6}{49} & \frac{3}{49} & \frac{15}{98} & \frac{10}{49} & \frac{45}{98} \end{bmatrix} \tag{5.14}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.14, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.23.

Tabela 5.23 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-E – Versão Inicial

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	49/6
μ_{11}	49/3
μ_{22}	98/15
μ_{33}	49/10
μ_{44}	98/45

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.23, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.24.

Tabela 5.24 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-E

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	5/36
$S_0 \Rightarrow S_2$	0
$S_0 \Rightarrow S_3$	0
$S_0 \Rightarrow S_4$	1/6
$S_1 \Rightarrow S_0$	0
$S_1 \Rightarrow S_2$	1/9
$S_1 \Rightarrow S_3$	4/9
$S_1 \Rightarrow S_4$	0
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/9
$S_2 \Rightarrow S_1$	5/54
$S_2 \Rightarrow S_3$	4/27
$S_2 \Rightarrow S_4$	1/9
$S_3 \Rightarrow S_0$	1/12
$S_3 \Rightarrow S_1$	1/12
$S_3 \Rightarrow S_2$	1/12
$S_3 \Rightarrow S_4$	1/12
$S_4 \Rightarrow S_0$	1/27
$S_4 \Rightarrow S_1$	1/27
$S_4 \Rightarrow S_2$	4/27
$S_4 \Rightarrow S_3$	4/27

Por fim, a Tabela 5.25 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-E.

Tabela 5.25 – Reversibilidade da RD-E – Versão Inicial

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☒

Por outro lado, e relembrando a Figura 4.7, é possível afirmar que existe reversibilidade entre três pares de estados, sendo que essa informação não se encontra retratada na Tabela 5.25. Desta forma, é possível afirmar que a distribuição de probabilidades estacionária representada na Equação 5.14 caracteriza um sistema de equações possível e indeterminado, sendo necessário acrescentar à Equação 5.3, as três condições de reversibilidade demonstradas pelo grafo da RD-E, obtendo-se assim um novo sistema de equações (Equação 5.15) e a respetiva distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.16).

$$\begin{cases} \pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40} \\ \pi_1 = \pi_0 P_{01} + \pi_1 P_{11} + \pi_2 P_{21} + \pi_3 P_{31} + \pi_4 P_{41} \\ \pi_2 = \pi_0 P_{02} + \pi_1 P_{12} + \pi_2 P_{22} + \pi_3 P_{32} + \pi_4 P_{42} \\ \pi_3 = \pi_0 P_{03} + \pi_1 P_{13} + \pi_2 P_{23} + \pi_3 P_{33} + \pi_4 P_{43} \\ \pi_4 = \pi_0 P_{04} + \pi_1 P_{14} + \pi_2 P_{24} + \pi_3 P_{34} + \pi_4 P_{44} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \\ \pi_1 P_{14} = \pi_4 P_{41} \\ \pi_2 P_{24} = \pi_4 P_{42} \\ \pi_3 P_{34} = \pi_4 P_{43} \end{cases} \tag{5.15}$$

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{18}{73} & \frac{3}{73} & \frac{9}{73} & \frac{16}{73} & \frac{27}{73} \end{bmatrix} \tag{5.16}$$

No seguimento da determinação da nova distribuição de probabilidades estacionária, surge a necessidade de recalcular o tempo médio de recorrência esperado (Tabela 5.26) e, por fim, a reversibilidade desta rede dinâmica (Tabela 5.27), confirmando a informação presente no respetivo grafo.

Tabela 5.26 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-E – Versão Final

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	73/18
μ_{11}	73/3
μ_{22}	73/9
μ_{33}	73/16
μ_{44}	73/27

Tabela 5.27 – Reversibilidade da RD-E – Versão Final

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☑
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☑

5.1.4.6 RD-F

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.28.

Tabela 5.28 – Estados da RD-F

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_4
	Desde S_2	S_0
	Desde S_3	S_3 e S_4
	Desde S_4	S_1, S_2, S_3 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_3 e S_4
	Condição Simétrica	$S_1 \Leftrightarrow S_4$ e $S_3 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma

À semelhança do raciocínio efetuado para a RD-A, a RD-F é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica, sendo por isso possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.17), através da aplicação da Equação 5.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{12} & \frac{1}{24} & \frac{1}{8} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \tag{5.17}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.17, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.29.

Tabela 5.29 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-F – Versão Inicial

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	4
μ_{11}	12
μ_{22}	24
μ_{33}	8
μ_{44}	2

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.29, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.30.

Tabela 5.30 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-F

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	5/36
$S_0 \Rightarrow S_2$	0
$S_0 \Rightarrow S_3$	0
$S_0 \Rightarrow S_4$	1/6
$S_1 \Rightarrow S_0$	0
$S_1 \Rightarrow S_2$	1/12
$S_1 \Rightarrow S_3$	1/6
$S_1 \Rightarrow S_4$	0
$S_2 \Rightarrow S_0$	0
$S_2 \Rightarrow S_1$	1/6
$S_2 \Rightarrow S_3$	0
$S_2 \Rightarrow S_4$	0
$S_3 \Rightarrow S_0$	0
$S_3 \Rightarrow S_1$	1/18
$S_3 \Rightarrow S_2$	1/18
$S_3 \Rightarrow S_4$	2/9
$S_4 \Rightarrow S_0$	1/12
$S_4 \Rightarrow S_1$	1/18
$S_4 \Rightarrow S_2$	1/18
$S_4 \Rightarrow S_3$	1/9

Por fim, a Tabela 5.31 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-F.

Tabela 5.31 – Reversibilidade da RD-F – Versão Inicial

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☒
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☑

Por outro lado, e relembrando a Figura 4.8, é possível afirmar que existe reversibilidade entre dois pares de estados, sendo que essa informação não se encontra retratada na Tabela 5.31. Desta forma, é possível afirmar que a distribuição de probabilidades estacionária representada na Equação 5.17 caracteriza um sistema de equações possível e indeterminado, sendo necessário acrescentar à Equação 5.3, as duas condições de reversibilidade demonstradas pelo grafo da RD-F, obtendo-se assim um novo sistema de equações (Equação 5.18) e a respetiva distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.19).

$$\begin{cases} \pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40} \\ \pi_1 = \pi_0 P_{01} + \pi_1 P_{11} + \pi_2 P_{21} + \pi_3 P_{31} + \pi_4 P_{41} \\ \pi_2 = \pi_0 P_{02} + \pi_1 P_{12} + \pi_2 P_{22} + \pi_3 P_{32} + \pi_4 P_{42} \\ \pi_3 = \pi_0 P_{03} + \pi_1 P_{13} + \pi_2 P_{23} + \pi_3 P_{33} + \pi_4 P_{43} \\ \pi_4 = \pi_0 P_{04} + \pi_1 P_{14} + \pi_2 P_{24} + \pi_3 P_{34} + \pi_4 P_{44} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \\ \pi_1 P_{14} = \pi_4 P_{41} \\ \pi_3 P_{34} = \pi_4 P_{43} \end{cases} \tag{5.18}$$

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{6}{23} & \frac{1}{23} & \frac{1}{23} & \frac{3}{23} & \frac{12}{23} \end{bmatrix} \tag{5.19}$$

No seguimento da determinação da nova distribuição de probabilidades estacionária, surge a necessidade de recalcular o tempo médio de recorrência esperado (Tabela 5.32) e, por fim, a reversibilidade desta rede dinâmica (Tabela 5.33), confirmando a informação presente no respetivo grafo.

Tabela 5.32 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-F – Versão Final

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	23/6
μ_{11}	23
μ_{22}	23
μ_{33}	23/3
μ_{44}	23/12

Tabela 5.33 – Reversibilidade da RD-F – Versão Final

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☑
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☒
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☑

5.1.4.7 RD-G

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.34.

Tabela 5.34 – Estados da RD-G

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_0 e S_3
	Desde S_2	S_1, S_3 e S_4
	Desde S_3	S_2, S_3 e S_4
	Desde S_4	S_1, S_2, S_3 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_3 e S_4
	Condição Simétrica	$S_0 \Leftrightarrow S_1$, $S_2 \Leftrightarrow S_3$ e $S_3 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		NA
Número de Classes		Uma

À semelhança do raciocínio efetuado para a RD-A, a RD-G é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica, sendo por isso possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.20), através da aplicação da Equação 5.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{4} & \frac{1}{8} & \frac{1}{8} & \frac{5}{24} & \frac{7}{24} \end{bmatrix} \tag{5.20}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.20, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.35.

Tabela 5.35 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-G – Versão Inicial

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	4
μ_{11}	8
μ_{22}	8
μ_{33}	24/5
μ_{44}	24/7

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.35, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.36.

Tabela 5.36 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-G

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	5/36
$S_0 \Rightarrow S_2$	0
$S_0 \Rightarrow S_3$	1/9
$S_0 \Rightarrow S_4$	0
$S_1 \Rightarrow S_0$	0
$S_1 \Rightarrow S_2$	4/15
$S_1 \Rightarrow S_3$	0
$S_1 \Rightarrow S_4$	4/15
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/9
$S_2 \Rightarrow S_1$	1/21
$S_2 \Rightarrow S_3$	17/63
$S_2 \Rightarrow S_4$	2/15
$S_3 \Rightarrow S_0$	0
$S_3 \Rightarrow S_1$	4/21
$S_3 \Rightarrow S_2$	24/175
$S_3 \Rightarrow S_4$	16/75
$S_4 \Rightarrow S_0$	1/21
$S_4 \Rightarrow S_1$	19/147
$S_4 \Rightarrow S_2$	34/245
$S_4 \Rightarrow S_3$	11/49

Por fim, a Tabela 5.37 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-G.

Tabela 5.37 – Reversibilidade da RD-G – Versão Inicial

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☑
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☒

Por outro lado, e relembrando a Figura 4.9, é possível afirmar que existe reversibilidade entre quatro pares de estados, sendo que essa informação não se encontra retratada na Tabela 5.37. Desta forma, é possível afirmar que a distribuição de probabilidades estacionária representada na Equação 5.20 caracteriza um sistema de equações possível e indeterminado, sendo necessário acrescentar à Equação 5.3, as quatro condições de reversibilidade demonstradas pelo grafo da RD-G, obtendo-se assim um novo sistema de equações (Equação 5.21) e a respetiva distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.22).

$$\begin{cases} \pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40} \\ \pi_1 = \pi_0 P_{01} + \pi_1 P_{11} + \pi_2 P_{21} + \pi_3 P_{31} + \pi_4 P_{41} \\ \pi_2 = \pi_0 P_{02} + \pi_1 P_{12} + \pi_2 P_{22} + \pi_3 P_{32} + \pi_4 P_{42} \\ \pi_3 = \pi_0 P_{03} + \pi_1 P_{13} + \pi_2 P_{23} + \pi_3 P_{33} + \pi_4 P_{43} \\ \pi_4 = \pi_0 P_{04} + \pi_1 P_{14} + \pi_2 P_{24} + \pi_3 P_{34} + \pi_4 P_{44} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \\ \pi_0 P_{01} = \pi_0 P_{01} \\ \pi_2 P_{24} = \pi_4 P_{42} \\ \pi_2 P_{23} = \pi_3 P_{32} \\ \pi_3 P_{34} = \pi_4 P_{43} \end{cases} \tag{5.21}$$

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{12}{43} & \frac{6}{43} & \frac{6}{43} & \frac{5}{43} & \frac{14}{43} \end{bmatrix} \tag{5.22}$$

No seguimento da determinação da nova distribuição de probabilidades estacionária, surge a necessidade de recalcular o tempo médio de recorrência esperado (Tabela 5.38) e, por fim, a reversibilidade desta rede dinâmica (Tabela 5.39), confirmando a informação presente no respetivo grafo.

Tabela 5.38 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-G – Versão Final

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	43/12
μ_{11}	43/6
μ_{22}	43/6
μ_{33}	43/5
μ_{44}	43/14

Tabela 5.39 – Reversibilidade da RD-G – Versão Final

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☑
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☑
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☑

5.1.4.8 RD-H

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.40.

Tabela 5.40 – Estados da RD-H

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_0, S_1 e S_2
	Desde S_2	S_1, S_2, S_3 e S_4
	Desde S_3	S_1
	Desde S_4	S_2 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_1, S_2 e S_4
	Condição Simétrica	$S_0 \Leftrightarrow S_1$, $S_1 \Leftrightarrow S_2$ e $S_2 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_2, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma

À semelhança do raciocínio efetuado para a RD-A, a RD-H é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica, sendo por isso possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.23), através da aplicação da Equação 6.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{1}{3} & \frac{1}{6} & \frac{1}{3} & \frac{1}{24} & \frac{1}{8} \end{bmatrix} \tag{5.23}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.23 para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.41.

Tabela 5.41 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-H – Versão Inicial

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	3
μ_{11}	6
μ_{22}	3
μ_{33}	24
μ_{44}	8

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.41, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.42.

Tabela 5.42 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-H

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	7/64
$S_0 \Rightarrow S_2$	1/16
$S_0 \Rightarrow S_3$	0
$S_0 \Rightarrow S_4$	0
$S_1 \Rightarrow S_0$	1/16
$S_1 \Rightarrow S_2$	1/8
$S_1 \Rightarrow S_3$	1/16
$S_1 \Rightarrow S_4$	1/16
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/32
$S_2 \Rightarrow S_1$	13/64
$S_2 \Rightarrow S_3$	5/64
$S_2 \Rightarrow S_4$	5/64
$S_3 \Rightarrow S_0$	1/4
$S_3 \Rightarrow S_1$	0
$S_3 \Rightarrow S_2$	1/2
$S_3 \Rightarrow S_4$	0
$S_4 \Rightarrow S_0$	0
$S_4 \Rightarrow S_1$	1/24
$S_4 \Rightarrow S_2$	2/9
$S_4 \Rightarrow S_3$	1/24

Por fim, a Tabela 5.43 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-H.

Tabela 5.43 – Reversibilidade da RD-H – Versão Inicial

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☑
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☒

Por outro lado, e relembrando a Figura 4.10, é possível afirmar que existe reversibilidade entre três pares de estados, sendo que essa informação não se encontra retratada na Tabela 5.43. Desta forma, é possível afirmar que a distribuição de probabilidades estacionária representada na Equação 5.23 caracteriza um sistema de equações possível e indeterminado, sendo necessário acrescentar à Equação 5.3, as três condições de reversibilidade demonstradas pelo grafo da RD-H, obtendo-se assim um novo sistema de equações (Equação 5.24) e a respetiva distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.25).

$$\begin{cases} \pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_1 P_{10} + \pi_2 P_{20} + \pi_3 P_{30} + \pi_4 P_{40} \\ \pi_1 = \pi_0 P_{01} + \pi_1 P_{11} + \pi_2 P_{21} + \pi_3 P_{31} + \pi_4 P_{41} \\ \pi_2 = \pi_0 P_{02} + \pi_1 P_{12} + \pi_2 P_{22} + \pi_3 P_{32} + \pi_4 P_{42} \\ \pi_3 = \pi_0 P_{03} + \pi_1 P_{13} + \pi_2 P_{23} + \pi_3 P_{33} + \pi_4 P_{43} \\ \pi_4 = \pi_0 P_{04} + \pi_1 P_{14} + \pi_2 P_{24} + \pi_3 P_{34} + \pi_4 P_{44} \\ \pi_0 + \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 = 1 \\ \pi_0 P_{01} = \pi_0 P_{01} \\ \pi_1 P_{12} = \pi_2 P_{21} \\ \pi_2 P_{24} = \pi_4 P_{42} \end{cases} \tag{5.24}$$

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{2}{9} & \frac{1}{9} & \frac{4}{9} & \frac{1}{18} & \frac{1}{6} \end{bmatrix} \tag{5.25}$$

No seguimento da determinação da nova distribuição de probabilidades estacionária, surge a necessidade de recalcular o tempo médio de recorrência esperado (Tabela 5.44) e, por fim, a reversibilidade desta rede dinâmica (Tabela 5.45), confirmando a informação presente no respetivo grafo.

Tabela 5.44 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-H – Versão Final

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	9/2
μ_{11}	9
μ_{22}	9/4
μ_{33}	18
μ_{44}	6

Tabela 5.45 – Reversibilidade da RD-H – Versão Final

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☑
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☑
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_1 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☒
$S_2 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_2$	☑
$S_3 \Rightarrow S_4$ *VS* $S_4 \Rightarrow S_3$	☒

5.1.4.9 RD-I

A análise dos estados e das respetivas especificidades encontram-se apresentadas, de forma resumida, na Tabela 5.46.

Tabela 5.46 – Estados da RD-I

Classificação dos Estados		Identificação dos Estados
Alcançável	Desde S_0	S_0 e S_1
	Desde S_1	S_0, S_1 e S_3
	Desde S_2	N/A
	Desde S_3	S_1, S_3 e S_4
	Desde S_4	S_3 e S_4
Comunicável	Condição Reflexiva	S_0, S_1, S_3 e S_4
	Condição Simétrica	$S_0 \Leftrightarrow S_1$, $S_1 \Leftrightarrow S_3$ e $S_3 \Leftrightarrow S_4$
Recorrente		S_0, S_1, S_3 e S_4
Transiente		N/A
Absorvente		N/A
Número de Classes		Uma, ignorando a existência do S_2

No caso particular da RD-I, é possível verificar que o estado S_3 para além de não ser essencial, torna-se inútil tendo em conta os intervalos de ocupação da TMA de Lisboa definidos para cada estado que compõe a presente rede dinâmica. Por esse motivo, sugere-se a readequação da RD-I, unindo em um único estado o estado S_3 e o estado S_2, sendo que a nova RD-I será constituída por quatro estados em vez de cinco estados como foi inicialmente delineada.

Desta forma, é possível afirmar que a RD-I é também ela denominada por cadeia ergódica, sendo irredutível e aperiódica e, como tal, é possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária (Equação 5.26), através da aplicação da Equação 5.3.

$$\pi = \begin{bmatrix} \frac{7}{24} & \frac{1}{6} & \frac{11}{24} & \frac{1}{12} \end{bmatrix} \tag{5.26}$$

Observando os resultados obtidos através da Equação 5.26, para além de ter sido possível determinar os valores para os quais cada estado da rede dinâmica converge, é possível ainda classificá-la como homogénea e regular.

Os resultados obtidos para o cálculo do tempo médio de recorrência esperado (Equação 4.18), encontram-se apresentados na Tabela 5.47.

Tabela 5.47 – Tempo Médio de Recorrência Esperado da RD-I

Identificação da Transição entre o Mesmo Estado	Tempo Médio de Recorrência Esperado
μ_{00}	24/7
μ_{11}	6
μ_{22}	24/11
μ_{33}	12

Tendo em conta os valores apresentados na Tabela 5.47, estão reunidas as condições para afirmar que todos os estados da rede dinâmica em análise são classificados como recorrentes positivos.

Os resultados para cálculo do tempo médio de transição entre dois estados da rede dinâmica em análise (Equação 5.5), encontram-se apresentados na Tabela 5.48.

Tabela 5.48 – Tempo Médio de Transição entre Dois Estados na RD-I

Identificação da Transição entre Dois Estados	Tempo Médio de Transição
$S_0 \Rightarrow S_1$	6/49
$S_0 \Rightarrow S_2$	1/28
$S_0 \Rightarrow S_3$	0
$S_1 \Rightarrow S_0$	1/8
$S_1 \Rightarrow S_2$	1/8
$S_1 \Rightarrow S_3$	1/44
$S_2 \Rightarrow S_0$	1/44
$S_2 \Rightarrow S_1$	9/121
$S_2 \Rightarrow S_3$	47/242
$S_3 \Rightarrow S_0$	0
$S_3 \Rightarrow S_1$	1/22
$S_3 \Rightarrow S_2$	1/4

Por fim, a Tabela 5.49 contém os resultados da análise da reversibilidade da RD-I.

Tabela 5.49 – Reversibilidade da RD-I

Identificação dos Pares de Estados	Validação da Reversibilidade entre os Pares de Estados
$S_0 \Rightarrow S_1$ *VS* $S_1 \Rightarrow S_0$	☑
$S_0 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_0$	☒
$S_0 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_0$	☒
$S_1 \Rightarrow S_2$ *VS* $S_2 \Rightarrow S_1$	☑
$S_1 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_1$	☒
$S_2 \Rightarrow S_3$ *VS* $S_3 \Rightarrow S_2$	☑

5.2 Discussão de Resultados

Após a realização dos quatro primeiros passos apresentados no subcapítulo 4.5, é necessário responder ao quinto passo, designadamente, a realização da previsão do comportamento da rede dinâmica e, dessa forma, será possível efetuar a sua validação [240].

A capacidade de previsão de cada rede dinâmica poderá ser percecionada através da probabilidade inicial e da probabilidade de transição de estados, sendo que a próxima probabilidade poderá ser obtida através do produto entre estas duas probabilidades. Tendo em conta que no subcapítulo 5.1.4 foi apresentada uma estimativa de previsão do comportamento para cada uma das nove redes dinâmicas, pretende-se com o presente subcapítulo elaborar uma análise crítica do conjunto de dados e informações reunidos(as) para cada uma dessas redes dinâmicas, com o intuito de extrair conclusões úteis para o setor do transporte aéreo e, mais concretamente, para a gestão do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa. Após esta análise detalhada será explorada a possibilidade do acréscimo de novas variáveis à rede dinâmica criada cujos resultados demonstraram ser os mais interessantes e pertinentes de acordo com os objetivos pré-estabelecidos para o presente trabalho de investigação.

5.2.1 Resultados Transversais às Redes Dinâmicas

De forma a condensar os dados vastamente analisados e interpretados no subcapítulo 5.1.4, no presente subcapítulo serão destacados os parâmetros cujo impacto é facilmente percecionado no contexto da gestão do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa, detetando padrões, lacunas e/ou possibilidades de desenvolvimento futuro.

5.2.1.1 Caracterização da Rede Dinâmica

Após a construção e a respetiva análise das nove redes dinâmicas, verificou-se que duas delas não se enquadravam, à partida, nos conceitos teóricos apresentados para as Cadeias de Markov e, por esse motivo, a análise efetuada encontrava-se limitada às suas características intrínsecas. Por esse motivo, a estrutura de ambas foi reestruturada, através da alteração do número de estados, permitindo a respetiva análise similar à que foi realizada para as restantes sete redes dinâmicas. Após esta readaptação, concluiu-se que todas as redes dinâmicas são irredutíveis, periódicas, recorrentes e, consequentemente, ergódicas tendo em conta as características amplamente apresentadas no subcapítulo 5.1.4.

Adicionalmente, através da observação da Matriz de Probabilidade de Transição de cada rede dinâmica, conclui-se que todas elas respeitam uma das principais características da Teoria das Cadeias de Markov, nomeadamente, o facto de serem matrizes estocásticas, não sendo nenhuma delas duplamente estocástica [243].

5.2.1.2 Distribuição de Probabilidades Estacionária

Apesar de ter sido possível calcular a distribuição de probabilidades estacionária para todas as redes dinâmicas criadas, acentua-se a necessidade de referir que o comportamento destas poderá variar ao longo do tempo, enfatizando a preocupação na análise e no acompanhamento adequada(o). Tal como foi demonstrado através de um conjunto de gráficos no subcapítulo 1.1, sabendo que a variação de aeronaves em operação varia de acordo com um vasto número de fatores e, complementarmente, a variação ocorre de forma cíclica, a análise da distribuição de probabilidades estacionária poderá não ser capaz de representar de forma genuína a previsão do comportamento do fluxo de tráfego aéreo a um médio ou longo prazo para a TMA de Lisboa.

Recordando as distribuições de probabilidades estacionárias das nove redes dinâmicas é possível afirmar que, tendencialmente, o comportamento do fluxo de tráfego aéreo é representado de forma mais adequada através da RD-B.

Apesar dos valores serem semelhantes entre a grande maioria das redes dinâmicas, é necessário destacar que a RD-B representa uma das redes dinâmicas com uma maior quantidade de dados, retratando o período de tempo mais importante, nomeadamente, o de elevada procura e, consequentemente, o mais incerto do comportamento do fluxo de tráfego aéreo.

Realçam-se, porém, os valores ligeiramente distintos entre a RD-A e a RD-B, mais concretamente em relação a dois estados, nomeadamente, o estado S_2 e o estado S_4, sendo aquelas que retratam os maiores períodos de tempo representativos do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, mas, no caso dos objetivos do presente trabalho de investigação, a RD-B é aquela que melhor se adequa, pois contempla única e exclusivamente o período de tempo de maior procura no setor do transporte aéreo. Contrariamente, apesar da RD-A representar a rede dinâmica com a maior quantidade de dados, a mesma engloba tanto os períodos de tempo de maior procura quanto os de menor procura, não sendo o foco do presente trabalho de investigação, alterando, mesmo que de forma pouco significativa, as conclusões das análises efetuadas.

Por outro lado, analisando este parâmetro é possível antever o comportamento futuro do fluxo de tráfego aéreo, com base no conjunto de dados recolhidos para a construção de cada rede dinâmica. Selecionando novamente a RD-B, é possível prever que a um médio ou longo prazo a saturação da TMA de Lisboa será significativamente observada, visto que a probabilidade da rede dinâmica se encontrar no estado S_3 e no estado S_4 é de aproximadamente 58%. Esta conclusão obtém-se, de forma semelhante, após a análise de outras quatro redes dinâmicas, acentuando a iminência da ocorrência de inúmeras situações de congestionamento que poderão originar não só o caos na gestão do fluxo de tráfego aéreo como também, em situações limite e/ou em momentos de emergência que poderão afetar direta e negativamente a segurança das operações de tráfego aéreo [243, 270, 271].

Complementarmente, e tendo em conta o forte interesse na capacidade de previsibilidade das redes dinâmicas construídas neste trabalho de investigação, salienta-se que, através de uma análise detalhada da RD-B, consoante o estado em que a mesma se encontra e de acordo com a hora do dia em que esta rede dinâmica é observada, é possível prever a transição que ocorrerá. Esta estimativa pode ser efetuada conhecendo não só a taxa de ocupação analisada no subcapítulo 5.1.3.2 como também reconhecendo a relevância da distribuição de probabilidades estacionária e o respetivo grafo. Por este motivo, é expectável que, quando a taxa de ocupação da TMA de Lisboa se encontra significativamente elevada, exista uma considerável probabilidade de se manter ou de agravar a situação de congestionamento.

Para além da utilidade expressa anteriormente, a previsibilidade do comportamento da TMA de Lisboa será também extremamente benéfica para potencializar a otimização da gestão do fluxo de tráfego aéreo, reconhecendo todas as variáveis que influenciam a sua variação e adaptando as medidas adequadas para este processo.

5.2.1.3 Estados

A incerteza do fluxo de tráfego aéreo, apesar dos planeamentos e das TMIs definidos(as) e executados(as) pelos(as) agentes, poderá ser uma variável que fomentará o caos e a preocupação nas variadas tarefas englobadas em todo este processo caso a rede dinâmica que representa o fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa atinja o estado S_3 e o estado S_4, sem a capacidade de transitar para outros estados cuja taxa de ocupação seja inferior, tornando-se invariavelmente em estados absorventes que propiciam uma situação de congestionamento preocupante.

Relativamente aos intervalos definidos para a taxa de ocupação da TMA de Lisboa que despoletou a seleção dos diferentes estados criados, este processo é, na realidade, mais complexo, pois influencia todo o desenvolvimento e comportamento de cada rede dinâmica. Por este motivo, seria interessante simular, para uma rede dinâmica mais abrangente, por exemplo, a RD-B, e para uma rede dinâmica mais congestionada, por exemplo, a RD-F, a definição de intervalos distintos para analisar o impacto desta alteração.

Adicionalmente à alteração dos intervalos da taxa de ocupação, seria também estimulante alterar o número de estados das redes dinâmicas, verificando se as características intrínsecas das mesmas se manteriam ou se o estudo do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa tornar-se-ia inviável devido à falta de utilidade das conclusões obtidas.

5.2.1.4 Tempo Médio de Recorrência Esperado

Recordando que o tempo médio de recorrência esperado representa, em média, o tempo necessário para que cada estado de uma determinada rede dinâmica volte a ser observado, é importante analisar o comportamento verificado nas diferentes redes dinâmicas, com o intuito de apurar se existe um padrão que permita obter conclusões verídicas e que possam ser validadas devido à sua frequência em diferentes períodos.

No caso da RD-B, o estado S_4 é observado com uma maior regularidade, quando comparado com os demais, reforçando o elevado nível de congestionamento da TMA de Lisboa. Transversalmente às demais redes dinâmicas, a conclusão obtida para a RD-B é semelhante para outras quatro redes dinâmicas, demonstrando que apesar dessas cinco redes dinâmicas possuírem cinco estados de taxa de ocupação, tendencialmente o comportamento do fluxo de tráfego aéreo centra-se no estado que representa uma maior taxa de ocupação da TMA de Lisboa. Esta conclusão para além de comprovar a relevância dos objetivos a que se propõe o presente trabalho de investigação, demonstra a existência de saturação da TMA de Lisboa na grande maioria do tempo, visto que cada rede dinâmica representa um diferente período [243, 270, 271].

Em contrapartida, no caso da RD-B, o estado S_2 é observado com uma menor regularidade, quando comparado com os demais, corroborando a dificuldade da gestão de forma equilibrada entre a procura e a oferta na TMA de Lisboa, visto que, a taxa de ocupação do estado S_2 representa uma medida facilmente gerida e suportada pelos recursos existentes, mas, tal como é possível verificar, a ocupação da TMA de Lisboa varia rapidamente entre os valores limite, dificultando essa gestão e exigindo um maior esforço por parte dos(as) agentes. Transversalmente às demais redes dinâmicas, a conclusão obtida para a RD-B é semelhante para outras três redes dinâmicas, visto que os períodos temporais delineados para a criação de cada uma delas potencia variações maiores ou menores consoante os eventos verificados ao longo da sua duração [243, 270, 271].

5.2.1.5 Tempo Médio de Transição entre Dois Estados

O parâmetro em análise retrata, em média, o tempo necessário de transição entre cada par de estados que compõem cada uma das redes dinâmicas, sendo dessa forma possível verificar a rapidez com que a saturação da TMA de Lisboa é verificada e, por outro lado, se o aumento da taxa de ocupação da mesma ocorre de forma progressiva ou instantânea.

Observando o comportamento da RD-B, verifica-se que, tendencialmente, a rede dinâmica transitará muito rapidamente do estado S_0 para o estado S_3 ou para o estado S_4, revelando o carácter preocupante de um vertiginoso aumento da taxa de ocupação da TMA de Lisboa. Transversalmente às demais redes dinâmicas, e salvo as devidas diferenças verificadas nas análises efetuadas individualmente, a conclusão obtida para a RD-B é semelhante para outras cinco redes dinâmicas, salientando ainda que as transições mais rápidas ocorrem, na grande maioria das vezes, no sentido do aumento da taxa de ocupação da TMA de Lisboa [243, 270, 271].

Em contrapartida, os maiores tempos médios de transição entre pares de estados ocorrem, como seria expectável, no sentido da diminuição da taxa de ocupação da TMA de Lisboa, demonstrando que quando a mesma se encontra sobrelotada evidencia uma elevada dificuldade em gerir rapidamente o elevado número de aeronaves em operação, propiciando a manutenção, em termos temporais, desta situação prejudicial e esta conclusão pode ser justificada devido ao facto da TMA de Lisboa se encontrar congestionada durante aproximadamente metade do dia e de forma ininterrupta ao longo desse período [243, 270, 271].

5.2.1.6 Reversibilidade

A reversibilidade foi um parâmetro de merecido destaque que foi evidenciado ao longo da análise individual de cada uma das redes dinâmicas criadas, visto que a sua existência auxilia na transição mais progressiva do comportamento do fluxo de tráfego aéreo através dos estados que compõem cada rede dinâmica.

Em média, foi possível verificar a reversibilidade entre três pares de estados para cada rede dinâmica, e recorrendo ao caso da RD-B, a reversibilidade foi verificada no par [S_0, S_1], no par [S_1, S_4] e, por fim, no par [S_3, S_4]. De entre estes três pares de estados, destaca-se o par [S_1, S_4] e o par [S_3, S_4], sendo que o primeiro demonstra a rapidez com que a TMA de Lisboa atinge a saturação e, no instante seguinte, atinge o limite oposto e, por outro lado, o segundo demonstra que a taxa de ocupação apesar de diminuir não sofrerá uma redução drástica, mantendo-se em valores significativamente preocupantes para os(as) agentes. Transversalmente às demais redes dinâmicas, e salvo as devidas diferenças verificadas nas análises efetuadas individualmente, a conclusão obtida para a RD-B é semelhante para outras quatro redes dinâmicas, frisando que apesar de todas elas representarem diferentes períodos de tempo ao longo do ano, em todas elas é possível verificar a rápida saturação da TMA de Lisboa e, consequentemente, a manutenção dessa saturação durante um longo período de tempo [243, 270, 271].

5.2.1.7 Movimento da Rede Dinâmica

Apesar da variedade de redes dinâmicas criadas neste trabalho de investigação, conclui-se que, apesar dos diferentes períodos de tempo selecionados, o movimento da rede dinâmica ao longo de um dia comum de operação respeita um determinado padrão, encontrando-se o mesmo apresentado na Tabela 5.50. De forma a agilizar a interpretação da informação apresentada, foi aplicado um código de cores que tem apenas em consideração a taxa de ocupação em cada intervalo de uma hora, nomeadamente, **S_0** (Verde), **S_1** (Azul), **S_2** (Amarela), **S_3** (Cinzenta) e **S_4** (Laranja). Tendo em conta que a quantidade de estados da RD-C e da RD-I sofreu uma reestruturação através da respetiva diminuição, as mesmas não se encontram refletidas na Tabela 5.50.

Tabela 5.50 – Tendência de Comportamento da Rede Dinâmica

Período Horário		Taxa de Ocupação de Cada Rede Dinâmica (%)						
Inicial	Final	RD-A	RD-B	RD-D	RD-E	RD-F	RD-G	RD-H
00:00:00	00:59:59	6%	7%	9%	7%	8%	8%	3%
01:00:00	01:59:59	2%	3%	4%	5%	2%	3%	1%
02:00:00	02:59:59	2%	2%	2%	2%	3%	2%	1%
03:00:00	03:59:59	4%	6%	6%	6%	6%	7%	2%
04:00:00	04:59:59	14%	21%	21%	19%	21%	22%	3%
05:00:00	05:59:59	55%	74%	79%	78%	77%	67%	30%
06:00:00	06:59:59	83%	98%	**103%**	100%	99%	91%	71%
07:00:00	07:59:59	89%	96%	98%	94%	94%	89%	85%
08:00:00	08:59:59	89%	92%	91%	89%	98%	92%	97%

Período Horário		Taxa de Ocupação de Cada Rede Dinâmica (%)						
Inicial	Final	RD-A	RD-B	RD-D	RD-E	RD-F	RD-G	RD-H
09:00:00	09:59:59	100%	**107%**	**108%**	**112%**	**110%**	**106%**	96%
10:00:00	10:59:59	97%	**101%**	100%	**101%**	**103%**	**104%**	100%
11:00:00	11:59:59	86%	92%	97%	95%	92%	91%	85%
12:00:00	12:59:59	84%	93%	**101%**	91%	91%	91%	76%
13:00:00	13:59:59	93%	**101%**	**105%**	**103%**	100%	95%	89%
14:00:00	14:59:59	88%	94%	95%	92%	95%	95%	81%
15:00:00	15:59:59	90%	97%	**103%**	98%	99%	97%	84%
16:00:00	16:59:59	88%	90%	94%	92%	92%	85%	85%
17:00:00	17:59:59	90%	**103%**	**108%**	**106%**	**104%**	100%	84%
18:00:00	18:59:59	92%	98%	**104%**	99%	97%	95%	85%
19:00:00	19:59:59	79%	74%	76%	78%	79%	73%	93%
20:00:00	20:59:59	84%	92%	90%	96%	97%	94%	74%
21:00:00	21:59:59	76%	88%	85%	89%	95%	85%	68%
22:00:00	22:59:59	67%	77%	78%	82%	80%	78%	52%
23:00:00	23:59:59	29%	23%	24%	26%	27%	28%	34%

Através da observação da Tabela 5.50 verifica-se que, em média, existem dois períodos de tempo cuja taxa de ocupação é relativamente reduzida, isto é, não ultrapassa os 59%. Estes intervalos verificam-se no final da noite e durante a madrugada, sendo justificado pelo valor reduzido de aeronaves, de procura por parte das companhias de transporte aéreo, de interesse por parte dos(as) passageiros e até mesmo devido às restrições impostas ao Aeroporto de Lisboa devido ao ruído imputado às operações das aeronaves.

Contrariamente a esta análise, verifica-se que, em média, as horas de pico de movimento de aeronaves situam-se entre as 06h00 e as 18h59, sendo a taxa de ocupação superior a 95% e ocupando uma parte significativa do dia. Este período de tempo é justificado pelo início das operações de forma massiva, após a quantidade reduzida verificada no horário noturno, assim como devido ao agendamento de voos regionais e internacionais que ocorrerão em simultâneo.

Adicionalmente, verifica-se, em média, três períodos de tempo específicos em que a taxa de ocupação supera os 100%, encontrando-se, assinalados a vermelho, entre as 09h00 e as 10h59, entre as 12h00 e as 13h59, e entre as 17h00 e as 18h59, representando os voos internacionais de longo curso e a ocorrência de várias escalas no Aeroporto de Lisboa, sendo que carecem de uma maior atenção para evitar a ocorrência de atrasos. Caso estes se verifiquem, poderão ter impacto negativo e até mesmo preocupante nas horas seguintes.

Como seria expectável, esta procura elevada verificar-se-á ao longo da grande maioria do dia, com tendência para reduzir à medida que o pôr-do-sol se aproxima. Salienta-se que, genericamente, existem dois tipos de perfis de passageiros(as), nomeadamente, aqueles(as) que viajam a negócios e os(as) que viajam a lazer. De acordo com o intuito das suas viagens, é admissível afirmar que os(as) primeiros(as) preferem efetuar as suas deslocações no início ou no final do dia de forma a cumprirem os seus compromissos em horário laboral e regressarem, se possível, às suas residências.

No caso dos(as) segundos(as), apesar de possuírem uma maior flexibilidade na seleção do horário das suas viagens, este fator encontra-se intimamente dependente da duração do voo, do número de escalas e das tarifas em vigor, sendo que estes parâmetros variam ao longo do dia.

Relativamente ao sentido de variação do movimento da rede dinâmica, no caso particular da RD-B, apesar de se concluir que a TMA de Lisboa funciona de forma sobrelotada, na grande maioria dos períodos temporais, é importante ressalvar que uma das principais problemáticas se deve ao facto da variação do movimento da rede dinâmica não ocorrer de forma expectável, isto é, o aumento do fluxo de tráfego aéreo não ocorre de forma progressiva desde o estado S_0 até ao estado S_4 e, quando se situa no estado S_3 ou no estado S_4 não tem tendência a reduzir até ao estado S_0. Por outras palavras, verifica-se um aumento drástico no período de tempo que separa a madrugada do início das operações de tráfego aéreo, requerendo dessa forma um esforço considerável e repentino por parte dos(as) agentes no início das suas funções e de forma constante durante grande parte do dia, ocorrendo poucas oscilações significativas que permitam uma redução destes esforços.

5.2.1.8 Ação dos(as) Agentes

No seguimento das análises efetuadas ao longo do subcapítulo 5.2.1 confirma-se a necessidade da elaboração, da instrução e do esclarecimento de uma equipa multifacetada e coordenada de agentes que consigam, em cada momento, tomar as decisões apropriadas de acordo com as circunstâncias verificadas. Tal como se verificou, existem horas do dia que exigem uma taxa de esforço e empenho bastante superior, quando comparadas com as demais, sendo este facto ainda mais expressivo quando o período de tempo mais exaustivo representa aproximadamente metade do dia de funcionamento do Aeroporto de Lisboa.

Uma das principais medidas deverá ser refletida na uniformização da taxa de ocupação ao longo do dia visto que, para além do facto do Aeroporto de Lisboa se encontrar em funcionamento de forma ininterrupta, as companhias de transporte aéreo deveriam ter em consideração, na sua estratégia de crescimento, o nivelamento da sua oferta, conciliando os recursos existentes nas infraestruturas aeroportuárias e as necessidades dos(as) clientes. Neste sentido, o número de voos diários poderia manter-se e representar, simultaneamente, uma diminuição de constrangimentos registados e, consequentemente, uma diminuição da probabilidade de ocorrência de atrasos. Em contrapartida, homogeneizando a taxa de ocupação entre as 06h00 e as 22h59 permitirá, no limite, uma otimização da utilização dos recursos existentes, albergando uma maior quantidade de aeronaves diariamente.

Apesar de importante, a sugestão citada anteriormente torna-se pouco viável visto que poderá ter um impacto direto na gestão das companhias de transporte aéreo relativamente às estratégias de crescimento, de promoção e de combate à concorrência existente.

Por este motivo, o desenvolvimento tecnológico deverá conseguir auxiliar os(as) agentes na gestão do fluxo de tráfego aéreo, otimizando os planeamentos dos voos, nomeadamente, no que diz respeito aos horários de descolagem e de aterragem, à garantia da separação das aeronaves e à utilização eficaz dos recursos existentes.

Adicionalmente, a sugestão em causa poderia revelar-se pouco atrativa para os(as) clientes deste meio de transporte, impulsionando-os(as) a que o preterissem em função de outros, de acordo com a oferta existente e coincidente com as suas necessidades.

5.2.2 Seleção de Variáveis

O nível de benefícios e vantagens promovidos(as) pelas variáveis que compõem cada rede dinâmica poderá ser determinado de acordo com as contribuições da mesma na definição eficiente de alguns parâmetros fundamentais para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo, como por exemplo, a previsão da capacidade da TMA, a previsão da ocorrência de atrasos e o respetivo impacto em termos temporais e, até mesmo, a previsão do consumo de combustível, tendo em conta os tempos de espera que poderão ser imputados às aeronaves.

Por outro lado, a seleção dessas variáveis também deverá ter em conta o impacto da sua integração no que diz respeito ao processo da modelação visto que, caso a sua inclusão dificulte demasiado a construção da rede dinâmica, a sua análise, seleção e/ou combinação de diferentes variáveis deverá ser ponderada e, se possível, substituída por outras variáveis igualmente interessantes.

No caso concreto das redes dinâmicas criadas neste trabalho de investigação, salienta-se que algumas das variáveis citadas na Tabela 2.6 se encontram intrinsecamente contempladas, visto que, na sua grande maioria, o processo de quantificação torna-se demasiado complexo, impossibilitando a análise rápida do impacto individual de cada uma delas. Salienta-se, porém, que em trabalhos de investigação futuros seria interessante quantificar o impacto de algumas dessas variáveis, de forma individual e/ou interligada, tendo em conta que as mesmas se relacionam com diferentes problemáticas cujo interesse é manifestado por vários(as) autores(as), nomeadamente, as características intrínsecas a cada TMA, à operação das aeronaves e até mesmo as características transversais a diferentes países.

5.3 Discussão

As nove redes dinâmicas criadas no Capítulo 4 foram alvo de uma minuciosa análise ao longo do subcapítulo 5.1.4 e, tendo em conta os resultados obtidos, conclui-se que a RD-B é a que melhor descreve o comportamento do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa, devido à extensão dos dados contemplados e, principalmente, o período de tempo de elevada procura que representa.

Realça-se, porém, que duas redes dinâmicas criadas inicialmente foram alvo de adaptações, após a análise inicial, permitindo a sua análise posterior e a obtenção de resultados coerentes e à semelhança do tratamento efetuado às demais redes dinâmicas.

A validade e relevância dos resultados obtidos são fundamentadas de acordo com as características intrínsecas da Teoria das Cadeias de Markov, nomeadamente, a sua flexibilidade e, por outro lado, pelo facto de não serem necessários demasiados estados para descreverem corretamente o comportamento do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa. Estas duas características foram percecionadas devido à facilidade de interpretação e utilização dos dados, independentemente da sua extensão e, em segundo lugar, na capacidade e simplicidade do reajuste efetuado em duas das redes dinâmicas criadas através da redução do número de estados, produzindo igualmente conclusões reveladoras e importantes.

A análise crítica desenvolvida para cada rede dinâmica centrou-se nos mesmos parâmetros, facilitando a comparação entre os resultados obtidos, salientado a determinação da distribuição de probabilidades estacionária, o cálculo do tempo médio de recorrência esperado, o cálculo do tempo médio de transição entre cada par de estados que compõem as redes dinâmicas e a reversibilidade verificada em cada rede dinâmica.

Através da análise em concreto da distribuição de probabilidades estacionária foi possível prever a tendência de comportamento de cada rede dinâmica a um médio e/ou longo prazo, obtendo uma probabilidade bastante elevada e significativa da RD-B permanecer no estado S_3 e no estado S_4 durante aproximadamente mais de metade do dia de operação do Aeroporto de Lisboa, recordando que esta infraestrutura aeroportuária funciona de forma ininterrupta. Concluiu-se, portanto, que os resultados das análises demonstram o estado de saturação em que a TMA de Lisboa já se encontra e que é notório durante a maior parte do dia de operação do Aeroporto de Lisboa. Por esse motivo, salienta-se a necessidade de uma gestão adequada e ajustada das operações, salvaguardando a sua segurança e minimizando os impactos que as situações de congestionamento poderão originar às demais aeronaves.

Desta forma é possível afirmar que, após a construção do grafo de uma determinada rede dinâmica, a análise da variação da taxa de ocupação da mesma e a determinação da sua distribuição de probabilidades estacionária, é possível, para qualquer TMA, a partir de qualquer estado e do horário em análise, prever a transição que ocorrerá e, dessa forma, antecipar a tomada de decisões adequadas a cada situação. Esta informação é de extrema relevância para a análise e o estudo da otimização do fluxo de tráfego aéreo.

Aliado a estes resultados, e recordando o caso particular da décima rede dinâmica criada no subcapítulo 5.1.2, é inegável que a análise detalhada de uma determinada variável poderá ter repercussões essenciais para as conclusões do estudo do comportamento do fluxo de tráfego aéreo.

No exemplo delineado, verificou-se uma taxa de ocupação alarmante no período de tempo em que foram registados eventos meteorológicos significativamente graves e prejudiciais para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Folha em branco

Capítulo 6

Conclusões, Discussões e Trabalhos Futuros

Recordando o normal funcionamento da TMA de Lisboa, é possível reconhecer que a sua capacidade nem sempre é suficiente para albergar a procura existente e, nesses momentos, é constatada uma das principais consequências da limitação deste recurso, nomeadamente, o congestionamento. Este congestionamento, apesar de inevitável em inúmeros momentos é bastante frequente e, por esse motivo, torna-se bastante relevante a implementação de uma metodologia eficaz que permita prever estas situações e auxiliar na tomada de decisão dos(as) agentes. Como tal, e após um vasto trabalho de investigação é necessário condensar e apresentar as principais conclusões obtidas ao longo de todo o processo desenvolvido, evidenciando alguns aspetos que requerem uma análise posterior e que foram detetados durante as diferentes fases e, por outro lado, listando algumas recomendações que poderão colmatar esses aspetos e/ou potenciar os resultados obtidos no presente trabalho de investigação.

6.1 Análise do Cumprimento dos Objetivos

De forma a verificar a ocorrência da correspondência e do cumprimento dos objetivos pré-estabelecidos para o presente trabalho de investigação, é necessário recordá-los para que as respostas apresentadas possam ser mais facilmente interpretadas, nomeadamente:

- ***Em que objetivos e princípios se baseia a criação e a implementação de medidas para a ATFM?*** Qualquer medida, seja ela delineada originalmente ou adaptada posteriormente, deverá ter em conta o contexto em que será aplicada, pois cada TMA possui características intrínsecas, assim como os parâmetros que pretende gerir, por exemplo, a relação entre a procura e a oferta, a separação entre as aeronaves nas diversas fases de voo, as rotas de aeronaves, os níveis de voo nas diversas fases de voo e a componente temporal das operações das aeronaves;
- ***Quais são as vantagens e/ou os benefícios da implementação das medidas para a ATFM?*** Tendo em conta as TMIs existentes, cada uma delas poderá promover um conjunto distinto de vantagens e/ou benefícios quando comparadas(os) com as demais. Este facto é devido às limitações de cada TMI, assim como às aplicações práticas já implementadas por outros(as) autores(as). Independentemente da medida selecionada, pretende-se obter resultados claros quanto à sua validade e à melhoria da gestão do fluxo de tráfego aéreo, permitindo dessa forma acompanhar a sua utilização e, sempre que necessário, implementar novas TMIs e/ou reajustar as utilizadas;

- ***Quais são as responsabilidades individuais de cada agente para o sucesso das medidas do ATFM?*** Devido à complexidade do comportamento do fluxo de tráfego aéreo, é expectável que o número de agentes aumente à medida que o setor do transporte aéreo cresce e, nesse sentido, é importante consciencializá-los(as) para que o foco do seu trabalho seja os objetivos comuns. O empenho de cada um(a) deles(as) é o fator chave do seu profissionalismo, promovendo a comunicação e a partilha de informações, de forma recorrente e transparente entre todos(as);
- ***Como se determina a capacidade das infraestruturas aeroportuárias e do espaço aéreo?*** A capacidade das TMAs é um parâmetro de difícil quantificação, sendo por norma atribuído um limite máximo por parte de uma das entidades envolvidas na sua gestão. No caso da TMA de Lisboa esse limite é estabelecido, de forma periódica, pela ANA Aeroportos, servindo como referência para delimitar o número de aeronaves em simultâneo em diferentes faixas horárias. Apesar da existência destas métricas, verificou-se que em diferentes ocasiões esse valor era ultrapassado e, mesmo assim, a segurança das operações não foi ameaçada, corroborando que a capacidade de uma TMA não é apenas uma quantidade, mas uma representação da flexibilidade e agilização para lidar com a procura existente.

Complementarmente, um dos principais objetivos da modelação efetuada através da criação das redes dinâmicas centrou-se na obtenção de uma estimativa preditiva da capacidade da TMA de Lisboa, o que permitiu concluir que tendencialmente a taxa de ocupação manter-se-á nos níveis mais elevados, requerendo um esforço adicional por parte dos(as) agentes.

6.2 Metodologia Utilizada

Tendo como pretensão a realização de uma modelação do fluxo de tráfego aéreo, a mesma foi efetuada através da aplicação da Teoria das Cadeias de Markov, sendo que a metodologia em causa permitiu a criação de um algoritmo cujo principal objetivo incidiu na otimização e gestão, o mais equilibrada possível, entre a capacidade da TMA de Lisboa e a procura de aeronaves em cada período de tempo contemplado por cada rede dinâmica criada no presente trabalho de investigação. A seleção desta metodologia foi efetuada com o intuito de, em primeiro lugar, permitir a análise de um conjunto de redes dinâmicas e, em segundo lugar, permitir a obtenção de respostas e sugestões que permitam o desenvolvimento das seguintes metas fulcrais, nomeadamente:

- ***Assegurar a equidade e o equilíbrio entre a procura e a oferta, independentemente da procura se sobrepor, em inúmeros momentos, à oferta existente.*** A construção de uma rede dinâmica tem, como garantia, o tratamento igualitário entre as aeronaves, com exceção dos voos de carácter de urgência que não foram, no presente trabalho de investigação, utilizados e evidenciados;

- ***Criar, desenvolver e/ou adaptar metodologias e/ou ferramentas que permitam uma rápida e eficaz adaptação de medidas ao contexto atual e às consequentes alterações percecionadas neste setor.*** Para além da fácil construção de uma rede dinâmica, foi possível comprovar a facilidade e rapidez de adaptação, com base numa nova estrutura necessária em determinado momento da análise crítica de duas redes dinâmicas;
- ***Maximizar e potencializar os interesses dos(as) agentes(as), tanto em termos operacionais quanto económicos, sem nunca descurar a questão da segurança.*** Tendo em conta a fácil adaptação de uma rede dinâmica, a sua estrutura, composição e até mesmo extensão dos dados poderá ser modificada de acordo com as necessidades evidenciadas em cada momento;
- ***Reduzir e gerir, de acordo com as variáveis e restrições possíveis, o grau de incerteza das operações de tráfego aéreo.*** Apesar do grau de incerteza estar sempre presente em cada rede dinâmica, como a sua construção se encontra envolta numa vasta análise de dados reais, será possível incluir e respeitar as restrições conhecidas em determinado momento e, após a obtenção dos resultados, é exequível a realização de uma análise crítica e rápida da validade dessas informações e da respetiva utilidade.

A simplicidade da construção de uma determinada rede dinâmica, em contraponto com a complexidade de uma determinada TMA, representa um dos principais desafios cuja análise matemática permitirá determinar a probabilidade de utilização da capacidade disponibilizada, identificando os estados cuja criticidade deverá ser acompanhada com uma maior periodicidade e, dessa forma, requerendo uma gestão mais adequada e precisa do fluxo de tráfego aéreo. A análise matemática anteriormente citada representa um processo de otimização que tem como objetivo melhorar a gestão do fluxo de tráfego aéreo, maximizando o fluxo de tráfego aéreo recebido em uma determinada TMA e minimizando os atrasos registados, através da implementação de medidas adequadas.

6.3 Principais Conclusões Relativas aos Resultados Obtidos

Através da modelação realizada com o suporte e a aplicação das diferentes redes dinâmicas construídas, foi possível detetar o padrão de funcionamento do fluxo de tráfego aéreo na TMA de Lisboa, identificando os períodos de tempo mais problemáticos e prevendo o seu comportamento com o intuito de implementar TMIs de forma atempada e segura.

De entre as diferentes redes dinâmicas criadas foi possível identificar o claro grau de saturação da TMA de Lisboa e a necessidade de adaptação de medidas, tendo em conta as limitações físicas inevitavelmente existentes e que certamente restringem o aumento da procura do fluxo de tráfego aéreo. Consequentemente, através da interpretação generalizada dos resultados obtidos, verificou-se o elevado grau de constrangimento vivenciado, durante os diferentes períodos de tempo analisados, tendo um impacto direto na segurança das operações de tráfego aéreo.

Os resultados obtidos e vastamente analisados demonstraram a importância e a validade dos modelos de previsão alcançados através da aplicação da Teoria das Cadeias de Markov, confirmando a sua capacidade de previsão do comportamento futuro do fluxo de tráfego aéreo.

A vasta variedade de redes dinâmicas construídas e analisadas permitiu concluir que a RD-B representou, de forma mais adequada, a realidade do contexto da TMA de Lisboa e, apesar deste facto, as demais redes dinâmicas permitiram validar e apoiar as conclusões obtidas através da RD-B, salientando a relevância dos dados utilizados. Complementarmente, é possível comprovar que o número de movimentos de aeronaves é substancialmente superior no Verão, potencializando o aumento de congestionamentos da TMA de Lisboa, sendo precisamente o período de tempo dos dados contemplados para a construção da RD-B.

A determinação da distribuição de probabilidades estacionária de cada rede dinâmica permitiu descrever o comportamento da mesma, com o intuito de efetuar uma previsão a um longo prazo, verificando a existência de uma tendência significativa para que algumas redes dinâmicas permaneçam em estados considerados como problemáticos e/ou preocupantes. Complementarmente, o cálculo do tempo médio de recorrência esperado permitiu identificar quanto tempo, em média, determinados estados voltam a ser observados em cada rede dinâmica, identificando, consequentemente, a rapidez com que a taxa de ocupação da TMA de Lisboa atinge o seu limiar de saturação. Paralelamente, o cálculo do tempo médio de transição entre um determinado par de estados foi imprescindível para verificar quando ocorre a revisita a cada um dos estados e, dessa forma, foi possível verificar se a saturação ocorria de forma inesperada e ocasional ou se era verificada de forma reiterada.

Por fim, mas não menos importante, realça-se a facilidade com que os resultados da análise efetuada poderão ser compreendidos por qualquer agente e, consequentemente, adaptados e/ou recalculados, sem a necessidade da utilização de programas computacionais robustos e/ou que requeiram um investimento avultado.

6.4 Trabalhos Futuros

Os aspetos referentes à metodologia desenvolvida neste trabalho de investigação e que requerem uma análise posterior, podem ser classificados de acordo com duas perspetivas, nomeadamente, os aspetos identificados durante o processo de revisão bibliográfica e os que foram evidenciados durante o processo de modelação das diferentes redes dinâmicas. No que diz respeito ao processo de recolha de informações e/ou aplicações práticas de inúmeras TMIs, foi possível enunciar, descrever e exemplificar as principais medidas utilizadas com o pretexto de auxiliarem e/ou facilitarem a gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Através dessa análise, foi possível reconhecer algumas lacunas, identificando as suas aplicações práticas, restringindo os momentos de implementação, realçando os cuidados que deverão ser tomados e até mesmo aconselhando a implementação conjunta com outras TMIs.

Apesar da constante evolução das ferramentas que podem ser utilizadas pelos(as) agentes, é necessário ressalvar a importância da rápida identificação de lacunas, não só em um(a) determinado(a) método e/ou metodologia, como também na tomada de decisão dos(as) agentes. Este sentido crítico desenvolvido e implementado por cada um(a) permite colmatar as limitações existentes e sugerir, descobrir e/ou desenvolver soluções que se moldem, de forma cada vez mais adequada, à realidade do setor, salientando que existem diferenças substanciais entre as TMAs, sendo por isso fundamental ter em conta todas as especificidades existentes.

Uma das principais limitações dos(as) diversos(as) métodos e metodologias investigados(as) diz respeito à importância das medidas preventivas quando comparadas com as corretivas, não sendo uma lacuna particularmente evidenciada por outros(as) autores(as). Reconhecendo de antemão a limitação de recursos, os(as) agentes não deverão aplicar os seus esforços única e exclusivamente na seleção de medidas táticas que tenham a capacidade de lidar com problemas a um curto prazo, sendo desejável o aperfeiçoamento de programas computacionais e até mesmo de mentalidades e/ou métodos de trabalho que permitam obter, com um maior grau de fiabilidade, dados que auxiliem na definição de medidas estratégicas.

Relativamente ao processo de modelação das redes dinâmicas, foram verificadas dificuldades em duas delas que são justificadas devido à sua estrutura, no que diz respeito ao número de estados pré-definidos e aos respetivos intervalos da taxa de ocupação. Esta dificuldade poderá ter sido causada por algum erro no processo de triagem ou, até mesmo, na existência de inúmeros voos cuja informação era insuficiente para ser contemplada na análise. Por outro lado, as inúmeras variáveis que poderão complementar cada rede dinâmica deverão ser consideradas como aspetos relativamente complexos, pois representam algumas condicionantes que poderão auxiliar numa otimização mais efetiva do normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Genérica e transversalmente, é possível destacar alguns dos principais aspetos percecionados, nomeadamente, as alterações constantes verificadas no fluxo de tráfego aéreo que requerem uma rápida e eficaz adaptação, a complexidade não só das operações como da rede de agentes que requer uma coordenação eficiente e inteligente e a elevada quantidade de dados e/ou informações provenientes de inúmeras fontes que requerem uma análise cuidada e fiável.

Adicionalmente, uma das limitações existentes na atualidade e que não foi encontrada em nenhuma das fontes bibliográficas analisadas, são as circunstâncias e as consequências promovidas pela COVID-19, sendo fulcral que o setor consiga recuperar da diminuição brusca que sofreu de forma inesperada.

Como recomendação para trabalhos de investigação futuros que possam recorrer à análise efetuada no presente trabalho de investigação, sugere-se a implementação da metodologia utilizada para as demais TMAs com o intuito de validar a sua relevância e utilidade na otimização do fluxo de tráfego aéreo. Por outro lado, e com o intuito de tornar a modelação cada vez mais realista, sugere-se a quantificação de algumas das variáveis apresentadas, de forma a serem integradas na modelação e anteverem o seu impacto na previsão da variação do fluxo de tráfego aéreo. De entre as inúmeras variáveis, sugere-se a análise das rotas de entrada e de saída da TMA de Lisboa pois, dessa forma, será possível detetar possíveis pontos do espaço aéreo com maior probabilidade de ocorrência de congestionamento e, através dessa análise, pode ser sugerida uma alteração e/ou melhoria de algumas rotas que evitem tal evento prejudicial.

Complementarmente, quando a previsão da ocupação de uma determinada TMA se aproxima do limite máximo de 80%, seria importante a implementação de uma ou mais medidas que tenham a capacidade de distribuir esse fluxo de tráfego aéreo por outros setores aéreos que agilizem as condições vivenciadas e que permitam atingir, a um curto prazo, o equilíbrio pretendido entre a procura registada e a oferta disponibilizada.

Por fim, mas não menos importante, seria interessante a realização de uma comparação séria e profunda entre os resultados obtidos no presente trabalho de investigação e aqueles que seriam obtidos através da implementação desta metodologia com a adição do conhecimento prévio dos estados passados. Recordando que a Teoria das Cadeias de Markov é um processo sem memória, na realidade, seria importante confirmar se o fenómeno analisado é um processo puramente markoviano ou se a reunião de um histórico alargado de dados ocorridos no passado terá um impacto, seja ele positivo ou negativo, na obtenção das previsões pretendidas com o desenvolvimento do presente trabalho de investigação.

Adicionalmente, e recordando uma análise efetuada no Capítulo 4 relativamente à aplicabilidade da Equação de Chapman-Kolmogorov, de forma a permitir uma progressão do estudo iniciado neste trabalho de investigação, mas, neste caso, efetuando uma previsão em n etapas, seria interessante e fundamental a utilização deste algoritmo que auxiliará no cálculo individual dos inúmeros elementos que compõem a Matriz de Probabilidade de Transição.

O cálculo em causa, apesar de complexo, será agilizado e facilitado pela aplicação desta equação. Salienta-se que a previsão efetuada ao longo deste trabalho de investigação consistiu em apenas uma etapa, motivo pelo qual não foi necessária a utilização da Equação de Chapman-Kolmogorov, pois o objetivo da análise das diferentes redes dinâmicas criadas era a lógica de construção das mesmas e a pertinência dos resultados imediatos que foram obtidos, sendo também importante reforçar que a definição de uma etapa poderá ser de um mero período de tempo de dez minutos ou até mesmo de uma hora, não afetando o raciocínio de construção e de análise crítica de cada rede dinâmica.

Folha em branco

Referências Bibliográficas

[1] Simão, C. A., Bousson, K. (2023). Models and Methods for Air Traffic Management in Terminal Areas. Submitted to the *International Review of Aerospace Engineering* (in review).

[2] Massachusetts Institute of Technology (MIT) (2025). Total Operating Fleet. Disponível em: http://web.mit.edu/ [Acedido em abril de 2025].

[3] The World Bank Open Data (2025). Air Transport, Registered Carrier Departures Worldwide. Disponível em: http://data.worldbank.org/ [Acedido em abril de 2025].

[4] The World Bank Open Data (2025). Air Transport, Freight (Million Ton-Km). Disponível em: http://data.worldbank.org/ [Acedido em abril de 2025].

[5] The World Bank Open Data (2025). Air Transport, Passengers Carried. Disponível em: http://data.worldbank.org/ [Acedido em abril de 2025].

[6] Aviation Safety Network (2025). Number of Occurrences. Disponível em: http://aviation-safety.net/ [Acedido em abril de 2025].

[7] Aviation Safety Network (2025). Number of Fatalities. Disponível em: http://aviation-safety.net/ [Acedido em abril de 2025].

[8] Massachusetts Institute of Technology (MIT) (2025). System Total Operating Revenue. Disponível em: http://web.mit.edu/ [Acedido em abril de 2025].

[9] Massachusetts Institute of Technology (MIT) (2025). System Total Operating Expenses. Disponível em: http://web.mit.edu/ [Acedido em abril de 2025].

[10] International Civil Aviation Organization (ICAO), 2014. *Doc 9971 – Manual on Collaborative Air Traffic Flow Management*, 2ª Edição.

[11] Australia Indonesia Partnership (2011). *Air Traffic Management Master Plan for Indonesia – Final Report*.

[12] Alvarez, L., Cegarra, J., Richards, A. (2011). Network Management Under Uncertainty – The ONBOARD Project: Research Objectives and Current Status. *First SESAR Innovation Days*, 1-7. Toulouse, França (29 de novembro a 01 de dezembro).

[13] Damhuis, E., Jonge, H., Visser, H., Seljée, R. (2015). Optimising Air Traffic Flow Management – Improving the Assignment of Pre-Departure Delays Using Optimisation on the Assignment of Slots. *Air Transport and Operations Symposium (ATOS)*, 5-18. Delft, Países Baixos (20 de julho a 23 de julho).

[14] Simão, C., Bousson, K. (2021). Terminal Area Occupancy Rate Optimization Using Markov Chains Concepts. *14th World Congress in Computational Mechanics (WCCM) & European Community on Computational Methods in Applied Sciences (ECCOMAS) 2020*. Paris, França (11 de janeiro a 15 de janeiro) [Realizado de forma vitual]

[15] Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC) (s.d). *Guia de Utilização do Espaço Aéreo*.

[16] NAV Portugal (2015). *Manual VFR – AIS*.

[17] NAV Portugal (2014). *AIP Portugal*.

[18] Scala, P., Mota, M., Zuniga, C. (2015). Assessing the Future TMA Capacity of Lelystad Airport Using Simulation. *Air Transport and Operations Symposium (ATOS)*, 1-12. Delft, Países Baixos (20 de julho a 22 de julho).

[19] Fellman, L., DeArmon J., Connolly, K. (2004). Estimating Efficacy of Progressive Planning for Air Traffic Flow Management. *Winter Simulation Conference*, 1312-1317. Washington, Washington DC, EUA (05 de dezembro a 08 de dezembro).

[20] Samà, M., D'Ariano, A., Pacciarelli, D. (2012). Optimal Aircraft Traffic Flow Management at a Terminal Control Area During Disturbances. *15th Meeting of the EURO Working Group on Transportation (EWGT)*, 416-469. Paris, França (10 de setembro a 13 de setembro).

[21] Pistelli, M., D'Ariano, A., Pacciarelli, D. (2011). *Optimization Models and Algorithms for Air Traffic Control in the Airspace of Busy Airports*. Universit a degli Studi di Roma Tre, Dipartimento di Informatica e Automazione.

[22] Rios, J., Lohn, J. (2009). A Comparison of Optimization Approaches for Nationwide Traffic Flow Management. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-11. Chicago, Illinois, EUA (10 de agosto a 13 de agosto).

[23] Instituto Nacional de Estatística (INE) (2020). Indicadores de Transporte Aéreo, Mensal. Disponível em: http://www.ine.pt/ [Acedido em setembro de 2020].

[24] Samà, M., D'Ariano, A., D'Ariano, P., Pacciarelli, D. (2014). Optimal Aircraft Scheduling and Routing at a Terminal Control Area During Disturbances. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 47(1), 61-85.

[25] Agustín, A., Alonso-Ayuso, A., Escudero, L., Pizarro, C. (2010). Mathematical Optimizationg Models for Air Traffic Flow Management: A Review. *Studia Informatica Universalis* 8(2), 141-184.

[26] Bousson, K., Domingues, T.M. (2011). Air Traffic Flow Modelling and Simulations Based on Dynamic Networks. International Review on Modelling and Simulations 4(6), 3418-3424.

[27] Heere, K., Zelenka, R. (2000). *A Comparison of Center/TRACON Automation System and Airline Time of Arrival Predictions. National Aeronautics and Space Administration (NASA) Research Document NASA/TM-2000-209584*.

[28] Robinson III, J., Isaacson, D. (2000). A Concurrent Sequencing and Deconfliction Algorithm for Terminal Area Air Traffic Control. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC) and Exhibit*, 4473-4484. Denver, Colorado, EUA (14 de agosto a 17 de agosto).

[29] Meyn, L. (2010). A Closed-Form Solution to Multi-Point Scheduling Problems. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Modeling and Simulation Technologies Conference*, 1-12. Toronto, Ontário, Canadá (02 de agosto a 05 de agosto).

[30] McNally, D., Erzberger, H., Bach, R., Chan, W. (1999). A Controller Tool for Transition Airspace. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1826-1834. Portland, Óregon, EUA (09 de agosto a 11 de agosto).

[31] Coupe, W., Milutinovic, D., Malik, W., Jung, Y. (2016). A Data Driven Approach for Characterization of Ramp Area Push Back and Ramp-Taxi Processes. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 16th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-15. Washington, Washington DC, EUA (13 de junho a 17 de junho).

[32] Elefante, S. (2001). *A Statistical and Probabilistic Approach for Improving Efficiency in Air Traffic Flow Management*. Tese de Doutoramento. University of Glasgow, Department of Aerospace Engineering.

[33] Cruciol, L., Weigang, L. (2013). Air Traffic Flow Reduction Using Genetic Algorithms in Brazilian Airspace. *International Conference on Artificial Intelligence (ICAI) The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing*, 1-5. Las Vegas, Nevada, EUA (22 de julho a 25 de julho).

[34] Crespo, A. (2010). *Aprendizagem por Reforço Aplicada ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego Aéreo*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Instituto de Ciências, Departamento de Ciência da Computação.

[35] Oliveira, I., Siewerdt, E., Miyamaru, D. (2009). Reducão de Atrasos em Tráfego Aéreo por Meio do Algoritmo de Entropia Cruzada. *VIII Simpósio de Transporte Aéreo (SITRAER)/II RIDITA*, 613-627. São Paulo, Brasil (03 de novembro a 06 de novembro).

[36] Ministério da Defesa do Comando da Aeronáutica (2010). *Serviço de Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo*.

[37] Airservices Australia (2016). *Air Traffic Flow Management – Harmony for ANSPs*, 5ª Edição.

[38] Research and Innovative Technology Administration (RITA) – Volpe National Transportation Systems Center (2010). *Concept of Operations for Indian Air Traffic Flow Management*.

[39] Duong, V., Ferchaud, F., Gavoille, C., Mosbah, M. (2004). A New Slot Allocation for ATFM. *International Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) 7th Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC)*, 1-5. Washington, Washington DC, USA (03 de outubro a 06 de outubro).

[40] Agogino, A., Tumer, K. (2012). A Multiagent Approach to Managing Air Traffic Flow. *Autonomous Agents and MultiAgent Systems* 24(1), 1-25.

[41] Kicinger, R., Chen J., Steine, M., Pinto, J. (2016). Airport Capacity Prediction with Explicit Consideration of Weather Forecast Uncertainty. *Journal of Air Transportation* 24(1), 18-28.

[42] Flathers, B., Fronzak, M., Huberdeau, M., McKnight, C., Wang, M., Wilhelm, G. (2013). A Framework for the Development of the ATM-Weather Integration Concept. *16th Conference on Aviation, Range, and Aerospace Meteorology (ARAM)*, 1-30. Austin, Texas, EUA (05 de janeiro a 10 de janeiro).

[43] Zhou, Y., Wan, Y., Wanke, C., Taylor, C., Roy, S. (2013). A Probabilistic Collocation Method-Based Approach for Optimal Strategic Air Traffic Flow Management under Weather Uncertainties. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 13th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-14. Los Angeles, Califórnia, EUA (12 de agosto a 14 de agosto).

[44] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), Federal Aviation Administration (FAA) (2014). *Comparison of Air Traffic Management – Related Operational Performance: U.S./Europe.*

[45] Ribeiro, V., Weigang, L., Jun, D., Monteiro, F. (2012). Estudo de CDM com Algoritmos RBS e Compression no Sequenciamento de Partidas de Aeronaves. *Anais do 5º Simpósio de Segurança de Voo (SSV)*, 1089-1095. São Paulo, Brasil (28 de agosto a 30 de agosto).

[46] Celestino, V., Amikura, N., Vaz, A., Oliveira, A., Bernardes, L., Fonseca, A., Weigang, L. (2009). Panorama do Gerenciamento do Fluxo e da Capacidade de Tráfego Aéreo: Aperfeiçoamento do Sistema Brasileiro. *XXIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, 1-4. Vitória, Brasil (09 de novembro a 13 de novembro).

[47] Haines, R., Doubek, S. (2003). *Human-Computer Interfaces Required in a Modern Air Traffic Control Research Simulator. National Aeronautics and Space Administration (NASA).*

[48] Davis, T., Isaacson, D., Robinson III, J., Braven, W., Lee, K., Sanford, B. (1997). Operational Test Results of the Passive Final Approach Spacing Tool. *IFAC 8th Symposium on Transportation Systems* 30(8), 175-181. Chania, Grécia (16 de junho a 18 de junho).

[49] Ball, M., Hoffman, R., Lovell, D., Mukherjee, A. (2005). Response Mechanisms for Dynamic Air Traffic Flow Management. *8th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Baltimore, Maryland, EUA (27 de junho a 30 de junho).

[50] Lee, K., Kerns, K., Bone, R., Nickelson, M. (2001). Development and Validation of the Controller Acceptance Rating Scale (CARS): Results of Empirical Research. *4th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-14. Santa Fé, Novo México, EUA (03 de dezembro a 07 de dezembro).

[51] Dorighi, N., Sullivan, B. (2003). Future Flight Central: A Revolutionary Air Traffic Control Tower Simulation Facility. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 1-7. Austin, Texas, EUA (11 de agosto a 14 de agosto).

[52] Evans, J. (2001). Tactical Weather Decision Support to Complement "Strategic" Traffic Flow Management for Convenctive Weather. *4th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 98-102. Santa Fé, Novo México, EUA (03 de dezembro a 07 de dezembro).

[53] Voss, W., Hoffman, J. (2000). Analytical Identification of Airport and Airspace Capacity Constraints. *3rd USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 409-420. Nápoles, Itália (03 de junho a 06 de junho).

[54] Skorupski, J., Stelmach, A. (2008). Model of Air Traffic in Terminal Area for ATFM Safety Analysis. *17th European Safety and Reliability Conference (ESREL), Safety and Reliability for managing Risk* 3, 2191-2197. Valência, Espanha (22 de setembro a 25 de setembro).

[55] Isaacson, D., Davis, T., Robinson III, J. (1997). Knowledge-Based Runway Assignment for Arrival Aircraft in the Terminal Area. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1758-1768. Nova Orleans, Louisiana, EUA (11 de agosto a 13 de agosto).

[56] Günther, T. (2004). Investigation of the Effects of Airport ATFM Restrictions. *1st International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, 1-5. Zilina, Eslováquia (22 de novembro a 24 de novembro).

[57] Cheng, V., Sweriduk, G., Vaddi, S., Tandale, M., Seo, A., Abramson, P., Koenke, E. (2009). Modeling Requirements to Support Assessment of NextGen Mid-Term Performance. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 9th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-17. Hilton Head, Carolina do Sul, EUA (21 de setembro a 23 de setembro).

[58] Farley, T., Foster, J., Hoang, T., Lee, K. (2001). A Time-Based Approach to Metering Arrival Traffic to Philadelphia. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 1st Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-11. Los Angeles, Califórnia, EUA (16 de outubro a 18 de outubro).

[59] Kuhn, K., Raith, A., (2010). Biobjective Air Traffic Flow Management. *45th Annual Conference of the Operations Research Society of New Zealand (ORSNZ)*, 299-308. Auckland, Nova Zelândia (29 de novembro a 30 de novembro).

[60] Alves, D., Souza, B., Weigang, L., Crespo, A. (2007). Um Modelo de Aprendizagem Adaptado ao Gerenciamento Tático do Fluxo de Tráfego Aéreo: Caso CINDACTA I. *XXI Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, 317-327. Rio de Janeiro, Brasil (18 de novembro a 23 de novembro).

[61] Steiner, S., Štimac, I., Melvan, M. (2014). Towards to Collaborative Air Traffic and Airport Management. *22nd International Symposium on Electronics in Transport ISEP 2014: ITS for Seamless and Energy Smart Transport*, 1-7. Liubliana, Eslovénia (24 de março a 25 de março).

[62] Gawinowski, G., Nobel, J., Grau, J., Dohy, D., Guichard, L., Nicolaon, J., Duong, V. (2003). Operational Concepts for SuperSector. *5th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 697-704. Budapeste, Hungria (23 de junho a 27 de junho).

[63] Robinson III, J., Isaacson, D. (2002). Development of a Closed-Loop Testing Method for a Next-Generation Terminal Area Automation System. *American Control Conference*, 1325-1330. Anchorage, Alasca, EUA (08 de maio a 10 de maio).

[64] Inniss, T., Ball, M. (2002). Estimating One-Parameter Airport Arrival Capacity Distributions for Air Traffic Flow Management. *Air Traffic Control Quarterly* 12(3), 223-251.

[65] Kharchenko, V., Chynchenko, Y. (2013). Principles of Improvement of Air Traffic Flow and Capacity Management in Terminal Control Areas Under Uncertainty Conditions. *National Aviation University* 57(4), 12-17.

[66] Majumdar, A., Ochieng, W. (2004). The Factors Affecting Airspace Capacity in Europe: A Framework Methodology Based on Cross Sectional Time-Series Analysis using Simulated Controller Workload Data. *National Aviation University* 57(3), 385-405.

[67] Senguttuvan, P. (2006). Economics of the Airport Capacity System in the Growing Demand of Air Traffic – A Global View. *Transport Research Annual Forum, 47th Annual Transportation Research Forum*, 1-29. Nova Iorque, Nova Iorque, EUA (23 de março a 25 de março).

[68] Jung, Y., Malik, W., Tobias, L., Gupta, G., Hoang, T., Hayashi, M. (2015). Performance Evaluation of SARDA: An Individual Aircraft-based Advisory Concept for Surface Management. *Air Traffic Control Quarterly* 22(3), 195-221.

[69] Swenson, H., Hoang, T., Engelland, S., Vicent, D., Sanders, T., Sanford, B., Heere, K. (1997). Design and Operational Evaluation of the Traffic Management Advisor at the Fort Worth Air Route Traffic Control Center. *1st USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-13. Saclay, França (17 de junho a 19 de junho).

[70] Odoni, A., Bowman, J., Delahaye, D., Deyst, J., Feron, E., Hansman, R., Khan, K., Kuchar, J., Pujet, N., Simpson, R. (1997). Existing and Required Modeling Capabilities for Evaluating ATM Systems and Concepts. *Modeling Research Under NASA/AATT*.

[71] U.S. Department of Transportation – Federal Aviation Administration (FAA) (1983). *Airport Capacity and Delay – Advisory Circular*.

[72] Gilbo, E. (1997). Optimizing Airport Capacity Utilization in Air Traffic Flow Management Subject to Constraints at Arrival and Departure Fixes. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Control Systems Technology* 5(5), 490-503.

[73] Neto, A. (2013). Eficiência Técnica: Uma Avaliação de Aeroportos Brasileiros. *Journal of Transport Literature* 7(4), 147-174.

[74] Hoang, T. (2004). A Description of the Multi-Center Traffic Management Advisor (McTMA) Simulation Environment. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-9. Chicago, Illinois, EUA (20 de setembro a 22 de setembro).

[75] Murphy, J., Reisman, R., Savoye, R. (2006). A Data-Centric Air Traffic Management Decision Support Tool Model. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 6th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference*, 1-10. Wichita, Kansas, EUA (25 de setembro a 27 de setembro).

[76] Federal Aviation Administration (FAA) (2009). *Traffic Flow Management in Traffic Flow Management in the National Airspace System*.

[77] Ranieri, A. (2010). *Combinatorial Exchange Models for a User-Driven Air Traffic Flow Management in Europe*. Tese de Doutoramento. Università Degli Studi di Trieste, Ingegneria dell'Informazione.

[78] Muñoz, L. (2013). *Cruise Speed Reduction for Air Traffic Flow Management*. Tese de Doutoramento. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i Aerospacial de Castelldefels.

[79] Matos, P. (1998). *The Development of Decision Support Models for European Air Traffic Flow Management*. Tese de Doutoramento. University of Warwick, Warwick Business School.

[80] Dib, M., Weigang, L., Melo, A. (2007). Abordagem de Balanceamento de Negociação entre Agentes em Sincronização de Tráfego. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) Latin America Transactions* 5(5), 338-345.

[81] Cruciol, L., Weigang, L. (2011). Air Holding Problem Module to Decision Support in Air Traffic Flow Management. *International Conference on Artificial Intelligence (ICAI) The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing* 2, 832-837. Las Vegas, Nevada, EUA (18 de julho a 21 de julho).

[82] Almeida, C., Weigang, L., Timoszczuk, A. (2011). Algoritmos de Fluxo Máximo em Rede Aplicado em Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo. *Journal of Transport Literature* 5(2), 73-91.

[83] DeArmon, J., Stalnaker, S., Katkin, R., McKinney, M. (2009). Benefits Analysis of an Air Traffic Flow Management Capability. *Canadian Transportation Research Forum (CTRF) Bibliography of Proceedings*, 246-259.

[84] Câmara, A. (2013). *Controlo de Tráfego Aéreo usando o Microsoft Flight Simulator X*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Coimbra, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Engenharia Informática.

[85] Zhaoning, Z., Xinhua, L., Jiansheng, H. (2007). Decision Support System of Air Traffic Flow Management Based on Coordination Theory. *7th International Conference of Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS)* 6, 329-336. Dalian, China (24 de setembro a 27 de setembro).

[86] Cruciol, L. (2012). *Modelagem de Apoio à Decisão para o Problema de Espera no Ar Utilizando Sistemas Multiagentes e Aprendizagem por Reforço*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Ciência da Computação.

[87] Souza, B. (2008). *Modelo de Balanceamento com Multi-Fluxos para Aplicação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Ciência da Computação.

[88] Ribeiro, V., Ribeiro, W. (2008). *Previsão de Cenário para o Controle de Tráfego Aéreo do CINDACTA I*. Monografia de Bacharelato. Universidade de Brasília, Instituto de Ciências Exatas, Departamento de Ciência da Computação.

[89] Silva, A. (2002). *Sistema de Simulação a Acelerado para Análise de Fluxo de Tráfego Aéreo*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

[90] Dib, M., Cardoso, M., Weigang, L. (2005). Sistema para Sincronização e Gerenciamento de Fluxo de Tráfego Aéreo Multi-Agentes. *Revista Transportes XIII*(1), 48-56.

[91] Chemla, D., Diaz, D., Kerlirzin, P., Manchon, S. (1994). Using clp(FD) to Support Air Traffic Flow Management. *International Logic Programming Symposium Post-Conference Workshop on Constraint Languages/Systems and Their Use in Problem Modelling*, 1-14. Ithaca, Nova Iorque, EUA (18 de novembro a 19 de novembro).

[92] Churchill, A., Lovell, D., Ball, M. (2009). Evaluating a New Formulation for Large-Scale Traffic Flow Management. *8th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Napa, Califórnia, EUA (29 de junho a 02 de julho).

[93] Air Traffic & Navigation Services – Central Airspace Management Unit (2010). *Enhanced ATFM Operator's Manual*, 2ª Edição.

[94] Junior, A., Weigang, L., Barros, A. (2012). Fairness Analysis with Flight Cost Impact Using the Reinforcement Learning Approach. *Journal of the Brazilian Air Transportation Research Society* 8(1), 9-28.

[95] Lau, A., Berling, J., Linke, F., Gollnick, V., Nachtigall, K. (2015). Large-Scale Network Slot Allocation with Dynamic Time Horizons. *11th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Lisboa, Portugal (23 de junho a 26 de junho).

[96] Lau, A., Budde, R., Berling, J., Gollnick, V. (2014). The Network Flow Environment: Slot Allocation Model Evaluation with Convective Nowcasting. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, 1-13. São Petersburgo, Rússia (07 de setembro a 12 de setembro).

[97] Goodchild, C., Vilaplana, M., Elefante, S. (2001). A Strategic and Tactical Tool for ATFM Planning Based on Statistics and Probability Theory. *4th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-11. Santa Fé, Novo México, EUA (03 de dezembro a 07 de dezembro).

[98] International Civil Aviation Organization (ICAO) (2010). *Caribbean/South American Air Traffic Flow Management Manual*, 1ª Edição.

[99] Clare, G., Richards, A., Escartín, J., Martínez, D., Cegarra, J., Alvarez, L. (2012). Air Traffic Flow Management Under Uncertainty: Interactions Between Network Manager and Airline Operations Centre. *Second SESAR Innovation Days*, 1-8. Brunsvique, Alemanha (27 de novembro a 29 de novembro).

[100] Erzberger, H. (2001). The Automated Airspace Concept. *4th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-16. Santa Fé, Novo México, EUA (03 de dezembro a 07 de dezembro).

[101] Bertsimas, D., Patterson, S. (1998). The Air Traffic Flow Management Problem with Enroute Capacities. *Operations Research* 46(3), 406-422.

[102] Skorupski, J. (2011). Dynamic Methods of Air Traffic Flow Management. *Transport Problems: An International Scientific Journal* 6(1), 21-28.

[103] Gupta, S., Bertsimas, D. (2011). Multistage Air Traffic Flow Management Under Capacity Uncertainty – A Robust and Adaptive Optimization. *51st AGIFORS Annual Symposium and Study Group Meeting*, 692-721. Antália, Turquia (10 de outubro a 14 de outubro).

[104] Ichoua, S. (2013). A Scenario-Based Approach for the Air Traffic Flow Management Problem with Stochastic Capacities. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering* 7(8), 602-604.

[105] Roy, S., Sridhar, B., Verghese, G. (2003). An Aggregate Dynamic Stochastic Model for an Air Traffic System. *5th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 697-704. Budapeste, Hungria (23 de junho a 27 de junho).

[106] Mukherjee, A. (2004). *Dynamic Stochastic Optimization Models for Air Traffic Flow Management*. Tese de Doutoramento. University of California, Institute of Transportation Studies.

[107] Kim, A. (2011). *Collaborative Resource Allocation Strategies for Air Traffic Flow Management*. Tese de Doutoramento. University of California, Civil and Environmental Engineering.

[108] Bertsimas, D., Gupta, S. (2009). Fairness in Air Traffic Flow Management. *Institute for Operations Research and the Management Sciences (INFORMS) Meeting*, 1-27. San Diego, Califórnia, EUA (11 de outubro a 14 de outubro).

[109] Hadjaz, A., Marceau, G., Savéant, P., Schoenauer, M. (2012). Increasing Air Traffic: What is the Problem? *Second SESAR Innovation Days*, 1-9. Brunsvique, Alemanha (27 de novembro a 29 de novembro).

[110] Clare, G., Richards, A. (2012). Air Traffic Flow Management Under Uncertainty: Application of Chance Constraints. *2nd International Conference on Application and Theory of Automation in Command and Control Systems (ATACCS)*, 20-26. Londres, Reino Unido (28 de maio a 30 de maio).

[111] Nace, D., Carlier, J. (2003). *Final Report on Research Carried out for the Optimization of Aircraft Route Assignment in a Sectorless Environment Project*. University of Technology of Compiègne.

[112] Shah, A., Pritchett, A., Feigh, K., Kalaver, S., Jadhav, A., Corker, K., Holl, D., Bea, R. (2005). Analyzing Air Traffic Management Systems Using Agent-Based Modeling and Simulation. *6th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 661-671. Baltimore, Maryland, EUA (27 de junho a 30 de junho).

[113] Ball, M., Chen, CY., Hoffman, R., Vossen, T. (2001). Collaborative Decision Making in Air Traffic Management: Current and Future Research Directions. Em: Bianco, L., et al. *New Concepts and Methods in Air Traffic Management*. 17-30. Transportation Analysis. Springer Nature.

[114] Wolfe, S. (2007). Supporting Air Traffic Flow Management with Agents. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Spring Symposium: Interaction Challenges for Intelligent Assistants*, 137-138. Stanford, Califórnia, EUA (26 de março a 28 de março).

[115] Curran, W., Agogino, A., Tumer, K. (2014). Hierarchical Simulation for Complex Domains: Air Traffic Flow Management. *Annual Conference on Genetic and Evolutionary Computation (GECCO)*, 1087-1094. Vancouver, Canadá (12 de julho a 16 de julho).

[116] Barnhart, C., Bertsimas, D., Caramanis, C., Fearing, D. (2012). Equitable and Efficient Coordination in Traffic Flow Management. *Transportation Science* 46(2), 262-280.

[117] Souza, B., Weigang, L., Crespo, A. (2008). Uma Implementação Voltada ao Balanceamento de Fluxos para Aplicação em Gerenciamento de Tráfego Aéreo. *VII Simpósio de Transporte Aéreo (SITRAER)*, 808-892. Rio de Janeiro, Brasil (26 de novembro a 28 de novembro).

[118] Bloem, M., Huang, H. (2011). Evaluating Delay Cost Functions with Airline Actions in Airspace Flow Programs. *9th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Berlim, Alemanha (14 de junho a 17 de junho).

[119] Tien, S., Taylor, C., Wanke, C. (2012). Modeling Departure Rate Controls for Strategic Flow Contingency Management. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-20. Minneapolis, Minnesota, EUA (13 de agosto a 16 de agosto).

[120] Bilimoria, K. (2016). Analysis of Additional Delays Experienced by Flights Subject to Ground Holding. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 16th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-10. Washington, Washington DC, EUA (13 de junho a 17 de junho).

[121] Delgado, L., Prats, X., Sridhar, B. (2013). Cruise Speed Reduction for Ground Delay Programs: A Case Study for San Francisco International Airport Arrivals. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 36(1), 83-96.

[122] Bloem, M., Huang, H., Bambos, N. (2012). Approximating the Likelihood of Historical Airline Actions to Evaluate Airline Delay Cost Functions. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) 51st Conference on Decision and Control*, 508-513. Maui, Hawaii, EUA (10 de dezembro a 13 de dezembro).

[123] Pourtaklo, N., Ball, M. (2009). Equitable Allocation of Enroute Airspace Resources. *8th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-8. Napa, Califórnia, EUA (29 de junho a 02 de julho).

[124] Almeida, C., Weigang, L. (2014). Jogos Satisficing para Tomada de Decisão Colaborativa em Aeroporto. *XIII Simpósio de Transporte Aéreo (SITRAER)*, 164-174. São Paulo, Brasil (17 de novembro a 19 de novembro).

[125] Almeida, C., Weigang, L. (2014). Modelagem de Funções Satisficing para Suporte a Tomada de Decisão Colaborativa nos Aeroportos. *XXVIII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes – Anais do Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes (ANPET)*, 1-12. Curitiba, Brasil (24 de novembro a 28 de novembro).

[126] Pepper, J., Mills, K., Wojcik, L. (2003). Predictability and Uncertainty in Air Traffic Flow Management. *5th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Budapeste, Hungria (23 de junho a 27 de junho).

[127] Almeida, C. (2014). *Uma Abordagem de Tomada de Decisão Colaborativa Baseada em Jogos Satisficing para Aeroportos*. Tese de Doutoramento. Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, Departamento de Engenharia Mecânica.

[128] Manley, B., Sherry, L. (2008). The Impact of Ground Delay Program (GDP) Rationing Rules on Passenger and Airline Equity. *8th Integrated Communications, Navigation and Surveillance Conference (ICNSC)*, 1-8. Bethesda, Maryland, EUA (05 de maio a 07 de maio).

[129] Rebollo, J., Brinton, C. (2015). Brownian Motion Delay Model for the Integration of Multiple Traffic Management Initiatives. *11th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Lisboa, Portugal (23 de junho a 26 de junho).

[130] Tumer, K., Agogino, A. (2008). Adaptive Management of Air Traffic Flow: A Multiagent Coordination Approach. *23rd Association for the Advancement of Artificial Intelligence (AAAI) Conference*, 1581-1584. Chicago, Illinois, EUA (13 de julho a 17 de julho).

[131] Tosic, V., Babic, O., Cangalovic, M., Hohlacov, D. (1995). *A Model to Solve En Route Air Traffic Flow Management Problem: A Temporal and Spatial Case*. Relatório Não Publicado. University of Belgrade.

[132] Wang, Y., Kulkarni, D. (2009). Modeling Weather Impact on Ground Delay Programs. *Aerospace Technology Conference and Exposition, SAE International Journal of Aerospace* 4(2), 1207-1215. Seattle, Washington DC, EUA (10 de novembro a 13 de novembro).

[133] Bloem, M., Hattaway, D., Bambos, N. (2012). Evaluation of Algorithms for a Miles-in-Trail Decision Support Tool. *5th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, 1-8. Berkeley, Califórnia, EUA (22 de maio a 25 de maio).

[134] Doble, N., Timmerman, J., Carniol, T., Klopfenstein, M., Tanino, M., Sud, V. (2009). Linking Traffic Management to the Airport Surface. *8th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-9. Napa, Califórnia, EUA (29 de junho a 02 de julho).

[135] Mukherjee, A., Hansen, M. (2009). A Dynamic Rerouting Model for Air Traffic Flow Management. *Transportation Research Part B* 43(1), 159-171.

[136] Hogan, B., Wojcik, L. (2005). Application of a Fast-Time Network Simulation to Air Traffic Flow Management Analysis. *2004 Winter Simulation Conference*, 1-8. Washington, Washington DC, EUA (03 a 08 de dezembro)

[137] Sengupta, P., Tandale, M., Menon, P. (2014). Risk-Hedged Traffic Flow Management under Airspace Capacity Uncertainties. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 37(5), 1487-1500.

[138] DeArmon, J., Cooper, W., Masek, T., Tien, A. (2016). Measuring Flight Efficiency in the National Airspace System. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 16th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-20. Washington, Washington DC, EUA (13 de junho a 17 de junho).

[139] Harwood, K. (1993). Defining Human-Centered System Issues for Verifying and Validating Air Traffic Control Systems. *Verification and Validation of Complex Systems: Human Factors Issues*, 115-129.

[140] Isaacson, D., Robinson III, J., Swenson, H., Denery, D. (2010). A Concept for Robust, High Density Terminal Air Traffic Operations. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 10th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-23. Fort Worth, Texas, EUA (13 de setembro a 15 de setembro).

[141] Crespo, J., Cuerno, C., Arnaldo, R., Saez, F., Sadornil, M., Pérez, J. (2014). A Comparison of the Two Arrival Traffic Synchronization Concepts Envisioned for NextGen and SESAR. *29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, 1-11. São Petersburgo, Rússia (07 de setembro a 12 de setembro).

[142] Diana, T. (2015). Measuring the Impact of Traffic Flow Management on Interarrival Duration: An Application of Autoregressive Conditional Duration. *Journal of Air Transport Management* 42, 219-225.

[143] Isaacson, D., Hayashi, M., Gong, C., Tang, H., Wong, G. (2018). Laboratory Evaluation of Dynamic Routing of Air Traffic in an En Route Arrival Metering Environment. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-17. Atlanta, Gergia, EUA (25 de junho a 29 de junho).

[144] Wu, M., Swensony, H. (2015). Enhancing the Traffic Management Advisor's Schedule by Time Advance. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-13. Kissimmee, Flórida, EUA (05 de janeiro a 09 de janeiro).

[145] Ostwald, P., Topiwala, T., DeArmon, J. (2006). The Miles-in-Trail Impact Assessment Capability. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 6th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Conference*, 1-14. Wichita, Kansas, EUA (25 de setembro a 27 de setembro).

[146] Robinson, M., Reynolds, H., Evans, J. (2010). Traffic Management Advisor (TMA) – Weather Integration. *14th Conference on Aviaton, Range, and Aerospace Meteorology (ARAM)*, 1-42. Atlanta, Geórgia, EUA (18 de janeiro a 21 de janeiro).

[147] Tandale, M., Menon, P. (2007). Genetic Algorithm Based Ground Delay Program Computations for Sector Density Control. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference*, 1-11. Hilton Head, Carolina do Sul, EUA (20 de agosto a 23 de agosto).

[148] Green, S., Goka, T., Williams, D. (1997). Enabling User Preferences Through Data Exchange. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 943-953. Anaheim, Califórnia, EUA (13 de outubro a 16 de outubro).

[149] Landry, S. (2004). Modifications to the Design of the Multi-Center Traffic Management Advisor Distributed Scheduler. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 4th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 375-383. Chicago, Illinois, EUA (20 de setembro a 23 de setembro).

[150] McNally, B., Bach, R., Chan, W. (1998). Field Test Evaluation of the CTAS Conflict Prediction and Trial Planning Capability. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1686-1697. Boston, Massachusetts, EUA (10 de agosto a 12 de agosto).

[151] Landry, S., Farley, T., Hoang, T. (2005). Expanding the Use of Time-Based Metering: Multi-Center Traffic Management Advisor. *6th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 315-324. Baltimore, Maryland, EUA (27 de junho a 30 de junho).

[152] Hoang, T., Farley, T., Foster, J., Davis, T. (2002). The Multi-Center TMA System Architecture and its Impact on Inter-Facility Collaboration. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 2nd Aircraft Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-11. Los Angeles, Califórnia, USA (01 de outubro a 03 de outubro).

[153] Kim, C., Akinbodunse, D., Nwakamma, C. (2005). Modeling Arrival Flight Traffic Using Arena. *18th International Conference of Computer Applications in Industry and Engineering*, 9-14. Honolulu, Hawaii, EUA (09 de novembro a 11 de novembro).

[154] Sanford, B., Harwood, K., Lee, K. (1995). Tailoring Advanced Technologies for Air Traffic Control: The Importance of the Development Process. *8th International Symposium on Aviation Psychology (ISAP)*, 1-6. Columbus, Ohio, EUA (24 de abril a 27 de abril).

[155] Davis, T., Krzeczowski, K., Bergh, C. (1994). The Final Approach Spacing Tool. *13th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace*, 73-79. Palo Alto, Califórnia, EUA (12 de setembro a 16 de setembro).

[156] Murphy, J., Clayton, J., Reisman, R., Wright, R. (2003). Physics-Based and Parametric Trajectory Prediction Performance Comparison for Traffic Flow Management. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC) and Exhibit*, 1-11. Austin, Texas, EUA (11 de agosto a 14 de agosto).

[157] Lockwood, S., Atkins, S., Dorighi, N. (2002). Surface Management Systems Simulations in NASA's Future Flight Central. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 298-305. Monterey, Califórnia, EUA (05 de agosto a 08 de agosto).

[158] Green, S., Vivona, R. (1996). Field Evaluation of Descent Advisor Trajectory Prediction Accuracy. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-13. San Diego, Califórnia, EUA (29 de julho a 31 de julho).

[159] Lee, K., Davis, T. (1995). The Development of the Final Approach Spacing Tool (FAST): A Cooperative Controller-Engineer Design Approach. *5th International Federation of Automatic Control (IFAC) Symposium on Automated Systems Based on Human Skill (Joint Design of Technology and Organisation)*, 223-230. Berlim Alemanha (26 de setembro a 28 de setembro).

[160] Robinson III, J., Davis, T., Isaacson, D. (1997). Fuzzy Reasoning-Based Sequencing of Arrival Aircraft the Terminal Area. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 442-552. Nova Orleans, Louisiana, EUA (11 de agosto a 13 de agosto).

[161] Chatterji, G., Zheng, Y. (2012). Wheels-Off Time Prediction Using Surface Traffic Metrics. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 12th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 5699-5713. Indianapolis, Indiana, EUA (17 de setembro a 19 de setembro).

[162] Quinn, C., Zelenka, R. (1998). ATC/AIR Carrier – Collaborative Arrival Planning. *2nd USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-11. Orlando, Flórida, EUA (01 de outubro a 04 de outubro).

[163] Jung, Y., Isaacson, D. (2002). Design Concept and Development Plan of the Expedite Departure Path (EDP). *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Technical*, 1-10. Los Angeles, Califórnia, EUA (01 de outubro a 03 de outubro).

[164] Jung, Y., Monroe, G. (2005). Development of Surface Management System Integrated with CTAS Arrival Tool. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 5th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-11. Arlington, Virgínia, EUA (26 de setembro a 28 de setembro).

[165] Hoang, T., Swenson, H. (1997). The Challenges of Field Testing the Traffic Management Advisor in an Operational Air Traffic Control Facility. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1409-1417. Anaheim, Califórnia, EUA (13 de outubro a 16 de outubro).

[166] Tandale, M., Menon, P. (2008). Rapid Prediction of Air Traffic for Trajectory Based Operations. *26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, 1-9. Anchorage, Alasca, EUA (14 de setembro a 19 de setembro).

[167] Tandale, M., Wiraatmadja, S., Menon, P. (2011). High-Speed Prediction of Air Traffic for Real-Time Decision Support. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-15. Portland, Óregon, EUA (08 de agosto a 11 de agosto).

[168] Rios, J., Morando, A. (2011). The Value of Reduced Uncertainty in Air Traffic Flow Management. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-14. Portland, Óregon, EUA (08 de agosto a 11 de agosto).

[169] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) (2001). *Innovative Slot Allocation: An Overview*.

[170] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) (1997). *ATFM Modelling Capability*.

[171] Tumer, K., Agogino, A. (2007). Distributed Agent-Based Air Traffic Flow Management. *6th International Joint Conference on Autonomous Agents and Multi-Agent Systems (AAMAS)*, 330-337. Honolulu, Hawaii, EUA (14 de maio a 18 de maio).

[172] Tandale, M., Menon, P. (2007). Estimation of Weather-Induced Arrival Delay Statistics through Monte-Carlo Simulations. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference*, 1-13. Hilton Head, Carolina do Sul, EUA (20 de agosto a 23 de agosto).

[173] Menon, P., Tandale, M., Kwan, J., Cheng, V. (2008). Model-Based Air Traffic Flow Management. *26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS)*, 1-11. Anchorage, Alasca, EUA (14 de setembro a 19 de setembro).

[174] Bilimoria, K., Sridhar, B., Chatterji, G., Sheth, K., Grabbe, S. (2000). FACET: Future ATM Concepts Evaluation Tool. *5th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-9. Nápoles, Itália (13 de junho a 16 de junho).

[175] Kopardekar, P., Green, S. (2005). Managing Sector Congestion Using Airspace Restriction Planner. *6th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-9. Baltimore, Maryland, EUA (27 de junho a 30 de junho).

[176] Dorado-Usero, M., Deycard, S., Schwartz, A., Carr, K., Williams, A. (2007). *System Wide Modeling in Fast-time Simulation. EUROCONTROL/Federal Aviation Administration (FAA).*

[177] Yoon, Y., Hansen, M. (2012). Value of Better Weather Information in the Probabilistic Air Traffic Flow Management: An Application of the Geometric Recourse Model (GRM). *5th International Conference on Research in Air Transportation (ICRAT)*, 452-457. Berkeley, Califórnia, EUA (22 de maio a 25 de maio).

[178] Vossen, T. (2002). *Fair Allocation Concepts in Air Traffic Management*. Tese de Doutoramento. University of Maryland, Institute for Systems Research.

[179] Molina, M., Carrasco, S., Matin, J. (2014). Agent-Based Modeling and Simulation for the Design of the Future European Air Traffic Management System: The Experience of CASSIOPEIA. *Highlights of Practical Applications of Heterogeneous Multi-Agent Systems (PAAMS Workshops) Communications in Computer and Information Science (CCIS)*, 22-23. Salamanca, Espanha (04 de junho a 06 de junho).

[180] Zhao, W., Curran, R., Abbass, H. (2015). Dynamic Capacity-Demand Balance in Air Transport Systems Using Co-Evolutionary Computational Red Teaming. *Air Transport and Operations Symposium (ATOS)*, 1-11. Delft, Países Baixos (20 de julho a 23 de julho).

[181] Kramer, L., Baileya, R., Ellisa, K., Normanb, R., Williams, S., Arthur III, J., Sheltona, K., Prinzel III, L. (2011). Enhanced and Synthetic Vision for Terminal Maneuvering Area NextGen Operations. *Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE) Defense, Security, and Sensing*, 8042, 1-16. Orlando, Flórida, EUA (25 de abril a 29 de abril).

[182] Swenson, H., Barhydt, R., Landis, M. (2006). Next Generation Air Transportation System (NGATS) Air Traffic Management (ATM) – Airspace Project. *National Aeronautics and Space Administration (NASA).*

[183] Miyamaru, D. (2008). Tendências na Evolução dos Sistemas de Gerenciamento de Tráfego Aéreo no Brasil. *VII Simpósio de Transporte Aéreo (SITRAER)*, 808-892. Rio de Janeiro, Brasil (26 de novembro a 28 de novembro).

[184] Palacios, E., Johnson, M. (2013). 4D BADA-Based Trajectory Generator and 3D Guidance Algorithm. *3er Congreso Nacional y 1er Congreso Internacional de Ciencia y Tecnología Aeroespacial*, 1-4. Guadalajara, Jalisco, México (18 de novembro a 22 de novembro).

[185] Bo, W., Kharchenko, V., Chynchenko, Y. (2015). Estimation of Effect of Uncertainty Factors on Safety of Air Traffic Flows in Terminal Control Areas. *National Aviation University* 65(4), 22-27.

[186] Thipphavong, J., Farley, T., Walker, C., Bagasol, L. (2007). A Method for Rapid Prototyping and Benchmarking of Arrival Sequencing and Scheduling Algorithms. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 7th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-12. Belfast, Irlanda do Norte (18 de setembro a 20 de setembro).

[187] Crespo, A., Weigang, L., Barros, A. (2012). Reinforcement Learning Agents to Tactical Air Traffic Flow Management. *International Journal of Aviation Management* 1(3), 145-161.

[188] Wanke, C. (2005). En Route Air Traffic Flow Management in the U.S.: Current Practice and New Concepts. *German-American Frontiers of Engineering Symposium*, 1-2. Potsdam, Alemanha (05 de maio a 07 de maio).

[189] Lee, K., Pawlak, W., Sanford, B., Slattery, R. (1995). Improved Navigational Technology and Air Traffic Control: A Description of Controller Coordination and Workload. *8th International Symposium on Aviation Psychology (ISAP)*, 1-6. Columbus, Ohio, EUA (24 de abril a 27 de abril).

[190] Sullivan, B., Malsom, S. (2002). Development of a Real-Time Virtual Airspace Simulation Capability for Air Traffic Management Research. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Modeling and Simulation Technologies Conference and Exhibit*, 1-6. Monterey, Califórnia, EUA (05 de agosto a 08 de agosto).

[191] Green, S., Vivona, R. (2001). En Route Descent Advisor Concept for Arrival Metering. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC) and Exhibit*, 1-14. Montreal, Quebec, Canadá (06 de agosto a 09 de agosto).

[192] Farley, T., Kupfer, M., Erzberger, H. (2007). Automated Conflict Resolution: A Simulation Evaluation Under High Demand Including Merging Arrivals. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 7th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-8. Belfast, Irlanda do Norte (18 de setembro a 20 de setembro).

[193] Erzberger, H., McNally, D., Foster, M., Chiu, D., Stassart, P. (2001). Direct-To Tool for En Route Controllers. Em: Bianco, L., et al. *New Concepts and Methods in Air Traffic Management. Transportation Analysis*, 179-198. Springer Nature.

[194] Sanford, B., Smith, N., Lee, K., Green, S. (1999). Decision-Aiding Automation for the En-Route Controller: A Human Factors Field Evaluation. *10th International Symposium on Aviation Psychology (ISAP)*, 1-6. Columbus, Ohio, EUA (03 de maio a 06 de maio).

[195] Atkins, S. (2002). Estimating Departure Queues to Study Runway Efficiency. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 25(4), 651-688.

[196] Allaert, G., Craeynest, D., Waroquiers, P. (2003). European Air Traffic Flow Management: Porting a Large Application to GNU/Linux. *SigAda '03: Proceedings of the 2003 Annual ACM SIGAda International Conference on Ada: The Engineering of Correct and Reliable Software for Real-Time & Distributed Systems Using Ada and Related Technologies*, 29-37. San Diego, Califórnia, EUA (07 de dezembro a 11 de dezembro).

[197] Stell, L. (2010). Analysis of Flight Management System Predictions of Idle-Thrust Descents. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) 29th Digital Avionics Systems Conference*, 1-15. Salt Lake City, Utah, EUA (03 de outubro a 07 de outubro).

[198] Gianazza, D. (2007). Airspace Configuration Using Air Traffic Complexity Metrics. *7th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-11. Barcelona, Espanha (02 de julho a 05 de julho).

[199] Quinn, C., Robinson III, E. (2000). A Human Factors Evaluation of Active Final Approach Spacing Tool Concepts. *3rd USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-11. Nápoles, Itália (13 de junho a 16 de junho).

[200] Paielli, R. (2011). Evaluation of Tactical Conflict Resolution Algorithms for Enroute Airspace. *Journal of Aircraft* 48(1), 324-338.

[201] Cone, A., Chin, D. (2009). Sensitivity of an Automated Separation Assurance Tool to Trajectory Uncertainty. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 9th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-13. Hilton Head, Carolina do Sul, EUA (21 de setembro a 23 de setembro).

[202] Zelinski, S., Romery, T. (2004). An Airspace Concept Evaluation System Characterization of National Airspace System Delay. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-7. Chicago, Illinois, EUA (20 de setembro a 22 de setembro).

[203] Coppenbarger, R. (1999). Climb Trajectory Prediction Enhancement Using Airline Flight-Planning Information. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-11. Portland, Óregon, EUA (09 de agosto a 11 de agosto).

[204] Lee, K., Sanford, B. (1998). The Passive Final Approach Spacing Tool (pFAST) Human Factors Operational Assessment. *2nd USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-11. Orlando, Flórida, EUA (01 de outubro a 04 de outubro).

[205] Stell, L. (2011). Prediction of Top of Descent Location for Idle-thrust Descents. *9th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Berlim, Alemanha (14 de junho a 17 de junho).

[206] Paielli, R., Erzberger, H. (2009). Tactical Conflict Alerting Aid for Air Traffic Controllers. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 32(1), 184-202.

[207] European Organisation for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL) (1997). *TOSCA-II Work Package 7 – Airport Capacity Enhancement – Interim Report*.

[208] Mueller, K., Robinson III, J. (1998). Final Approach Spacing Tool (FAST) – Velocity Accuracy Performance Analysis. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1711-1721. Boston, Massachusetts, EUA (10 de agosto a 12 de agosto).

[209] Cate, K. (2013). Challenges in Achieving Trajectory-Based Operations. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 51st Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition*, 1-6. Grapevine (Dallas/Ft. Worth Region), Texas, EUA (07 de janeiro a 10 de janeiro).

[210] Welch, J., Andrews, J. (2001). Assessing Delay Benefits of the Final Approach Spacing Tool (FAST). *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-9. Montreal, Quebec, Canadá (06 de agosto a 09 de agosto).

[211] Paielli, R., Erzberger, H. (2004). Improved Conflict Detection for Reducing Operational Errors in Air Traffic Control. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-18. Chicago, Illinois, EUA (20 de setembro a 22 de setembro).

[212] Verma, S., Tang, H., Ballinger, D., Kozon, T., Farrahi, A. (2012). Initial Evaluation of a Conflict Detection Tool in the Terminal Area. *Advances in Human Aspects of Aviation*. 1ª Edição. CRC Press.

[213] Isaacson, D., Robinson III, J. (2001). A Knowledge-Based Conflict Resolution Algorithm for Terminal Area Air Traffic Control Advisory Generation. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC) and Exhibit*, 1-11. Montreal, Quebec, Canadá (06 de agosto a 09 de agosto).

[214] Brinton, C., Wood, B., Engelland, S. (2008). Microscopic Analysis of Airport Surface Sequencing. *26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS) and American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 8th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-12. Anchorage, Alasca, EUA (14 de setembro a 19 de setembro).

[215] Abramson, M., Refai, M., Santiago, C. (2017). The Generic Resolution Advisor and Conflict Evaluator (GRACE) for Detect-And-Avoid (DAA) Systems. *Aeronautical Sciences (ICAS) and American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 17th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-13. Denver, Colorado, EUA (05 de junho a 09 de junho).

[216] Klein, A., Kopardekar, P., Rodgers, M., Kaing, H. (2007). "Airspace Playbook": Dynamic Airspace Reallocation Coordinated with the National Severe Weather Playbook. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 7th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-8. Belfast, Irlanda do Norte (18 de setembro a 20 de setembro).

[217] Lauderdale, T., Santiago, C., Pankok, C. (2010). A Computer Simulation of the System-Wide Effects of Parallel-Offset Route Maneuvers. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 8163-8171. Toronto, Ontário, Canadá (05 de agosto a 08 de agosto).

[218] Hayashi, M., Lopez, J. (2013). Effects of Airport Tower Controller Decision-Support Tool on Controllers' Head-Up Time. *17th International Symposium on Aviation Psychology (ISAP)*, 293-298. Dayton, Ohio, EUA (06 de maio a 09 de maio).

[219] Andrews, J., Robinson III, J. (2001). Radar-Based Analysis of the Efficiency of Runway Use. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-17. Montreal, Quebec, Canadá (06 de agosto a 09 de agosto).

[220] Che, N., Sridhary, B. (2008). Estimation of Air Traffic Delay Using Three Dimensional Weather Information. *26th Congress of International Council of the Aeronautical Sciences (ICAS), 8th American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-9. Anchorage, Alasca, EUA (14 de setembro a 19 de setembro).

[221] Mueller, K., Bortins, R., Schleicher, D., Sweet, D. (2004). Effect of Uncertainty on En Route Descent Advisor (EDA) Predictions. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 4th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-18. Chicago, Illinois, EUA (20 de setembro a 22 de setembro).

[222] Todorov, T., Petrov, P. (2017). A Study of Sector Configurations Capacity for Air Traffic Service. *MATEC Web of Conferences, Vol. 133, 9th International Scientific Conference on Aeronautics, Automotive and Railway Engineering and Technologies*, 150-153. Sozopol, Bulgária (11 de setembro a 13 de setembro).

[223] Tang, H., Robinson, J., Denery, D. (2011). Tactical Conflict Detection in Terminal Airspace. *Journal of Guidance, Control and Dynamics* 34(2), 403-417.

[224] Verma, S., Lozito, S., Kozon, T., Ballinger, D., Resnick, H. (2009). Procedures for Off-Nominal Cases: Very Closely Spaced Parallel Runway Operations. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE), 27th American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1-11. St. Paul, Minnesota, EUA (26 de outubro a 30 de outubro).

[225] Fota, N., Kaâniche, M., Kanoun, K., Peytavin, A. (1996). Safety Analysis and Evaluation of an Air Traffic Control Computing System. *15th International Conference on Computer Safety, Reliability and Security (SAFECOMP)*, 219-229. Viena, Áustria (23 de outubro a 26 de outubro).

[226] Bowe, A., Santiago, C. (2012). An Approach for Balancing Delay and Fuel Burn in Separation Assurance Automation. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 12th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-10. Indianapolis, Indiana, EUA (17 de setembro a 19 de setembro).

[227] Windhorst, R., Refai, M., Karahan, S. (2009). Convective Weather Avoidance with Uncertain Weather Forecasts. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE), 28th American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1-10. Orlando, Flórida, EUA (23 de outubro a 29 de outubro).

[228] Wu, M., Sadovsky, A. (2015). Minimum-Cost Aircraft Descent Trajectories with a Constrained Altitude Profile. *National Aeronautics and Space Administration (NASA) Research Document NASA/TM-2015-218734*.

[229] Arneson, H. (2015). Initial Analysis of and Predictive Model Development for Weather Reroute Advisory Use. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 15th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-15. Dallas, Texas, EUA (22 de junho a 26 de junho).

[230] Hayashi, M., Hoang, T., Jung, Y., Gupta, G., Malik, W., Dulchinos, V. (2013). Usability Evaluation of the Spot and Runway Departure Advisor (SARDA) Concept in a Dallas/Fort Worth Airport Tower Simulation. *13th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-10. Chicago, Illinois, EUA (10 de julho a 13 de julho).

[231] Lee, A., Bouyssounouse, X., Murphy, J. (2010). The Trajectory Synthesizer Generalized Profile Interface. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 10th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-13. Fort Worth, Texas, EUA (13 de setembro a 15 de setembro).

[232] Martin, L., Swenson, H., Sadovsky, A., Thipphavong, J., Chen, L., Seo, A. (2011). Effects of Scheduling and Spacing Tools on Controllers' Performance and Perceptions of their Workload. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE), 30th American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1-14. Seatle, Washignton DC, EUA (16 de outubro a 20 de outubro).

[233] Bilimoria, K., Hayashi, M., Sheth, K. (2017). Subject Matter Expert Evaluation of Multi-Flight Common Route Advisories. *Aeronautical Sciences (ICAS) and American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 17th Aviation Technology, Integration and Operations (ATIO) Forum*, 1-10. Denver, Colorado, EUA (05 de junho a 09 de junho).

[234] Xue, M., Zelinski, S. (2016). Route Optimization for Offloading Congested Meter Fixes. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE), 35th American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Digital Avionics Systems Conference (DASC)*, 1-8. Sacramento, Califórnia, EUA (25 de setembro a 29 de setembro).

[235] Windhorst, R. (2012). Towards a Fast-time Simulation Analysis of Benefits of the Spot and Runway Departure Advisor. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) Guidance, Navigation and Control Conference (GNC)*, 1-13. Minneapolis, Minnesota, EUA (13 de agosto a 16 de agosto).

[236] Sheth, K., Clymer, A., Morando, A., Shih, F. (2016). Analysis of Multi-Flight Common Routes for Traffic Flow Management. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 16th Aviation Technology, Integration, and Operations (ATIO) Conference*, 1-13. Washington, Washington DC, EUA (13 de junho a 17 de junho).

[237] Channamaraiah, V., Ashok, B., Naiju, C. (2014). Markov Based Exploration for Aircraft Design Time Compression. *Asian Research Publishing Network (ARPN) Journal of Engineering and Applied Sciences* 9(3), 233-236.

[238] Ching, W., Huang, X., Ng, M., Siu, T. (2013). *Markov Chains - Models, Algorithms and Applications*, 2ª Edição. Springer.

[239] Ching, W., Fung, E., Ng, M. (2002). A Multivariate Markov Chain Model for Categorical Data Sequences and its Applications in Demand Predictions. *Institute of Mathematics and its Applications (IMA) Journal of Management Mathematics* 13(3), 187-199.

[240] Zakaria, N., Othman, M., Sokkalingam, R., Daud, H., Abdullah, L., Kadir, E. (2019). Markov Chain Model Development for Forecasting Air Pollution Index of Miri, Sarawak. *Sustainability* 11(19), 5190-5201.

[241] Silva, T., Júnior, V. (s.d). *Cadeias de Markov: Conceitos e Aplicações em Modelos de Difusão de Informação*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal de Goiás.

[242] Guo, S., Zhang, Z., Wang, L., Guo, Y. (2007). The Gray-Markov Model for Forecasting Air Traffic Flow Based on Residual Correction. *Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS)*, Vol. 6, 1-9. Dalian, China (24 de setembro a 27 de setembro).

[243] Simão, C., Bousson, K. (2025). Numerical Applications of Markov Chains in the Optimization and Forecasting of the Lisbon TMA Capacity. *International Review of Aerospace Engineering* (I.RE.AS.E) [Aceite para ser publicado na International Review of Aerospace Engineering, vol.18, n.1). Revista indexada pelo Scopus. (CiteScore: 3.6; Q2 na área "Aerospace Engineering"].

[244] Fenton, N., Neil, M. (2013). *Risk Assessment and Decision Analysis with Bayesian Networks*. CRC Press.

[245] Bertsekas, D., Tsitsiklis, J. (2002). *Introduction to Probability*, 2ª Edição. Athena Scientific, Belmont, Massachusetts.

[246] Golmakani, A., Silva, A., Freire, E., Barbosa, M., Carvalho, P., Alves, V. (2014). Cadeias de Markov. *VII Bienal da Sociedade Brasileira de Matemática – Universidade Federal de Alagoas*, 1-32. Maceió, Alagoas, Brasil (02 de novembro a 06 de novembro).

[247] Tolver, A. (2016). *An Introduction to Markov Chains – Lecture Notes for Stochastic Processes*. Department of Mathematical Sciences. University of Copenhagen.

[248] Espindola, L. (2009). *Um Estudo sobre Modelos Ocultos de Markov HMM – Hidden Markov Model*. Trabalho Final de Pós-Graduação. Faculdade de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul.

[249] Li, X., Parizeau, M., Plamondon, R. (2000). Training Hidden Markov Models with Multiple Observations – A Combinatorial Method. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence (PAMI)* 22(4), 371-377.

[250] Keyghobadi, H., Seyedin, A. (2017). Abnormality Detection in a Landing Operation Using Hidden Markov Model. *Journal of Computer & Robotics* 10(1), 31-37.

[251] Rabiner, L. R., Juang, B. H. (1986). An Introduction to Hidden Markov Models. *IEEE ASSP Magazine* 3(1), 4-16.

[252] Fenton, N., Neil, M. (2007). *Managing Risk in the Modern World – Applications of Bayesian Networks*. London Mathematical Society Report.

[253] Delsole, T. (2000). A Fundamental Limitation of Markov Models. *Journal of the Atmospheric Sciences* 57(13), 2158-2168.

[254] Nilim, A., Ghaoui, L., Hansenz, M., Duong, V. (2003). Trajectory-Based Air Traffic Management (TB-ATM) Under Weather Uncertainty. *5th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-11. Budapeste, Hungria (23 de junho a 27 de junho).

[255] Belov, N. (2005). On Predicting User Intent. *American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA) 20th National Conference on Artificial Intelligence*, Vol. 4, 1592-1593. Pittsburgh, Pensilvânia, EUA (09 de julho a 13 de julho).

[256] Hu, J., Prandini, M. (2003). Aircraft Conflict Detection: A Method for Computing the Probability of Conflict Based on Markov Chain Approximation. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE), European Control Conference (ECC)*, 1-6. Cambridge, Reino Unido (01 de setembro a 04 de setembro).

[257] Nilim, A., Ghaoui, L., Duong, V. (2003). Multi-Aircraft Routing and Traffic Flow Management Under Uncertainty. *5th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-11. Budapeste, Hungria (23 de junho a 27 de junho).

[258] Nilim, A., Ghaoui, L., Duong, V. (2002). Robust Dynamic Routing of Aircraft Under Uncertainty. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) 21st Digital Avionics Systems Conference*, 1-13. Irvine, Califórnia, EUA (27 de outubro a 30 de outubro).

[259] Albasman, M., Hu, J. (2010). Probability of Conflict Analysis of 3D Aircraft Flight Based on Two-Level Markov Chain Approximation Approach. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, 608-613. Chicaco, Illinois, EUA (10 de abril a 12 de abril).

[260] Zhou, Y. (2011). *Simulation and Performance Analysis of Strategic Air Traffic Management Under Weather Uncertainty*. Dissertação de Mestrado. University of North Texas.

[261] Mehta, V., Campbell, S., Underhill, N., DeLaura, R., Chandra, K. (2013). Markov Model for Benefits Analysis of Air Traffic Technologies. *10th USA/Europe Air Traffic Management (ATM) Research and Development Seminar*, 1-9. Chicago, Illinois, EUA (10 de junho a 13 de junho).

[262] Gelhausen, M. (2013). A Model of Airport Capacity Expansion Delays. *Air Transport Research Society (ATRS) World Conference*, 1-18. Bérgamo, Itália (26 de junho a 29 de junho).

[263] Simaiakis, I., Balakrishnan, H. (2012). Dynamic Control of Airport Departures: Algorithm Development and Field Evaluation. *Institute of Eletrical and Electronics Engineers (IEEE) American Control Conference (ACC)*, 285-295. Montreal, Quebec, Canadá (27 de junho a 29 de junho).

[264] Yang, J., Zhang, J. (2011). Application Research of Markov in Flight Control System Safety Analysis. *2nd International Symposium on Aircraft Airworthiness (ISAA)*, 515-520. Pequim, China (26 de outubro a 28 de outubro).

[265] Wang, X., Liu, W. (2012). Research on Air Traffic Control Automatic System Software Reliability Based on Markov Chain. *2nd International Conference on Applied Physics and Industrial Engineering (ICAPMS)*, Physics Procedia, Vol.24, 1601-1606. Paris, França (28 de abril a 29 de abril).

[266] Balachandran, S., Atkins, E. (2017). Markov Decision Process Framework for Flight Safety Assessment and Management. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics* 40(4), 817-830.

[267] Creately (2021). Construção dos Grafos. Disponível em: https://creately.com/ [Acedido em setembro de 2021].

[268] FlightAware (2019). Rastreio de Voos. Disponível em: https://www.flightaware.com [Acedido em fevereiro de 2019].

[269] Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA) (2019). *Boletim Climatológico Annual Portugal Continental 2019*.

[270] Simão, C., Bousson, K. (2023). Markov Chain Model Development for Forecasting the Lisbon TMA Capacity. Em: Karakoc, T.H., et al. *Novel Techniques in Maintenance, Repair, and Overhaul*. Proceedings of the International Symposium on Aviation Technology, MRO, and Operations 2022. Chapter 42, 335-341. Sustainable Aviation. Springer Nature.

[270] Simão, C., Bousson, K. (2022). Markov Chain Model Development for Forecasting the Lisbon TMA Capacity. *International Symposium on Aircraft Technology (ISATECH'22), MRO & Operations*. Belgrado, Sérvia [Realizado de forma virtual].

[271] Simão, C., Bousson, K. (2024). Markovian Model for Forecasting the Lisbon Terminal Maneuvering Area (TMA) Capacity. *International Journal of Sustainable Aviation* 10(2), 142-158.

Anexos

Salienta-se que a presente secção deste trabalho de investigação é constituída por três anexos, encontrando-se seguidamente uma breve apresentação de cada um deles, destacando a sua relevância e a sua pertinência para o desenvolvimento deste trabalho de investigação:

- **Anexo A – Outras Medidas e Ferramentas:** No presente Anexo serão apresentadas, sob a forma de listagem, todas as medidas e/ou ferramentas úteis para a gestão do fluxo de tráfego aéreo que foram identificadas e recolhidas durante o processo de revisão bibliográfica. Tendo em conta a sua variedade e o facto de não ser possível estudá-las individualmente ao longo do trabalho de investigação desenvolvido, as mesmas foram reunidas e apresentadas por ordem alfabética com o intuito de demonstrarem os esforços contínuos que têm sido executados para a criação e implementação de TMIs cada vez mais eficazes e úteis para a complexa tarefa da gestão adequada do fluxo de tráfego aéreo;

- **Anexo B – Dados Iniciais das Redes Dinâmicas:** No presente Anexo serão apresentados, sob a forma de tabelas, os dados imprescindíveis para a criação e a respetiva análise de cada uma das nove redes dinâmicas desenvolvidas no presente trabalho de investigação. Desta forma, será possível antever a extensão e as particularidades dos dados utilizados para cada uma dessas redes dinâmicas, sendo esta informação bastante útil para a correta interpretação, análise e discussão presente no Capítulo 5 deste trabalho de investigação;

- **Anexo C – Tipos de Aeronaves:** No presente Anexo serão apresentados, sob a forma de listagem, todos os modelos de aeronaves contemplados no vasto conjunto de dados utilizados para a criação das nove redes dinâmicas desenvolvidas no presente trabalho de investigação. Desta forma, será possível verificar a vasta variedade de aeronaves que frequentam a TMA de Lisboa, evidenciando não só a elevada procura presenciada nesta infraestrutura aeroportuária como também a complexidade da correta gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Folha em branco

Anexo A

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
3DPAM	Three-Dimensional Path Arrival Management	É uma ferramenta que permite que as aeronaves que pretendem aterrar em uma determinada infraestrutura aeroportuária possam efetuar descidas otimizadas e calculadas através do Flight Management System (FMS), independentemente do estado de congestionamento dessa TMA. Esta ferramenta deverá prever com precisão as trajetórias de descida das aeronaves de forma a evitar a ocorrência de conflitos e salientando a importância da consciência situacional dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo.
A-SMGCS	Advanced Surface Movement, Guidance and Control System	É um sistema que tem como função fornecer informações relativas à deteção de aeronaves na superfície das infraestruturas aeroportuárias. Para além de detetar o seu movimento, também deverá ser capaz de identificá-las de forma adequada e, em simultâneo, controlar e identificar todos os veículos que possam estar a executar as suas tarefas na mesma superfície.
AAC	Advanced Airspace Concept	É uma ferramenta constituída por duas fases com o intuito de garantir a separação entre as aeronaves e uma fase relativa aos sistemas de anticolisão, como por exemplo, o Airborne Collision Avoidance System (ACAS).
AACR	Automated Airborne Congestion Resolution	É uma ferramenta que tem a capacidade de permitir que os(as) agentes modelem e automatizem a implementação de medidas que combatam e/ou minimizem o impacto de variáveis propícias para a ocorrência de conflitos entre as aeronaves.
AACS	Automated Airspace Computer System	É um sistema que gera avisos de forma a prevenir a ocorrência de conflitos entre as aeronaves, tendo em conta as trajetórias realizadas pelas mesmas.
AARP	Automated Airspace Restriction Planner	É uma ferramenta que integra o Airspace Restriction Planner (ARP) e o FACET, permitindo a realização de uma análise e a respetiva simulação da implementação de estratégias de restrição do espaço aéreo.
AATMS	Advanced Air Traffic Management System	É um sistema projetado com o intuito de permitir que os(as) gestores(as) de tráfego aéreo identifiquem com antecedência a necessidade da sua intervenção devido à verificação de fatores externos que possam condicionar o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.
AATT	Advanced Air Transportation Technologies	É um programa criado pela NASA que se encontra focado no desenvolvimento de conceitos operacionais e nas ferramentas imprescindíveis para a tomada de decisão dos(as) agentes, assim como nos procedimentos e nos sistemas necessários para maximizarem a segurança das operações de tráfego aéreo.
ABNA	Airspace BottleNeck Analyzer	É um modelo de sequenciamento de aeronaves na TMA, tendo como principal objetivo analisar as situações de maior congestionamento, medindo os atrasos decorrentes destas situações.
ACES	Airspace Concept Evaluation System	É um sistema cuja aplicação se restringe ao espaço aéreo americano e às suas infraestruturas aeroportuárias, permitindo simular, com um elevado nível de fiabilidade, as operações de tráfego aéreo. Através da sua implementação, é possível perceber o seu impacto na capacidade das TMAs em inúmeros momentos do dia, evitando possíveis situações de congestionamento. Esta minimização do impacto é conseguida através da previsão de trajetórias e da capacidade de antecipação de conflitos entre as aeronaves.
ACIM	Air Carrier Investment Model	É um modelo que faz parte do Aviation Systems Analysis Capability (ASAC) e foi criado pela NASA com o intuito de gerar as previsões de procura tendo em conta alguns fatores que afetam a procura e a oferta no setor, nomeadamente, as condições económicas e as características operacionais das companhias de transporte aéreo. Essas estimativas poderão ser bastante úteis para que as companhias de transporte aéreo reconheçam o potencial de crescimento, a necessidade de investimento e a alteração do valor dos combustíveis.
ACM	Airfield Capacity Model	É um modelo que calcula a estimativa da capacidade na superfície da infraestrutura aeroportuária como uma função da mistura da procura projetada e das condições meteorológicas previstas.
ADM	Aggregate Demand Model	É um modelo que tem a capacidade de prever a quantidade de picos de voos simultâneos em cada TMA, dentro de um período de tempo de quinze minutos.
ADSIM	Airfield Delay SImulation Model	É um modelo de simulação de eventos discretos que tem a capacidade de calcular o tempo de voo das aeronaves e os atrasos acumulados.
aFAST	Active Final Approach Spacing Tool	É uma ferramenta que permite gerar alertas sobre o posicionamento e a velocidade das aeronaves, auxiliando o seu sequenciamento e evitando a ocorrência de conflitos ao longo das trajetórias. Comparativamente ao Passive Final Approach Spacing Tool (pFAST), pretende atribuir um espaçamento mais preciso no sequenciamento das aeronaves que se aproximam das infraestruturas aeroportuárias. O aFAST é uma versão refinada e mais complexa pois tem a capacidade de coordenar um maior número de tarefas que têm impacto direto no normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
AFT	Airport Flow Tool	É uma ferramenta utilizada para monitorizar a relação entre a procura e a capacidade disponível em cada momento, implementando, sempre que necessário, a TMI mais eficiente para resolver a situação de desequilíbrio detetada.
AIM	Aeronautical Information Management	É um projeto de longo prazo que prevê a uniformização do formato e do conteúdo das informações e dos dados aeronáuticas(os), sendo que o resultado deverá estar de acordo com os padrões, as fontes e os(as) utilizadores(as) de informações aeronáuticas internacionais.
Airsecoma Desktop	---	É uma ferramenta de simulação e análise que trabalha de forma contínua, tendo como principal objetivo gerar esquemas de configuração de TMAs para lidar com a procura verificada e com os recursos humanos existentes.
AirTop	---	É uma ferramenta que permite efetuar simulações rápidas envolvendo diferentes agentes, sendo que estas simulações englobam as diferentes fases de voo e têm a capacidade de avaliar as TMIs implementadas e alguns parâmetros, como por exemplo, a capacidade a cada momento, os atrasos imputados, a eficiência de cada voo, a segurança das operações e a carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo.
AM	Arrival Manager	É uma ferramenta de planeamento com o objetivo de auxiliar os(as) controladores(as) de tráfego aéreo na orientação de aeronaves, independentemente das mesmas se encontrarem equipadas ou não com as tecnologias mais avançadas do momento. Desta forma, é possível garantir um fluxo de tráfego aéreo seguro, eficiente e económico.
AMAN	Arrival Management AutomatioNs	É uma ferramenta que permite efetuar o controlo das autorizações de aterragens e, dessa forma, facilita e automatiza o sequenciamento das aeronaves. Um dos principais benefícios da implementação desta ferramenta é a diminuição da carga de trabalho dos controladores(as) de tráfego aéreo devido à otimização da capacidade das TMAs.
AMOC	ATFM MOdeling Capability	É uma ferramenta que tem como principal benefício a alocação de *slots* de forma a evitar a sobrelotação de determinada infraestrutura aeroportuária, assim como a redução dos atrasos associados a situações de congestionamento e ao excesso de procura para a TMA em análise. De forma simplificada, representa a combinação entre o National Airspace System Performance Analysis Capability (NASPAC) e o CASA, usufruindo dos benefícios operacionais de ambos.
AND	Approximate Network Delays	É uma ferramenta que representa uma extensão mais complexa do DELAYS, sendo que, neste caso, é aplicado a uma rede de TMAs e tem a capacidade de calcular o impacto do atraso em um determinado "nó" da rede para a restante.
ARC 2000	Automatic Radar Control 2000	É uma ferramenta criada pela Organização Europeia para a Segurança da Navegação Aérea (OESNA), designada em inglês por European Organization for the Safety of Air Navigation (EUROCONTROL), com o intuito de gerir e controlar o fluxo de tráfego aéreo, utilizando tecnologia de ponta. O principal objetivo baseia-se na necessidade de avaliar a viabilidade da garantia da separação automatizada das aeronaves. Desta forma, será possível demonstrar a eficácia e a eficiência de um nível cada vez maior da automatização no setor.
ARMS	Aviation Resource Management System	É um sistema baseado na interligação das atividades desenvolvidas pelos(as) agentes que têm como objetivo otimizarem a alocação dos recursos existentes. De forma a simplificar o seu procedimento, cada agente fica "responsável" pela alocação de determinado recurso, tornando o processo mais rápido desde que seja garantida a cooperação entre todos(as).
ARP	Airspace Restriction Planner	É uma ferramenta criada pela NASA e que funciona em conjunto com o FACET, tendo como intuito auxiliar os(as) controladores(as) de tráfego aéreo na gestão do equilíbrio entre a procura e a oferta. A sua metodologia baseia-se na previsão para a gestão de situações de congestionamento nas TMAs.
ASAS	Airborne Separation Assistance System	É um sistema que permitirá uma diminuição significativa da carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo através da transferência de parte das suas responsabilidades diretamente para os(as) pilotos. O principal objetivo é salvaguardar o distanciamento adequado entre as aeronaves, tendo como consequência o aumento da capacidade do espaço aéreo quando a atribuição da separação é efetuada de forma otimizada.
ASCENT	ATFM System Concept Evaluator for New Technologies	É um sistema que foi desenvolvido e implementado com o intuito de avaliar o impacto em todo o sistema de gestão do fluxo de tráfego aéreo relativamente aos(às) novos(as) procedimentos, tecnologias e melhorias nas TMAs. Com base nestas informações são criados diversos cenários com o intuito de aferirem o impacto na relação entre a procura e a capacidade disponível. Comparativamente a outras ferramentas, é possível afirmar que o ASCENT tem uma qualidade superior ao FLOWSIM, ao NASPAC e ao TMAC.
ASEP	Airborne Self sEParation	É uma ferramenta que procura transferir, na totalidade, as responsabilidades das decisões tomadas em voo para os(as) pilotos. Isto significa, por exemplo, que estes(as), dentro de um determinado setor aéreo, são responsáveis pela garantia da separação com as demais aeronaves.
ASIM	Airspace SIMulation	É uma ferramenta que permite avaliar a complexidade do espaço aéreo, tendo uma maior aplicabilidade no contexto do espaço aéreo europeu.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
ASMT	Automatic Safety Monitoring Tool	É uma ferramenta construída com base no conjunto de dados compartilhados entre os(as) agentes, permitindo dessa forma monitorizar o fluxo de tráfego aéreo e detetar discrepâncias, de forma atempada, que podem colocar em causa a segurança de todos(as).
ASP	Arrival Sequencing Program	É um programa que tem como intenção melhorar o fluxo de tráfego aéreo relativamente às aterragens em uma determinada infraestrutura aeroportuária. Este objetivo é alcançado através da atribuição de um horário pré-definido para a aterragem de uma determinada aeronave.
ASRS	Aviation Safety Reporting System	É um sistema cuja principal função é reunir todas as informações enviadas pelos(as) agentes, permitindo um fácil acesso para verificar a existência de discrepâncias no que diz respeito à segurança do normal funcionamento das operações de tráfego aéreo e auxiliando no seu planeamento.
ATAC	Airspace Traffic dAta Capture	É uma ferramenta que gera dados e informações que permitem criar dois tipos de "ficheiros", nomeadamente, um referente a trajetórias e outro a cruzamentos. Estes dados são gerados ao longo das operações de tráfego aéreo arquivadas e, como tal, representam uma fonte preciosa para futuras análises e para a identificação de situações e/ou procedimentos suscetíveis de melhorias.
ATFCMS	Air Traffic Flow and Capacity Management Strategy	É um sistema que tem como propósito demonstrar que as TMIs desenvolvidas deverão preocupar-se com a procura e com a oferta disponibilizada pelas TMAs.
ATIDS	Airport Surface Target IDentification System	É um sistema projetado pelo FAA com o intuito de desenvolver ajudas para a vigilância das superfícies das infraestruturas aeroportuárias, relativas a técnicas de comunicação entre os(as) agentes e na automatização do fornecimento de alertas sobre o aparecimento de algum tipo de restrição.
ATMS	Advanced Traffic Management System	É um sistema que foi projetado para permitir que os(as) gestores(as) de tráfego aéreo identifiquem, antecipadamente, as condições das rotas das aeronaves e/ou as condições dos terminais das infraestruturas aeroportuárias, como por exemplo, as condições meteorológicas adversas. Após a correta identificação destas condições, é possível automatizar a implementação de TMIs de forma a minimizar e/ou evitar o impacto das mesmas.
AVOSS	Advanced VOrtex Spacing System	É um sistema que tem como principal objetivo aplicar padrões de separação dinâmica entre pares de aeronaves através da utilização de um algoritmo de previsão e de sensores de deteção de vórtice em tempo real. Para conseguir atingir este objetivo são utilizadas previsões atuais e de curto prazo do estado das condições nos corredores de aproximação e de saída da TMA.
AwSim	---	É um sistema que representa um conjunto de ferramentas que permitem efetuar a simulação de trajetórias de aeronaves e a previsão de conflitos entre elas. Este sistema foi desenvolvido para quantificar, através da realização de simulações e análises de dados, a resposta adequada para cada problema que possa surgir e afetar, negativamente, o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo. Desta forma, é possível medir as mudanças macroscópicas e antecipar o impacto que poderão ter na segurança.
BADA	Base of Aircraft DAta	É um modelo que tem como objetivo evitar a ocorrência de colisões entre as aeronaves. Funciona devido às informações recolhidas e fornecidas pela EUROCONTROL, que auxiliam na simulação e padronização das operações de tráfego aéreo no espaço aéreo europeu. Representa um modelo aerodinâmico em que as principais variáveis englobadas se relacionam diretamente com o desempenho das aeronaves e, dessa forma, o algoritmo permite pré-definir o plano de voo adequado. Esta ferramenta é bastante útil no novo contexto da gestão do fluxo de tráfego aéreo devido ao aumento da utilização de Veículos Aéreos Não Tripulado (VANT), designados em inglês por Unmanned Aerial Vehicles (UAV).
BDT	Banc De Test	É uma ferramenta de simulação que foi desenvolvida pelo Centro de Estudos de Navegação Aérea (CENA), designado em francês por Centre d'Etudes de la Navigation Aèrienne (CENA), que permite gerar trajetórias de aeronaves de forma a testar a viabilidade de algoritmos automatizados para a resolução de conflitos entre aeronaves.
CADEO	Controller Assistance for DEparture Optimization	É uma ferramenta criada após os estudos desenvolvidos pelo Departure Management AutomatioNs (DMAN), tendo como objetivo otimizar a sequência de descolagens. Uma das principais características benéficas desta ferramenta é o facto de poder ser adaptada a diferentes infraestruturas aeroportuárias, tendo em consideração o número máximo de variáveis que possam ter algum impacto na descolagem de cada aeronave, como por exemplo, as condições meteorológicas adversas. Através do sequenciamento desta fase de voo é possível otimizar e rentabilizar a melhor forma possível de utilização das pistas disponíveis em cada infraestrutura aeroportuária, assim como efetuar uma alocação eficiente dos *slots* disponíveis e tentar minimizar os atrasos nas filas de espera para a autorização de descolagem.
CAISS	Common ATM Information State Space	É uma ferramenta que fornece uma solução apropriada para o armazenamento e a recuperação de grandes quantidades de dados e de informações imprescindíveis para a gestão do fluxo de tráfego aéreo.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
CAP	Collaborative Arrival Planning	É um projeto criado pela NASA que aborda algumas questões preliminares relativas aos processos de pesquisa elaborados sobre a implementação de melhorias na colaboração da gestão do tráfego aéreo e a influência da participação das companhias de transporte aéreo nessa cooperação.
CAPAN	CAPacity ANalyzer	É uma ferramenta desenvolvida pela EUROCONTROL que utiliza um modelo de espaço aéreo no qual a carga de trabalho dos(as) agentes é gerada de acordo com o nível de fluxo de tráfego aéreo verificado. A avaliação efetuada por esta ferramenta permite percecionar se existe um excesso de trabalho e alguma situação em particular que propicie um aumento significativo e inesperado.
Capping	---	É um método semelhante ao AH com a diferença de que esta espera se realiza abaixo do nível de voo pretendido por cada aeronave, tendo a duração correspondente ao período de tempo mínimo necessário até a mesma obter a autorização para elevar o seu nível de voo novamente. Tendo em conta as suas particularidades, poderá ser implementada em qualquer fase de voo, dependendo apenas da análise da situação em cada momento, sendo frequentemente utilizada quando ocorrem situações inesperadas devido às condições meteorológicas adversas e/ou aos congestionamentos atípicos em determinado nível de voo. Através da sua implementação é possível evitar que determinada aeronave entre em um determinado setor aéreo com um nível de congestionamento bastante elevado e permite que os intervalos imputados a cada uma dessas aeronaves se estabilizem em valores relativamente reduzidos.
CARTS	Common Automated Radar Terminal System	É uma ferramenta que, à semelhança do Standard Terminal Automation Replacement System (STARS), tem como objetivo prever e alertar, de forma automática, a probabilidade e a iminência da ocorrência de conflitos entre aeronaves para que os(as) controladores(as) de tráfego aéreo possam tomar as decisões adequadas para evitar esses conflitos da melhor forma possível.
CAT	Constrained Airspace Tool	É uma ferramenta que tem a capacidade de efetuar uma reorganização dos setores aéreos de forma dinâmica sempre que se verifique alguma restrição, nomeadamente, condições meteorológicas adversas, elevada densidade do fluxo de tráfego aéreo ou alteração do espaçamento entre as aeronaves.
CAUTRA	Coordinateur AUtomatisé du TRafic Aérien	É uma ferramenta que tem como objetivo fornecer os meios de automatização para a movimentação segura e eficiente das aeronaves, sendo bastante útil para a gestão e o processamento dos planos de voo assim como para o processamento dos dados de radar fundamentais para o normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.
CCD	Continuous Climb Departure	É uma ferramenta que permite a implementação de procedimentos que minimizem a emissão de poluição sonora em situações de densidade de fluxo de tráfego aéreo bastante elevada, sendo que esse objetivo é alcançado através da gestão mais adequada das trajetórias efetuadas pelas aeronaves.
CCFP	Collaborative Convective Forecast Product	É uma ferramenta que permite obter as previsões das condições meteorológicas com uma antecedência adequada para a realização apropriada do planeamento das operações de tráfego aéreo. Com estas previsões será possível atribuir novas rotas para as aeronaves de forma a evitar as consequências decorrentes das condições meteorológicas adversas.
CDA	Constinuous Descent Approaches	É uma ferramenta que auxilia na gestão do fluxo de tráfego aéreo, sendo especialmente útil para lidar com as aeronaves que se encontrem em níveis de voo bastante elevados em contexto de congestionamento.
CDQM	Collaborative Departure Queue Management	É uma ferramenta que permite gerir o tamanho da fila de espera de aeronaves que pretendem descolar de uma determinada infraestrutura aeroportuária, auxiliando na atribuição de *slots* às companhias de transporte aéreo.
CDR	Coded Departure Routes	É uma ferramenta que contempla um conjunto de rotas pré-definidas que têm como intenção serem utilizadas em situações inesperadas em que é necessário minimizar o impacto das condições meteorológicas adversas.
CFMU	Central Flow Management Unit	É uma metodologia criada pela EUROCONTROL que tem como objetivo organizar os voos e ajustar os meios adequados para facilitar o controlo do fluxo de tráfego aéreo europeu. De forma simplificada, esta metodologia é constituída por duas fases, nomeadamente, a fase pré-tática e a tática. Na fase pré-tática recorre ao PREDICT e na tática recorre ao TACT.
CHAMAN	CHAotic Situation MANagement	É uma ferramenta criada para ajudar na resolução dos problemas associados à alocação de *slots* durante períodos de tempo de fortes congestionamentos.
CIWS	Corridor Integrated Weather System	É um sistema que permite obter uma previsão das condições meteorológicas adversas, tendo como principal foco a identificação de períodos de tempo em que ocorrerão tempestades e a sua localização, auxiliando no reajuste das rotas das aeronaves, de forma a afastá-las dos setores aéreos afetados.
COCA	COmplexity and CApacity	É uma ferramenta criada pela EUROCONTROL que tem como objetivo principal descrever, de forma detalhada, a relação entre a capacidade e a complexidade do fluxo de tráfego aéreo, recorrendo a uma ou mais TMIs precisas.
CODAS	Consolidated Operations and Delay Analysis System	É um sistema que reporta dois tipos de atrasos, nomeadamente, em voo e na aterragem, tendo em conta as condições meteorológicas existentes em cada TMA. Desta forma, é possível gerir melhor o equilíbrio entre a procura e a capacidade disponível.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
CoDMAN	Collaborative Departure MANagement	É uma ferramenta inteligente utilizada para a gestão em colaboração de descolagens em infraestruturas aeroportuárias que utilizam o conceito das Teorias de Jogos para efetuarem a negociação entre as aeronaves envolvidas.
COMPAS	Computer Oriented Metering Planning and Advisory System	É um sistema de origem alemã que utiliza um algoritmo que permite programar as aterragens das aeronaves e fornecer aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo conselhos e avisos sobre as operações em causa, como por exemplo, a alteração da velocidade das aeronaves.
COSAAC	COmmon Simulator to Assess ATFM Concepts	É uma ferramenta cuja implementação demonstra ser bastante eficaz quando realizada na fase pré-tática das operações de tráfego aéreo, tendo acesso a um conjunto de dados que possibilita a determinação prévia de possíveis constrangimentos nas TMAs e, dessa forma, permitindo o reajuste atempado dos planeamentos das aeronaves.
CPN	Coloured Petri Net	É uma ferramenta cuja implementação permite elaborar um planeamento otimizado da sequência de aproximação e aterragem de aeronaves a uma determinada infraestrutura aeroportuária, possibilitando a gestão da capacidade das pistas existentes e todas as características de voo inerentes às aeronaves que se encontram nessa fase do voo.
CPS	Constrained Position Shifteded	É uma ferramenta que se aplica em situações em que uma determinada infraestrutura aeroportuária possui apenas uma pista de aterragem e/ou descolagem, tornando estas fases do voo mais complexas.
CPTP	Conflict Prediction and Trial Planning	É uma ferramenta que, quando utilizada pelos(as) controladores(as) de tráfego aéreo, auxilia na resolução de conflitos entre as aeronaves, possuindo uma metodologia de análise de trajetória comum entre as mesmas de forma antecipada.
CTA	Controlled Time of Arrival	Permite auxiliar no controlo das aterragens das aeronaves, aliando a componente da automatização das aeronaves e dos recursos existentes nas infraestruturas aeroportuárias, sendo relevante para situações cuja densidade de operações se encontra elevada.
CTAS	Center/TRACON Automation System	É um sistema que tem a capacidade de efetuar previsões com maior precisão sobre os tempos de aterragem das aeronaves em uma determinada infraestrutura aeroportuária. Desta forma, é possível antecipar os atrasos que serão imputados para que ocorra uma melhor gestão das tarefas por parte dos(as) agentes. Através da sua utilização adequada é possível antever possíveis situações de desequilíbrio assim como a deteção e resolução de conflitos entre as aeronaves. Tendo em conta que se trata de um sistema mais complexo, é importante referir que o mesmo é constituído por três TMIs, nomeadamente, o TMA, o DA e o pFAST. De acordo com o histórico da sua utilização, é possível afirmar que as previsões geradas são de elevada precisão e fiabilidade.
CTOP	Collaborative Trajectory Options Program	É um sistema que permite reencaminhar as aeronaves antes da sua descolagem de uma determinada infraestrutura aeroportuária. As companhias de transporte aéreo têm a possibilidade de enviarem sugestões de várias rotas preferenciais de forma a evitarem rotas que, em determinado momento, se encontram afetadas pelas condições meteorológicas adversas. Desta forma, o CTOP utiliza o histórico de decisões similares para auxiliar a tomada de decisão dos(as) agentes que permitirá uma decisão mais eficiente.
CWAM	Convective Weather Avoidance Model	É uma ferramenta que fornece aos(às) pilotos um modelo probabilístico relativo às condições meteorológicas adversas. Desta forma, poderão, antecipadamente, delinear a melhor rota possível para que as condições esperadas não afetem negativamente a segurança e a operação das aeronaves.
D2	Direct-To	É uma ferramenta utilizada pelos(as) controladores(as) de tráfego aéreo dedicados(as) ao controlo de aeronaves que se encontram em rota e que automatiza a avaliação das rotas efetuadas, de forma a detetar potenciais conflitos que possam ser corrigidos e/ou oportunidades de otimização da rota para serem implementadas.
DA	Delay Assignment	É uma medida que atribui um período de tempo para cada aeronave, sendo mais frequente quando a mesma se encontra afetada pelo GDP. Existem dois tipos de DA, nomeadamente, o DA baseado em "camadas" e o DA baseado na distância. O primeiro é apropriado para gerir o fluxo de tráfego aéreo através de todo o espaço aéreo de uma determinada região, envolvendo os(as) agentes adequados(as). O segundo refere-se à distância específica entre as TMAs.
DA	Descent Advisor	É uma ferramenta que possibilita os(as) controladores(as) de tráfego aéreo a autorizarem as descidas das aeronaves de forma mais eficiente, de forma a que as mesmas aterrem na hora prevista, designada em inglês por Scheduled Time of Arrival (STA). Para além de constituir um dos elementos do CTAS, permite não só a poupança de combustível, como também a agilização do sequenciamento das aeronaves e a separação adequada entre elas.
DAG-TM	Distributed Air-Ground Traffic Management	É uma ferramenta com foco no conceito de voo livre que tenta aumentar a taxa de transferência enquanto atinge um equilíbrio entre as preferências dos(as) agentes e, por outro lado, a utilização equitativa dos recursos disponibilizados.
DAR	Dynamic Arrival Routes	É uma ferramenta que permite redirecionar as aeronaves que se destinam a uma determinada infraestrutura aeroportuária, tendo em conta as condições meteorológicas adversas verificadas na TMA.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
DART	Data-driven AiRcraft Trajectory Prediction Research	É uma ferramenta que promove a criação de previsões de trajetórias de aeronaves com base nas informações recebidas por parte de diferentes fontes.
DATS	Durable Aviation Trainer Solutions	É uma ferramenta que tem como intuito auxiliar na previsão de situações que podem ocorrer, principalmente, na fase de aproximação ou de aterragem das aeronaves em determinadas infraestruturas aeroportuárias.
DAVINCI	Departure and ArriVal INtegrated Management System for Cooperative Improvement of Airport Traffic Flow	É um sistema que permite definir e demonstrar a viabilidade da integração e/ou coordenação entre as ferramentas úteis para a gestão do fluxo de tráfego aéreo que já existem e que lidam, da melhor forma possível, com todas as circunstâncias que podem, de alguma forma, interferir com as aterragens e as descolagens das aeronaves em uma determinada infraestrutura aeroportuária.
DDTC	Datalink Delivery of Expected Taxi Clearances	É uma ferramenta que permite reduzir o congestionamento das comunicações através de radiofrequência, assim como a carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo e dos(as) pilotos.
DELAYS	---	É uma ferramenta que representa uma simplificação da aplicação do AND, visto que analisa o impacto dos atrasos promovidos por uma determinada aeronave para as demais que pretendem aterrar ou descolar em/de uma única infraestrutura aeroportuária.
DEPCOS	DEParture Co-ordination System	É um sistema automatizado que procura lidar, de forma coordenada, otimizada e eficiente, com o fluxo de tráfego aéreo que descola de uma determinada infraestrutura aeroportuária.
DFM	Departure Flow Management	É uma ferramenta que traduz as restrições da TMA e as que são verificadas em rota que podem, de alguma forma, influenciar negativamente as fases de descolagem das aeronaves. Esta ferramenta permite automatizar a coordenação das descolagens em diferentes infraestruturas aeroportuárias em simultâneo que se encontram congestionadas através das comunicações eletrónicas entre os(as) agentes.
DM	Departure Manager	É uma ferramenta de planeamento com o intuito de fornecer, de forma otimizada, os horários de descolagem das aeronaves e os avisos adequados para os(as) controladores(as) aéreos atuarem de forma adequada nesta fase de voo. Estes planeamentos deverão ter em conta as restrições verificadas em cada momento, de forma a garantirem um fluxo eficiente e seguro para as aeronaves que descolam de uma determinada infraestrutura aeroportuária e que tentam ser integradas nos setores aéreos pertencentes à sua rota. Por outro lado, tem a capacidade de fornecer trajetórias de subida mais económicas.
DMAN	Departure MANagement Automations	É uma ferramenta que automatiza a distribuição e a alocação de *slots*, assim como auxilia na realização dos ajustes requeridos de forma dinâmica.
DMEAN	Dynamic Management of the European Airspace Network	É uma ferramenta que promove uma gestão dinâmica da rede do espaço aéreo europeu, de forma a evidenciar e/ou aumentar as capacidades dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo, a um curto ou médio prazo, no que diz respeito ao cumprimento dos requisitos relativos à capacidade e eficiência pretendida para cada voo.
DNM	Directorate Network Management	É uma ferramenta que garante a gestão do fluxo de tráfego aéreo no espaço aéreo europeu quando este se encontra com uma densidade bastante elevada, comparativamente aos valores médios registados anteriormente.
DORATASK	---	É uma ferramenta utilizada para estimar a quantidade de tarefas atribuídas aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo e a correspondente carga de trabalho, tendo em conta dois tipos de tarefas pré-definidas, nomeadamente, as observadas e as não observadas.
DRAW	Dynamic Routing for Arrivals in Weather	É uma ferramenta que fornece avisos para a alteração de rota de voo para os(as) controladores(as) de tráfego aéreo com o intuito de mitigar o impacto negativo das condições meteorológicas adversas. Desta forma, os(as) controladores(as) de tráfego aéreo poderão avaliar as consequências de inúmeros parâmetros meteorológicos, optando pela melhor rota para os voos em risco.
DRSG	Dynamic Rerouting Static Ground holding	É uma ferramenta que permite redirecionar e autorizar as aterragens das aeronaves em uma determinada infraestrutura aeroportuária, tendo em conta os ajustes e as correções implementados(as) ao longo do tempo. Por outro lado, a utilização desta ferramenta permite uma abordagem mais "reativa" de forma a lidar com as incertezas intrínsecas a algumas variáveis, como por exemplo, as condições meteorológicas, tendo a capacidade de reduzir os custos relativos a atrasos de aeronaves.
DSP	Departure Sequencing Program	É um programa que permite atribuir um horário específico para a descolagem de uma determinada aeronave de forma a atingir um fluxo constante de tráfego aéreo em uma determinada TMA. Por norma, este programa é implementado em regiões que possuem várias infraestruturas aeroportuárias.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
DWR	Dynamic Weather Routes	É uma ferramenta que tem a capacidade de fornecer aos(às) agentes as rotas de descolagem e de voo mais eficientes, nomeadamente, em termos de custos e de segurança, evitando a ocorrência de conflitos entre as aeronaves.
EATMS	European Air Traffic Management System	É um sistema que permite incorporar a TMI de forma a maximizar a utilização da capacidade disponível das TMAs, tendo especial atenção para as medidas que poderão minimizar as restrições causadas pela falta de visibilidade que poderá colocar em causa a segurança das operações das aeronaves.
EDA	Efficient Descent Advisor	É uma ferramenta projetada pela NASA que fornece avisos relativamente a trajetórias cuja probabilidade de ocorrência de conflitos entre as aeronaves é bastante reduzida. Dessa forma, a ferramenta em causa tem a capacidade de aconselhar os(as) controladores(as) de tráfego aéreo e facilitar as suas tarefas quanto à otimização do tempo necessário para que cada aeronave atravesse cada TMA, tendo como preocupação a redução dos custos de combustível e a minimização do seu impacto ambiental.
EDA	En-route Descent Advisor	É uma ferramenta que permite gerir o fluxo de tráfego aéreo em rota, sendo esta tarefa uma das mais complexas. Esta gestão é alcançada através da análise cuidada das restrições existentes em cada momento e permite uma otimização da carga horária dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo. Consoante a versão do CTAS em utilização, o EDA pode ser considerado como parte integrante do mesmo.
EDP	Expedite Departure Path	É uma ferramenta que alerta os(as) controladores(as) de tráfego aéreo para a existência de rotas de subida de aeronaves sem quaisquer restrições, permitindo dessa forma que as mesmas descolem e diminuindo a possibilidade de congestionamento.
Enhanced Airfield Capacity Model	---	É um modelo analítico da capacidade que foi aprimorado devido à combinação das características benéficas do LMI Runway Capacity Model e do FAA Airfield Capacity Model. Desta forma, é possível cumprir os objetivos de ambas as ferramentas de forma mais facilitada e rápida.
ERAM	En Route Automation Modernization	É uma ferramenta bastante importante que auxilia os(as) controladores(as) de tráfego aéreo no sequenciamento e na separação das aeronaves em rota.
ERM	En Route Metering	É uma ferramenta que tem como intenção melhorar o fluxo de tráfego aéreo relativamente às aterragens das aeronaves em uma determinada infraestrutura aeroportuária.
ESP	En route Sequencing Program	É um programa que atribui um horário pré-definido para a descolagem de uma determinada aeronave de forma a facilitar a integração da mesma no fluxo de tráfego aéreo que já se encontra em rota.
ETFMS	Enhanced Tactical Flow Management System	É um sistema que foi criado pela EUROCONTROL e tem como objetivo procurar melhorar e otimizar a alocação de *slots* disponibilizados para que as aeronaves possam aterrar e descolar nas/das infraestruturas aeroportuárias. Neste sentido, e acrescentando algumas melhorias introduzidas ao CASA, o presente sistema tenta preservar e garantir a equidade entre os voos e introduziu o conceito de *time band*, isto é, o período de tempo disponibilizado para a atribuição de cada *slot*.
ETMS	Enhanced Traffic Management System	É um sistema que se encontra interligado com diferentes bases de dados de voos que armazenam informações relevantes, nomeadamente, no contexto mexicano, canadiano e europeu, tendo como principal intuito fornecer informações de forma integrada e centralizada relativamente às trajetórias planeadas e reais para cada aeronave. Por outro lado, permite também emitir alertas para os(as) agentes quando as projeções elaboradas preveem a ocorrência de excesso de procura.
FAA Airfield Capacity Model	---	É uma ferramenta que calcula a capacidade de uma determinada infraestrutura aeroportuária através da simulação de catorze configurações diferentes das pistas das infraestruturas aeroportuárias, desde aquelas que possuem apenas uma pista até aquelas que possuem quatro pistas ativas. Apesar de ser semelhante ao LMI Runway Capacity Model, existem alguns aspetos que diferenciam estas duas ferramentas, nomeadamente, a metodologia para lidar e responder positivamente com/aos atrasos verificados.
FAME	FAst Modifier Environment	É um programa computacional que impulsiona o cumprimento das alterações ambientais necessárias, como por exemplo, que envolvem as rotas das aeronaves e os estados dos setores aéreos. Através da sua utilização é possível atribuir novas rotas a determinadas aeronaves ou atribuir-lhes diferentes setores aéreos, recalculando novas trajetórias sempre que necessário.
FAP	Future ATM Profile	É uma metodologia baseada em um conjunto de ferramentas, destacando-se o Network Estimation & Visualisation of ACC Capacity (NEVAC), sendo utilizado principalmente para auxiliar no planeamento da utilização da capacidade no contexto europeu.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
FAST	Final Approach Spacing Tool	É uma ferramenta que auxilia a gestão do fluxo de tráfego aéreo que chega a uma determinada TMA e, dessa forma, é possível gerir o espaço aéreo disponível que permite a execução das operações de forma segura e eficiente. Desta forma, ocorre um sequenciamento das aeronaves tendo em conta o ajuste de algumas variáveis operacionais. A utilização desta ferramenta permite, por exemplo, atribuir as pistas de aterragem em cada infraestrutura aeroportuária, gerar inúmeros alertas que auxiliam os(as) controladores(as) de tráfego aéreo e permite garantir o distanciamento entre as aeronaves que se aproximam da mesma infraestrutura aeroportuária.
FCA	Flow Constrained Area	É uma ferramenta cuja utilização permite, de forma antecipada, reduzir o congestionamento, particularmente nas regiões do espaço aéreo, independentemente de pertencerem ou não a uma TMA.
FEAS	---	É uma ferramenta que facilita a automatização da alocação de *slots* como auxílio à gestão do fluxo de tráfego aéreo, propondo para isso uma alteração na programação dos horários das descolagens das aeronaves, de forma a evitar a ocorrência de desequilíbrios entre a procura e a capacidade.
FEP	Flight Efficiency Plan	É uma iniciativa da EUROCONTROL com o intuito de melhorar a eficiência dos voos através do controlo de algumas variáveis, nomeadamente, o *design* do espaço aéreo e a utilização da capacidade disponível da TMA.
FLOWSIM	---	É um modelo de fluxo de tráfego aéreo que se encontra sujeito às restrições de capacidade das TMAs. Baseia-se na simulação rápida do fluxo de aeronaves entre as principais TMAs de forma a determinar a ocorrência e a acumulação de atrasos, assim como as consequências induzidas pelas restrições de capacidade assinaladas em cada TMA.
FMP	Flow Management Positions	É uma ferramenta que permite gerir as posições das aeronaves ao longo das suas rotas, utilizando a contagem de voos e a capacidade de cada setor aéreo para avaliar e percecionar a probabilidade de ocorrência de congestionamento e, por outro lado, construindo cenários alternativos para evitar estas situações.
FRA	Free Route Concept	É uma ferramenta definida como sendo uma determinada região do espaço aéreo dentro da qual os(as) utilizadores(as) poderão planear livremente as suas rotas entre o ponto de entrada e o de saída, independentemente do plano de voo pré-estabelecido e divulgado aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo. Apesar do voo continuar a ser monitorizado nesse setor aéreo, essa "liberdade" permitirá uma redução de transporte de combustível, maior previsibilidade do voo, maior eficiência do voo, maior rentabilidade do voo, menor impacto ambiental e menor carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo.
FSM	Flight Schedule Monitor	É uma ferramenta utilizada por diferentes agentes e que tem como objetivo monitorizar a capacidade de cada TMA de forma a tentar manter um equilíbrio na procura, para que a mesma não seja superior à oferta disponível em cada momento. Através desta monitorização, e tendo em conta as circunstâncias e as características específicas de cada TMA, são delineadas as TMIs mais adequadas para cada situação, definindo diversas ações exequíveis e que serão definidas pelos(as) agentes.
GAAP	General Aviation Airport Program	É uma medida que representa uma aplicabilidade e uma especificidade do GDP que tem como objetivo restringir e controlar o fluxo de aterragem de aeronaves em uma determinada infraestrutura aeroportuária em situações de elevada procura. A aplicação desta medida fará com que seja mais fácil gerir o fluxo de tráfego aéreo, ajudando no planeamento e aumentando a fiabilidade de toda a operação que alberga inúmeros(as) agentes.
GRACE	Generic Resolution Advisor and Conflict Evaluator	É um algoritmo de alerta e orientação dos(as) agentes que combina a flexibilidade, robustez e eficiência de um programa computacional. Esta ferramenta tem sido utilizada pela NASA na realização de algumas simulações, verificando a sua capacidade de produção de uma rápida resposta sem efetuar qualquer tipo de suposição e/ou confirmação dos dados e das informações pertinentes.
GRM	Geometric Recourse Model	É um modelo cuja utilização permite obter um planeamento otimizado de rotas para um conjunto de aeronaves, tendo em conta as condições meteorológicas existentes e alguns parâmetros específicos.
HERMES	HEuristic Runway Movement Event Simulation	É uma ferramenta que permite efetuar a avaliação da capacidade de infraestruturas aeroportuárias que possuem pistas paralelas, sendo também bastante útil para aferir a carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo. Adicionalmente, esta ferramenta também tem a capacidade de fornecer cenários simulados de forma detalhada relativamente a eventos imprevistos que podem ocorrer durante a fase da aterragem e da descolagem.
IACM	---	É um sistema que prevê as condições meteorológicas com base nos dados recolhidos de diversas fontes e a análise probabilística da ocorrência das mesmas. Tendo em conta a sua função, este sistema é constituído por três componentes, nomeadamente, um relativo à capacidade do terminal da infraestrutura aeroportuária, um relativo à capacidade da infraestrutura aeroportuária e um relativo à previsão da capacidade com base nos dados das duas componentes anteriores e das condições meteorológicas.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
IDAC	Integrated Departure Arrival Capability	É uma ferramenta que permite a automatização da coordenação e da gestão das descolagens de aeronaves que se encontram em TMAs congestionadas.
IIAC	Integrated Impact Assessment Capability	É uma ferramenta que permite que o(a) gestor(a) de tráfego aéreo consiga especificar um conjunto de rotas alternativas e as restrições de separação entre as aeronaves. Através desta ferramenta, e com os dados e/ou as exigências apresentados(as), é possível prever o impacto na procura do espaço aéreo e os atrasos que serão provocados por estas decisões. Desta forma, estes(as) agentes poderão avaliar as decisões que gostariam de implementar, antevendo o seu impacto e podendo optar por outras TMIs. Através da sua modelação, é possível obter uma previsão da quantidade de aeronaves expectáveis para uma determinada região do espaço aéreo e de acordo com um período de tempo definido.
IMPACT	Intelligent agent-based Model for Policy Analysis of Collaborative Traffic flow management	É um projeto que analisa o conjunto de decisões que uma companhia de transporte aéreo pode tomar quando surgem alterações drásticas das condições meteorológicas e que afetam a normal operação das aeronaves. Após essa análise os(as) agentes selecionam uma TMI adequada. De entre as diversas TMIs, os(as) agentes podem optar por uma de três decisões, nomeadamente, não implementar qualquer medida; implementar um GDP sem ter em conta as informações fornecidas por outros(as) agentes; implementar um GDP após negociação com a respetiva companhia de transporte aéreo. Tendo em conta as três decisões apresentadas, é expectável que os(as) agentes optem pela terceira opção, escolhendo sempre o valor de GDP adequado à segurança da operação e respeitando a opinião emanada pela companhia de transporte aéreo, sendo que quanto menor for o envolvimento desta, maiores serão os custos associados à implementação desta medida.
INM	Integrated Noise Model	É uma ferramenta criada pelo FAA que é utilizada para calcular o impacto do ruído do fluxo de tráfego aéreo nas TMAs. Por outro lado, tendo em conta o histórico da densidade de fluxo de tráfego aéreo em cada TMA, esta ferramenta tem também a capacidade de prever o ruído em operações futuras.
ISAC	Information Sharing Analysis Center	É um sistema de abordagem centralizada que utiliza uma extensa base de dados de voos já efetuados, auxiliando os(as) controladores(as) de tráfego aéreo na tomada de decisões que diminui a probabilidade da ocorrência de conflitos entre aeronaves, reduzindo também a sua carga de trabalho.
ITWS	Integrated Terminal Weather System	É um sistema que fornece uma representação de alta resolução da intensidade e localização de tempestades próximas às TMAs. A sua utilidade é evidenciada pela rápida atualização dos dados produzidos no que diz respeito à previsão da ocorrência de precipitação que poderá colocar em causa o normal fluxo de tráfego aéreo.
LAADR	Low Altitude Arrival and Departure Routing	É um procedimento que permite estipular a altitude máxima a que as aeronaves podem voar, sendo maioritariamente aplicado na fase da descolagem, apesar de ter aplicabilidade em toda a extensão de voo, consoante as situações existentes e a duração do voo, isto é, em voos curtos é expectável que este procedimento se aplique em toda a sua extensão. Em diversas situações, principalmente para evitar o agravamento de congestionamento em determinados níveis de voo, esta medida é implementada com o intuito de facilitar a gestão do fluxo de tráfego aéreo.
LMI Runway Capacity Model	---	É uma ferramenta que se encontra em desenvolvimento e, até ao momento, é aplicável apenas a infraestruturas aeroportuárias que possuem apenas uma pista. Dessa forma, revela-se bastante útil no que diz respeito ao cumprimento dos requisitos de separação entre as aeronaves, calculando também a capacidade de descolagem e a de aterragem de forma a auxiliar no equilíbrio entre a procura e a capacidade disponível.
LMINET	---	É uma ferramenta utilizada principalmente com o objetivo de estimar os atrasos das aeronaves, analisar os benefícios promovidos para a gestão da capacidade com recurso às novas tecnologias, analisar os procedimentos implementados nas infraestruturas aeroportuárias e quantificar a relação entre a procura e a capacidade de cada TMA.
MAESTRO	Means to Aid Expedition and Sequencing of Traffic with Research of Optimisation	É um sistema de origem francesa baseado em algoritmos e modelação bastante semelhante ao COMPAS. No entanto, este sistema inclui uma lógica de sistemas especializados para determinar a alocação das pistas, quando aplicável, para a realização das operações de tráfego aéreo, tendo como intuito salvaguardar o equilíbrio adequado entre a procura e a capacidade de determinada TMA.
MAP	Monitor Alert Program	É um programa cuja utilização permite a especificação mais precisa do número de aeronaves que podem ser recebidas em determinada TMA em cada período de tempo. O seu carácter benéfico reflete-se na capacidade de analisar, com alguma antecedência, a relação entre a procura e a oferta, alertando quando esta se aproxima do seu limite.
McTMA	Multi-Center Traffic Management Advisor	É uma ferramenta desenvolvida em conjunto entre a NASA e o FAA, tendo como intuito inovar e melhorar algumas lacunas apresentadas pelo TMA. É imprescindível para ajudar na comunicação entre os(as) agentes e, por outro lado, a principal diferença entre a TMA e a McTMA é a escala de aplicação.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
MENTOR	---	É um modelo macroscópico que tem dois objetivos principais, nomeadamente, a deteção de situações de congestionamento severo e a análise da relação entre a procura e a capacidade dos setores aéreos.
MFCR	Multi-Flight Common Routes	É uma ferramenta desenvolvida pela NASA de forma a permitir que as ações tomadas pelos(as) agentes consigam minimizar ou recuperar os atrasos registados nas operações de tráfego aéreo. Por esse motivo, o MFCR sugere trajetórias para as aeronaves que possam evitar o impacto negativo de algumas restrições, como por exemplo, as condições meteorológicas adversas.
MIDAS	Man-Machine Integration, Design, and Analysis System	É um sistema bastante complexo que reúne os parâmetros relativos aos Fatores Humanos dos(as) agentes e a análise do desempenho de sistemas complexos Homem-máquina. Desta forma, é possível simular o desempenho e as ações tomadas pelos(as) agentes quando recorrem à utilização de ferramentas e/ou programas computacionais relevantes para a gestão do fluxo de tráfego aéreo.
MLM	Mid-Level Model	É um modelo, tendo em conta as suas características abstratas, cuja implementação pode ser verificada em diferentes situações, nomeadamente, na determinação do impacto das alterações dos diversos planeamentos de operações de tráfego aéreo na gestão adequada dos atrasos das aeronaves.
NARIM	National Airspace Resource Investment Model	É um modelo que foi desenvolvido pelo FAA e tem como objetivo principal fornecer uma estrutura de análise que permita avaliar os impactos operacionais e/ou de investimento de novos conceitos implementados. As principais áreas funcionais deste modelo focam-se nos planeamentos de voos, nas trajetórias de voo das aeronaves, nos recursos existentes e na análise de desempenho da gestão do fluxo de tráfego aéreo.
NARSIM	NLR ATC Research SIMulator	É uma ferramenta de simulação do controlo de fluxo de tráfego aéreo em tempo real e utiliza os recursos físicos e materiais existentes em cada momento. Através das simulações realizadas, é possível analisar a viabilidade de ferramentas automatizadas para auxiliar na previsão das trajetórias das aeronaves e da probabilidade da ocorrência de conflitos entre as mesmas.
NAS-ADAPT	NAS Airspace Dynamics Analysis and ParTitioning	É um programa computacional que é utilizado como ferramenta de estudo permitindo contabilizar a ocupação das TMAs de forma dinâmica, garantindo o controlo dos seus limites e transmitindo essa informação aos(às) agentes.
NASCENT	NAS Constraint Evaluation and Notification Tool	É uma ferramenta que permite simular a geração de diversas rotas de voo alternativas com o intuito de reduzirem os tempos de operações de tráfego aéreo e os custos de combustível, principalmente quando, em alguma fase de voo, é verificado algum tipo de restrição.
NASPAC	National Airspace System Performance Analysis Capability	É um sistema que representa a abordagem implementada pelo FAA para lidar com as situações de congestionamento, sendo bastante distinta da que é tomada no contexto europeu, visto que nos EUA a maior preocupação é o congestionamento nas TMAs, enquanto que no contexto europeu a preocupação encontra-se distribuída por todas as fases de voo das aeronaves.
NEST	NEtwork Strategic modelling Tool	É um programa computacional, utilizado pela EUROCONTROL, promovendo o desenvolvimento da estrutura do espaço aéreo europeu, auxiliando no planeamento da sua utilização e analisando a variação da sua capacidade.
NEVAC	Network Estimation & Visualisation of ACC Capacity	É uma ferramenta que tem a capacidade de medir a capacidade potencial que poderia ser oferecida durante um determinado período de tempo, realizando essa estimativa rápida e facilmente.
NFM	National Flow Model	É um modelo que faz simulações em grande escala relativamente ao fluxo de tráfego aéreo em uma determinada TMA durante um único dia. Desta forma, é possível aferir a eficácia do sistema de gestão implementado e percecionar a necessidade da realização de ajustes.
NOISIM	---	É uma ferramenta que permite efetuar simulações quanto ao impacto do ruído das regiões metropolitanas que compreendem a trajetória sobrevoada pelas aeronaves. As simulações produzidas incluem todo o tipo de restrições, como por exemplo, as condições meteorológicas, sendo mais preciso quando comparado com o INM.
NRP	North American Route Program	É um programa que apesar da sua implementação ser restrita ao espaço aéreo americano e canadiano, constitui uma base de dados que fornece um conjunto de rotas adequadas a diferentes situações que podem acontecer durante as operações de tráfego aéreo.
NRSG	No Rerouting Static Ground holding	É uma ferramenta que representa uma adaptação do DRSG que atribui atrasos no solo às aeronaves de forma estocástica e estática, não ocorrendo qualquer tipo de redireccionamento. Ao dedicar-se única e exclusivamente à imputação de atrasos em solo, significa que tem a capacidade de otimizar estes atrasos, minimizando o impacto dos mesmos para as demais aeronaves.
NTML	National Traffic Management Log	É um sistema que foi criado e desenvolvido pelo FAA e tem como intuito, através da utilização de uma única plataforma, automatizar o controlo, a coordenação e a interligação da implementação de TMIs, em simultâneo, verificadas no espaço aéreo americano.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
OASIS	Optimal Aircraft Sequencing using Intelligent Scheduling	É uma ferramenta cuja utilização permite a ação individual do conjunto de agentes, assegurando a sua intercomunicação, mas classificando-a de acordo com o seu grau de relevância para o problema em análise, isto é, os(as) agentes que coordenam as operações de tráfego aéreo de forma geral e os(as) demais que focam os seus esforços na resolução de problemas específicos de cada aeronave.
ONBOARD	---	É um projeto que tem como base de fundamentação o projeto SESAR mas que se distingue do mesmo devido ao facto de considerar e dar a importância necessária à incerteza existente na gestão do fluxo de tráfego aéreo, aplicando-se principalmente ao planeamento de gestão partilhada entre os(as) agentes e à execução correta das diversas fases de voo. A sua implementação baseia-se no estudo de dois algoritmos, atuando um deles na área das operações de uma companhia de transporte aéreo e a outra na gestão entre os(as) agentes.
OPAS	---	É um sistema que contempla inúmeras ferramentas que auxiliam na realização de simulações rápidas e eficazes, podendo ser utilizado, por exemplo, para analisar a ocorrência de conflitos entre as aeronaves e a carga de trabalho imputada aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo.
OPTICON	OPTImise CONfiguration	É uma ferramenta que auxilia na seleção da configuração dos setores aéreos de forma a melhorar a avaliação do impacto das alterações selecionadas.
ORC	Optimized Route Capability	É uma ferramenta criada pelo FAA que facilita algumas tarefas executadas pelos(as) controladores(as) de tráfego aéreo na identificação e resolução de atrasos nas aeronaves que se dirigem a uma determinada infraestrutura aeroportuária, tendo como causa a ocorrência de desequilíbrios entre a procura e a capacidade. O ORC utiliza a capacidade de previsão das ferramentas de automatização que já existem e monitoriza os atrasos verificados no fluxo de tráfego aéreo, de forma a melhorar os sistemas e a implementar correções que minimizem os atrasos das aeronaves.
PACER	Probabilistic Automation-Assisted Congestion Management for En Route	É um programa computacional que tem a capacidade de identificar, de forma antecipada e automática, potenciais áreas de ocorrência de congestionamento ao longo das rotas de diversas aeronaves, permitindo o ajuste das mesmas como forma de minimização do impacto desta situação. Por outro lado, tem a capacidade de prever o aumento de procura e a variação probabilística da capacidade do espaço aéreo, auxiliando na utilização eficiente deste recurso e na tomada de decisão por parte dos(as) agentes.
PARO	Package for Analysis of Runway Operations	É um programa computacional que tem como objetivo processar de forma automática os dados e as informações relativos(as) às operações efetuadas nas pistas das infraestruturas aeroportuárias. O resultado desse processamento pode ser compartilhado com outras ferramentas, melhorando, por exemplo, as simulações e as previsões.
PAS	Pseudo Aircraft System	É um programa computacional que trabalha em colaboração com o McTMA, enviando os planos de voo das aeronaves e recolhendo a informação enviada pelo McTMA. Dessa forma, é possível simular o fluxo de tráfego aéreo de forma a antever possíveis problemas e agir atempadamente.
PCM	Probabilistic Collocation Model	É um projeto de otimização das restrições baseado na realização de simulações, permitindo utilizar, de forma inteligente e adequada, algumas amostras de condições meteorológicas para simular cenários de incerteza e que poderão imputar restrições ao normal funcionamento do fluxo de tráfego aéreo.
PDARS	Performance Data Analysis and Reporting System	É uma ferramenta que tem um carácter bastante benéfico na análise do desempenho das operações de tráfego aéreo numa base diária, permitindo verificar situações inesperadas e recolhendo informações que ajudarão no futuro.
PDRC	Precision Departure Release Capability	É uma ferramenta que tem como objetivo utilizar previsões das trajetórias efetuadas pelas aeronaves na superfície das infraestruturas aeroportuárias para otimizar as trajetórias reais e obter uma maior precisão nas descolagens.
pFAST	Passive Final Approach Spacing Tool	É uma ferramenta que representa uma versão mais antiga do FAST. Gera alertas classificados como passivos, como por exemplo, a atribuição de pistas e o sequenciamento das aterragens. Dessa forma, é possível reduzir os atrasos nas aterragens e equilibrar, de forma mais adequada, a relação entre a procura e a oferta. Baseia-se no controlo e na satisfação da atribuição de uma trajetória adequada, tendo como intuito evitar os conflitos.
PHARE	Program for Harmonized Air Traffic Management Research in Eurocontrol	É um sistema que funciona em combinação com o DM, de forma a organizar a TMA com a intenção de otimizar a sequência de descolagem das aeronaves, planeando as trajetórias de subida das mesmas antes de obterem a autorização para descolarem.
PR	Program Rate	É um programa computacional que fornece a quantidade de aeronaves que se encontram inseridas no GDP, sendo atualizado de forma periódica, normalmente, de hora a hora. Este parâmetro costuma ser comparado com a taxa de aterragens, sendo que nem sempre fornece valores iguais devido a atrasos que possam surgir durante a rota de cada aeronave.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
PREDICT	---	É uma ferramenta pré-tática que permite identificar os setores aéreos que se encontram congestionados em cada momento e, dessa forma, auxilia os(as) agentes na resolução desta questão através da criação de inúmeros cenários possíveis. Por outro lado, é bastante útil para automatizar a alocação dos *slots* e dos GDP quando funciona em conjunto com o CASA.
PROMAS	PROcess MAnagement Simulator	É uma ferramenta que permite simular a realização de diferentes voos, tendo como principal objetivo abordar de forma adequada o impacto e a viabilidade de novos processos de gestão.
PUMA	---	É um método que reúne um vasto conjunto de ferramentas que efetuam a modelação, de forma detalhada, da carga de trabalho dos(as) agentes. Através do mesmo é possível expressar e quantificar as tarefas executadas pelos(as) controladores(as) de tráfego aéreo, definir o cenário do movimento das aeronaves e calcular a carga de trabalho que resulta de cada cenário.
RAMS	Re-organized ATC Mathematical Simulator	É uma ferramenta desenvolvida pela EUROCONTROL que permite efetuar a simulação de inúmeros eventos em que se quantifica e avalia a carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo, sendo implementada no espaço aéreo europeu.
RATSG	Robust Air Traffic Situation Generator	É uma ferramenta que tem como intuito gerar trajetórias de voo em quatro dimensões (4D) (contemplando as variáveis posição e tempo) para simular inúmeros cenários.
Robustometer	---	É uma ferramenta que permite avaliar qualquer planeamento relativo à variação da capacidade das TMAs, tendo em consideração a procura existente em cada momento.
SAAM	System for Traffic Assignment and Analysis on a Macroscopic	É um sistema integrado e modular de ferramentas que tem a capacidade de avaliar o desempenho do setor da aviação europeu e de todas as TMIs implementadas.
SAGITARIO	---	É uma ferramenta que representa uma nova geração do STVD que tem como principais utilizadores(as) os(as) controladores(as) de tráfego aéreo. Esta ferramenta proporciona uma melhor consciência situacional, assim como uma diminuição da carga de trabalho destes(as) agentes através de uma visualização mais facilitada e rápida compreensão dos dados disponibilizados, permitindo o aperfeiçoamento das condições de segurança do fluxo de tráfego aéreo.
SALS	Separate Access Landing System	É um sistema utilizado no espaço aéreo americano, aplicado quando determinada aeronave recebe a ordem de divergir para outra infraestrutura aeroportuária e/ou quando a pista na qual determinada aeronave pretende aterrar possui características e/ou condições que possam, de alguma forma, restringir a sua operação, como por exemplo, o comprimento reduzido.
SARA	Speed And Route Advisor	É uma ferramenta que tem como principal objetivo fornecer alertas aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo relativamente à velocidade e à rota das aeronaves, de forma a melhorar a precisão do plano de voo de cada uma delas e sugerir correções que possam melhorar essa precisão.
SARDA	Spot And Runway Departure Advisor	É uma ferramenta que permite organizar e sequenciar as aeronaves de forma a evitar a ocorrência de situações de congestionamento nas *taxiways* e nas pistas das infraestruturas aeroportuárias. De forma simplificada, esta ferramenta calcula a sequência otimizada da utilização das pistas das infraestruturas aeroportuárias de forma a evitar atrasos e de acordo com as restrições existentes em cada momento.
SART	Situation Awareness Rating Tool	É uma ferramenta que avalia a consciência situacional dos(as) agentes num período experimental de forma a utilizar uma classificação de dez escalas previamente definidas. Cada uma dessas escalas tem sete pontos que representam o nível de consciência situacional demonstrada por cada agente.
SCS	Slot Credit Substitution	É uma ferramenta que permite a troca de *slots* tendo em conta o horário previsto de aterragem de determinada aeronave devido à ocorrência de atrasos. Dessa forma, a atribuição de *slots* será realizada de forma mais adequada tendo em conta a sua limitação e as necessidades verificadas em cada momento.
SDAT	Sector Design Analysis Tool	É uma ferramenta que, para além de auxiliar na monitorização das operações de tráfego aéreo, tem a capacidade de verificar o impacto e a frequência da tomada de decisão humanizada, comparativamente à automática, concluindo que a probabilidade de erros é maior quando a carga de trabalho é substancialmente elevada e exige a participação manual dos(as) agentes.
SDTF	Surface Development and Test Facility	É uma ferramenta que permite fornecer um vasto conjunto de dados que auxiliam no controlo e na gestão de inúmeras infraestruturas aeroportuárias.
SIM-C	Strategy for Information Management and Collaboration	É um sistema que tem sido usado para complementar o System Wide Information Management (SWIM), distribuindo os dados, as informações e os problemas detetados para os(as) agentes, de forma a incentivar a colaboração de todos(as) para a rápida resolução.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
SIMEX	---	É uma ferramenta proveniente do desenvolvimento do ETFMS e do PREDICT com o intuito de fornecer os recursos suficientes para a realização de simulações das operações de tráfego aéreo em um contexto tático e pré-tático. De forma geral, poderá ser utilizada para avaliar um conjunto de restrições da capacidade e, principalmente, a verificação dos atrasos provenientes do impacto das restrições.
SIMMOD	---	É uma ferramenta bastante útil para a realização de simulações relativas às operações de tráfego aéreo efetuadas nas superfícies das infraestruturas aeroportuárias. Tendo em conta que, comparativamente a outras ferramentas, tem um valor de aquisição bastante atrativo, é muitas vezes uma seleção preferencial dos(as) agentes.
SISTRASAG	SIStema de TRAnsmissão da Situação Aérea Geral	É um sistema que permite a atualização precisa e frequente de informações e dados relativas(os) às posições e aos estados das aeronaves que sobrevoam determinados setores aéreos. Este sistema encontra-se amplamente utilizado no espaço aéreo brasileiro e requer a coordenação entre os(as) agentes, de forma a evitar a redundância no fornecimento das informações e dos dados, proporcionando um aumento na segurança do sistema como um todo.
SMA	Surface Movement Advisor	É uma ferramenta que permite fornecer às companhias de transporte aéreo diversas informações relativamente ao posicionamento das aeronaves quando estas se encontram nas zonas terminais das infraestruturas aeroportuárias. Estas informações deverão ser partilhadas entre os(as) agentes de forma a otimizar as operações das aeronaves.
SMS	Surface Management System	É um sistema que auxilia os(as) controladores(as) de tráfego aéreo e as companhias de transporte aéreo na gestão do tráfego terrestre em infraestruturas aeroportuárias que vivenciam situações de congestionamento. Desta forma, os(as) agentes terão acesso às informações relevantes para preverem o impacto destas movimentações nos horários pré-definidos para a realização de descolagens.
SODAA	Surface Operations Data Analysis and Adaptation	É uma ferramenta bastante útil para a metodologia do projeto NextGen e que fornece às infraestruturas aeroportuárias os dados e as informações necessários(as) para uma maior e melhor compreensão do fluxo de tráfego aéreo. Através dos dados fornecidos, é possível alterar alguns parâmetros das aeronaves que se encontram em solo e melhorar a gestão de equilíbrio entre a procura e a capacidade de cada infraestrutura aeroportuária.
SOSS	Surface Operations Simulator and Scheduler	É uma ferramenta que tem a capacidade de simular o movimento das aeronaves nas superfícies das infraestruturas aeroportuárias, tendo também a capacidade de modelar as descolagens e as aterragens das/nas pistas das infraestruturas aeroportuárias, as *taxiways* e as rampas de acesso.
SP	Sequencing Programs	É um programa que permite estabelecer um intervalo específico entre as aeronaves, sendo que este valor poderá ser gerado de forma computorizada ou através de sugestões dos(as) agentes. Tendo em conta a fase de voo em que as aeronaves estão existem três tipos de programas de sequenciamento, nomeadamente, o DSP, o ESP e o ASP. O DSP define o tempo de descolagem necessário para garantir um determinado fluxo de tráfego aéreo constante ao longo de uma rota e/ou de um ponto do espaço aéreo, sendo fundamental na sincronização da descolagem de aeronaves oriundas de diferentes infraestruturas aeroportuárias. O ESP é semelhante ao DSP, mas tem como objetivo permitir que as aeronaves integrem mais facilmente uma determinada corrente ao longo do seu voo. O ASP, ao contrário do DSP e do ESP, permite a execução de correções em determinados voos que se aproximam de uma TMA específica, permitindo a ordenação da aterragem de cada aeronave e, dessa forma, evitando o congestionamento. Para além de "organizar" o fluxo de tráfego aéreo que flui no sentido de determinada infraestrutura aeroportuária, permite uma melhor gestão da capacidade da mesma.
SRS	Standard Route Scheme	É uma ferramenta estratégica que auxilia no ajuste das rotas das aeronaves consoante as especificidades existentes e a capacidade verificada, ajudando na organização da gestão do fluxo de tráfego aéreo e também evitando possíveis situações de congestionamento. Desta forma, é possível maximizar a capacidade das TMAs e, por outro lado, evitar o seu congestionamento.
SRSG	Static Rerouting Static Ground holding	Esta ferramenta foi elaborada tendo em conta as características do DRSG, mas com a adição de algumas restrições que afetam as decisões de redireccionamento citadas pelo DRSG. No caso do SRSG, estas decisões não são dinâmicas, atribuindo um maior grau de previsibilidade às rotas das aeronaves e à carga de trabalho dos(as) controladores(as) de tráfego aéreo.
STARS	Standard Terminal Automation Replacement System	É um sistema que, à semelhança do CARTS, tem como objetivo prever e alertar, de forma automática, a probabilidade e a iminência da ocorrência de conflitos entre as aeronaves de forma a que os(as) controladores(as) de tráfego aéreo possam tomar as decisões adequadas.
STASS	Stochastic Terminal Arrival Scheduling Software	É um programa computacional que calcula o planeamento dos voos em um determinado conjunto sem efetuar as atualizações periódicas desse planeamento. Dessa forma, o STASS permite melhorar a eficiência da alocação de pistas, por exemplo.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
STMP	Special Traffic Management Program	É um programa implementado quando a capacidade de determinada TMA se encontra próxima do seu limite, permitindo uma agilização de todos os processos envolventes à rotação das aeronaves. A sua aplicação ocorre, na maioria das vezes, quando é verificada a existência de picos específicos devido, por exemplo, a eventos especiais.
SuperSector1	---	É um projeto que se enquadra na análise da criação de hipóteses e soluções para lidarem de forma mais eficiente com os impactos promovidos pelo crescimento do setor, aconselhando uma nova distribuição e divisão dos setores aéreo.
SWIM	System Wide Information Management	É uma ferramenta responsável pela gestão e partilha de informações e dados entre os(as) agentes interessados(as) na gestão do fluxo de tráfego aéreo.
System Wide Modeler	---	É uma ferramenta que foi desenvolvida pelo Centro de Desenvolvimento de Sistemas Avançados de Aviação (CDSAA), designado em inglês por Center for Advanced Aviation System Development (CAASD), e é utilizada no apoio da tomada de decisão, principalmente no contexto da seleção e realização de investimentos, tendo em conta a avaliação de benefícios, a análise de alternativas e a previsão de ocorrência de problemas. A simulação pretendida para auxiliar a tomada de decisão utiliza os recursos disponíveis, como por exemplo, recursos físicos e tecnológicos, de forma a detetar possíveis restrições.
T-TSAFE	Terminal Tactical Separation Assurance Flight Environment	É uma ferramenta que permite detetar e resolver, antecipadamente, possíveis conflitos entre as aeronaves. Através da sua utilização é possível reduzir a taxa de falsos alertas emitidos assim como agilizar a rapidez com que os alertas são transmitidos. A resolução dos possíveis conflitos é obtida através da alteração da rota, sendo que esta ferramenta se diferencia do Tactical Separation Assisted Flight Environment (TSAFE) pelo facto de agir de forma tática.
TAAM	Total Airspace and Airport Modeller	É uma ferramenta de simulação de eventos discretos de forma rápida que analisa todas as fases de voo das aeronaves. Desta forma, é possível gerar cenários cada vez mais realistas para avaliar a eficiência dos voos, a gestão da capacidade, a pontualidade e/ou o atraso das aeronaves e a carga de trabalho alocada aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo.
TACEC	Terminal Area Capacity Enhancing Concept	É um modelo que requer a utilização de tecnologias e procedimentos robustas(os) que necessitam de ser desenvolvidas(os) e avaliadas(os) de forma a que as operações de tráfego aéreo não sejam comprometidas devido às condições meteorológicas adversas.
TACOT	TACtical Operational Tool	É uma ferramenta utilizada para efetuar estudos e análises antes da ocorrência das operações, sendo bastante útil no processo da alocação de *slots* e na previsão da ocorrência de atrasos.
TACT	---	É uma ferramenta tática que normalmente funciona de forma combinada com o CASA de forma a alocar, de forma dinâmica, os *slots* para que as aeronaves possam descolar com base no algoritmo FIFO.
TAF	Terminal Area Forecasts	É uma ferramenta que tem a mesma função do CCFP, apesar de conter especificações particulares, nomeadamente, na antecedência em que esse conjunto de dados é reunido.
TAME	Trajectory Analysis and Modeling Environment	É uma ferramenta que auxilia na automatização das trajetórias de descida das aeronaves com o principal objetivo de reduzir o consumo de combustível nesta fase de voo.
TAP	Terminal Area Productivity	É um projeto criado para investigar as novas tecnologias de avaliação e previsão da ocorrência de vórtices, sendo uma fonte bastante importante para a garantia da segurança e separação das aeronaves.
TAPSS	Terminal Area Precision Scheduling and Spacing	É uma ferramenta com o intuito de aumentar a precisão da previsão fornecida por algumas ferramentas, sendo uma forma de planeamento estratégica e tática baseada nas trajetórias das aeronaves e capaz de prever vários parâmetros, de forma precisa, sobre as fases de voo dentro da TMA.
TATCA	Terminal ATC Automation	É uma ferramenta que auxilia os(as) controladores(as) de tráfego aéreo a lidarem com situações de congestionamento na fase da aterragem e da descolagem em infraestruturas aeroportuárias com elevado fluxo de tráfego aéreo.
TBM	---	É uma ferramenta alternativa, mas eficiente, para a gestão do fluxo de tráfego aéreo, revelando-se bastante prática por atribuir medidas, de acordo com o distanciamento verificado entre as aeronaves.
TCA	Tactical Customer Advocate	É uma ferramenta que é utilizada para facilitar as comunicações entre os(as) agentes recorrendo às novas tecnologias e à *internet*.
TCSDG	Terminal Control Systems Development Group	É um sistema composto por três programas computacionais, nomeadamente, o Landing Order Calculator (LOC), o Speed Control Advisor (SCA) e o Predictive Approach Control Tactical Advisory System (PATCAS).

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
TER	Tower-En-Route	É uma técnica que impede que as aeronaves atinjam o nível de voo planeado quando executam as suas rotas, isto é, viajam sempre a uma altitude inferior à desejada e sempre auxiliadas pelos(as) agentes que coordenam as diferentes áreas do espaço aéreo. Por outro lado, esta técnica é muito benéfica em situações de congestionamento em níveis de voo superiores, fazendo com que não ocorra a acumulação de atrasos para as aeronaves em cadeia.
TFAS	Traffic Flow Automation System	É um sistema que representa uma expansão do CTAS e que permite obter a previsão das trajetórias das aeronaves com base na rota pré-definida pelos planos de voo, à semelhança da função executada pelo ETMS, mas produzindo previsões mais fidedignas por aceder a dados meteorológicos.
TFDM	Terminal Flight Data Management	É uma ferramenta que permite vigiar, de forma constante, os dados relativos às condições meteorológicas, auxiliando dessa forma a tomada de decisão dos(as) agentes no que diz respeito à seleção das medidas mais apropriadas para cada situação. Esta ferramenta tem como intuito gerir as tarefas executadas na superfície das infraestruturas aeroportuárias, assim como as funções desempenhadas pelos(as) agentes envolvidos(as).
TFDM	Tower Flight Data Manager	É uma ferramenta que permite interligar as operações que ocorrem na superfície das infraestruturas aeroportuárias, especialmente quando é verificada alguma restrição.
TFM	Tactical Flow Manager	É um sistema que auxilia os(as) controladores(as) de tráfego aéreo na gestão do fluxo de tráfego aéreo. Através da sua utilização, a operação de uma determinada aeronave é influenciada, positivamente, de forma a evitar situações de congestionamento e/ou possíveis conflitos com outras aeronaves, sendo o seu plano de voo constantemente atualizado.
TFMS	Traffic Flow Management System	É um sistema que permite planear e mitigar os desequilíbrios verificados entre a procura e a capacidade disponibilizada, atribuindo atrasos no solo e alterando rotas de aeronaves para que sobrevoem áreas menos congestionadas.
The Airport Machine	---	É uma ferramenta que permite avaliar a capacidade das infraestruturas aeroportuárias e os atrasos registados, sendo bastante útil para a realização de projetos com o intuito de melhorar alguns parâmetros.
TMAC	---	É uma ferramenta utilizada de forma a avaliar os benefícios que podem ser obtidos através da franca expansão do conceito do voo livre, sendo utilizada principalmente no contexto do espaço aéreo americano. De forma simplificada, esta ferramenta utiliza os planos de voo de uma determinada aeronave, de forma dinâmica e estratégica, para auxiliar na gestão do fluxo de tráfego aéreo e, dessa forma, é capaz de determinar os conflitos e os atrasos decorrentes das operações de tráfego aéreo.
TOPAZ	Traffic Organization and Perturbation AnalyZer	É uma ferramenta de cálculo bastante útil para a segurança das operações de tráfego aéreo porque tem a capacidade de estimar os níveis ótimos de segurança, no que diz respeito à quantidade de acidentes e incidentes em função da capacidade disponível.
TRACC	Taxi Routing for Aircraft: Creation and Controlling	É uma ferramenta proveniente dos estudos desenvolvidos pelo SMAN, tendo a capacidade de gerar trajetórias das aeronaves na superfície das infraestruturas aeroportuárias, evitando a ocorrência de conflitos.
TS	Trajectory Synthesizer	É um programa computacional que gera previsões sobre as operações de tráfego aéreo e que são bastante úteis para o apoio da tomada de decisão dos(as) agentes, representando uma versão aprimorada do DA.
TSAFE	Tactical Separation Assisted Flight Environment	É uma ferramenta criada pela NASA que permite prevenir as falhas que possam decorrer da utilização do AACS, monitorizando a separação entre as aeronaves que não se encontram devidamente equipadas e/ou atualizadas em termos tecnológicos e que, por esse facto, deverão ser controladas de forma manual. Na realidade esta ferramenta foi projetada de forma simplificada, mas garantindo uma elevada fiabilidade para a resolução de conflitos.
TSDI	TFM Surface Data Integration	É uma ferramenta que processa os dados e as informações de diversos sistemas de automatização e vigilância presentes em infraestruturas aeroportuárias, de forma a partilhar esses dados de forma fidedigna e útil para uma melhor gestão do fluxo de tráfego aéreo.
TSS	Terminal Sequencing and Spacing	É uma ferramenta utilizada no espaço aéreo americano e que requer a utilização de vários parâmetros de voo de forma a auxiliar no planeamento e sequenciamento das aeronaves que se aproximam de uma determinada TMA com a intenção de aterrarem.
TSSIM	Traffic-Sensitive Sector Impedance Model	É uma ferramenta que tem em consideração as múltiplas variáveis que afetam a capacidade de uma TMA, de forma a otimizar a sua utilização entre os(as) agentes.

Medidas e/ou Ferramentas		Resumo
Sigla	Significado	
Tunneling	---	É um método que permite o desimpedimento do espaço aéreo a níveis de voo mais elevados para que as aeronaves possam seguir sem encontrarem qualquer tipo de congestionamento devido ao fluxo. Estas aeronaves recebem a informação do(a) controlador(a) de tráfego aéreo para diminuírem a sua altitude em direção à infraestrutura aeroportuária em que pretendem aterrar, formando uma rota semelhante à estrutura de um túnel. Para além de facilitar a passagem de aeronaves que estão em rota para outros destinos diminui também a probabilidade da utilização do AH, não tendo um impacto negativo nos custos da operação.
URET	User Request Evaluation Tool	É uma ferramenta que permite prever a ocorrência de conflitos entre as aeronaves e, dessa forma, resolvê-los atempadamente com base nas informações fornecidas pelos radares e contempladas nos planos de voo. Uma das principais soluções sugeridas pela ferramenta é a proposta automática de rotas alternativas aos(às) controladores(as) de tráfego aéreo.
VAST	Virtual Airspace Simulation Technology	É uma tecnologia que permite a realização da modelação do espaço aéreo de forma virtual originando simulações que auxiliam na avaliação do estado da gestão do fluxo aéreo executada até ao momento. Estas simulações salvaguardarão a segurança e procurarão ser eficientes no que diz respeito aos custos, à flexibilidade e à acessibilidade do modelo de gestão. Adicionalmente, recorrendo a esta ferramenta é possível avaliar o desempenho dos(as) agentes envolvidos(as) nestas tarefas e, consequentemente, após essa análise poderão ser propostas ações de melhoria.
VNAS	Virtual National Airspace Simulation	É um sistema que permite realizar um conjunto de simulações para uma melhor gestão do fluxo de tráfego aéreo, tendo em conta a informação recebida por parte dos(as) agentes. Por outro lado, produz um conjunto de cenários que permite uma análise cuidada, por forma a ser escolhido aquele que melhor respeita as intenções dos(as) agentes e o normal funcionamento das operações de tráfego aéreo.

Anexo B

Identificação da Rede Dinâmica: RD-A

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	405	397	802	6%	38	63
01:00:00	01:59:59	144	155	299	2%		
02:00:00	02:59:59	208	46	254	2%		
03:00:00	03:59:59	487	92	579	4%		
04:00:00	04:59:59	1188	690	1878	14%		
05:00:00	05:59:59	3433	4150	7583	55%		
06:00:00	06:59:59	4883	6613	11496	83%		
07:00:00	07:59:59	6341	6704	13045	89%	40	
08:00:00	08:59:59	6374	6714	13088	89%		
09:00:00	09:59:59	6199	6652	12851	100%	35	
10:00:00	10:59:59	6481	6655	13136	97%	37	
11:00:00	11:59:59	5777	6225	12002	86%	38	
12:00:00	12:59:59	6358	5345	11703	84%		
13:00:00	13:59:59	6359	6620	12979	93%		
14:00:00	14:59:59	6091	6438	12529	88%	39	
15:00:00	15:59:59	6392	6081	12473	90%	38	
16:00:00	16:59:59	5671	6530	12201	88%		
17:00:00	17:59:59	6243	6317	12560	90%		
18:00:00	18:59:59	6383	7030	13413	92%	40	
19:00:00	19:59:59	5504	5998	11502	79%		
20:00:00	20:59:59	5169	5268	10437	84%	34	
21:00:00	21:59:59	6563	4051	10614	76%	38	
22:00:00	22:59:59	5655	3663	9318	67%		
23:00:00	23:59:59	2202	1858	4060	29%		
Total		**110510**	**110292**	**220802**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-B

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	241	289	530	7%	38	63
01:00:00	01:59:59	91	132	223	3%		
02:00:00	02:59:59	153	33	186	2%		
03:00:00	03:59:59	375	70	445	6%		
04:00:00	04:59:59	1067	645	1712	21%		
05:00:00	05:59:59	2263	3665	5928	74%		
06:00:00	06:59:59	3276	4556	7832	98%		
07:00:00	07:59:59	4361	3669	8030	96%	40	
08:00:00	08:59:59	3620	4072	7692	92%		
09:00:00	09:59:59	3996	3839	7835	107%	35	
10:00:00	10:59:59	3840	4023	7863	101%	37	
11:00:00	11:59:59	3415	3888	7303	92%	38	
12:00:00	12:59:59	4149	3261	7410	93%		
13:00:00	13:59:59	3892	4160	8052	101%		
14:00:00	14:59:59	3940	3748	7688	94%	39	
15:00:00	15:59:59	3633	4135	7768	97%	38	
16:00:00	16:59:59	3368	3848	7216	90%		
17:00:00	17:59:59	4256	3995	8251	103%		
18:00:00	18:59:59	3865	4386	8251	98%	40	
19:00:00	19:59:59	2995	3248	6243	74%		
20:00:00	20:59:59	3433	3103	6536	92%	34	
21:00:00	21:59:59	4540	2463	7003	88%	38	
22:00:00	22:59:59	3474	2703	6177	77%		
23:00:00	23:59:59	1061	813	1874	23%		
Total		**69304**	**68744**	**138048**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-C

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	6	1	7	6%	38	63
01:00:00	01:59:59	2	0	2	2%		
02:00:00	02:59:59	0	0	0	0%		
03:00:00	03:59:59	1	0	1	1%		
04:00:00	04:59:59	3	0	3	3%		
05:00:00	05:59:59	22	12	34	30%		
06:00:00	06:59:59	23	44	67	59%		
07:00:00	07:59:59	34	61	95	79%	40	
08:00:00	08:59:59	58	44	102	85%		
09:00:00	09:59:59	48	54	102	97%	35	
10:00:00	10:59:59	44	53	97	87%	37	
11:00:00	11:59:59	45	34	79	69%	38	
12:00:00	12:59:59	45	44	89	78%		
13:00:00	13:59:59	46	41	87	76%		
14:00:00	14:59:59	38	49	87	74%	39	
15:00:00	15:59:59	45	46	91	80%	38	
16:00:00	16:59:59	45	52	97	85%		
17:00:00	17:59:59	36	39	75	66%		
18:00:00	18:59:59	45	52	97	81%	40	
19:00:00	19:59:59	46	61	107	89%		
20:00:00	20:59:59	20	35	55	54%	34	
21:00:00	21:59:59	29	34	63	55%	38	
22:00:00	22:59:59	26	20	46	40%		
23:00:00	23:59:59	20	21	41	36%		
Total		**727**	**797**	**1524**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-D

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	49	58	107	9%	38	63
01:00:00	01:59:59	16	29	45	4%		
02:00:00	02:59:59	18	6	24	2%		
03:00:00	03:59:59	63	11	74	6%		
04:00:00	04:59:59	160	104	264	21%		
05:00:00	05:59:59	352	638	990	79%		
06:00:00	06:59:59	510	783	1293	103%		
07:00:00	07:59:59	695	603	1298	98%	40	
08:00:00	08:59:59	575	624	1199	91%		
09:00:00	09:59:59	649	593	1242	108%	35	
10:00:00	10:59:59	585	630	1215	100%	37	
11:00:00	11:59:59	579	635	1214	97%	38	
12:00:00	12:59:59	695	575	1270	101%		
13:00:00	13:59:59	604	712	1316	105%		
14:00:00	14:59:59	618	609	1227	95%	39	
15:00:00	15:59:59	605	685	1290	103%	38	
16:00:00	16:59:59	566	618	1184	94%		
17:00:00	17:59:59	714	638	1352	108%		
18:00:00	18:59:59	638	738	1376	104%	40	
19:00:00	19:59:59	496	511	1007	76%		
20:00:00	20:59:59	550	457	1007	90%	34	
21:00:00	21:59:59	718	350	1068	85%	38	
22:00:00	22:59:59	585	395	980	78%		
23:00:00	23:59:59	187	117	304	24%		
Total		**11227**	**11119**	**22346**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-E

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	34	29	63	7%	38	63
01:00:00	01:59:59	13	30	43	5%		
02:00:00	02:59:59	20	2	22	2%		
03:00:00	03:59:59	51	2	53	6%		
04:00:00	04:59:59	107	70	177	19%		
05:00:00	05:59:59	298	445	743	78%		
06:00:00	06:59:59	394	560	954	100%		
07:00:00	07:59:59	531	409	940	94%	40	
08:00:00	08:59:59	449	442	891	89%		
09:00:00	09:59:59	489	490	979	112%	35	
10:00:00	10:59:59	469	464	933	101%	37	
11:00:00	11:59:59	416	485	901	95%	38	
12:00:00	12:59:59	497	366	863	91%		
13:00:00	13:59:59	464	514	978	103%		
14:00:00	14:59:59	462	433	895	92%	39	
15:00:00	15:59:59	466	469	935	98%	38	
16:00:00	16:59:59	426	450	876	92%		
17:00:00	17:59:59	530	473	1003	106%		
18:00:00	18:59:59	457	531	988	99%	40	
19:00:00	19:59:59	396	383	779	78%		
20:00:00	20:59:59	430	384	814	96%	34	
21:00:00	21:59:59	551	293	844	89%	38	
22:00:00	22:59:59	449	328	777	82%		
23:00:00	23:59:59	152	94	246	26%		
Total		**8551**	**8146**	**16697**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-F

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	32	35	67	8%	38	63
01:00:00	01:59:59	10	11	21	2%		
02:00:00	02:59:59	23	7	30	3%		
03:00:00	03:59:59	37	16	53	6%		
04:00:00	04:59:59	116	69	185	21%		
05:00:00	05:59:59	274	395	669	77%		
06:00:00	06:59:59	364	504	868	99%		
07:00:00	07:59:59	484	379	863	94%	40	
08:00:00	08:59:59	421	480	901	98%		
09:00:00	09:59:59	443	443	886	110%	35	
10:00:00	10:59:59	435	439	874	103%	37	
11:00:00	11:59:59	379	422	801	92%	38	
12:00:00	12:59:59	463	329	792	91%		
13:00:00	13:59:59	439	439	878	100%		
14:00:00	14:59:59	447	407	854	95%	39	
15:00:00	15:59:59	402	459	861	99%	38	
16:00:00	16:59:59	365	440	805	92%		
17:00:00	17:59:59	473	434	907	104%		
18:00:00	18:59:59	444	444	888	97%	40	
19:00:00	19:59:59	342	383	725	79%		
20:00:00	20:59:59	425	331	756	97%	34	
21:00:00	21:59:59	490	340	830	95%	38	
22:00:00	22:59:59	376	327	703	80%		
23:00:00	23:59:59	132	105	237	27%		
Total		**7816**	**7638**	**15454**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-G

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	25	30	55	8%	38	63
01:00:00	01:59:59	12	11	23	3%		
02:00:00	02:59:59	11	4	15	2%		
03:00:00	03:59:59	33	16	49	7%		
04:00:00	04:59:59	107	55	162	22%		
05:00:00	05:59:59	171	311	482	67%		
06:00:00	06:59:59	270	390	660	91%		
07:00:00	07:59:59	353	324	677	89%	40	
08:00:00	08:59:59	335	364	699	92%		
09:00:00	09:59:59	340	365	705	106%	35	
10:00:00	10:59:59	359	369	728	104%	37	
11:00:00	11:59:59	295	364	659	91%	38	
12:00:00	12:59:59	357	299	656	91%		
13:00:00	13:59:59	344	345	689	95%		
14:00:00	14:59:59	347	354	701	95%	39	
15:00:00	15:59:59	324	379	703	97%	38	
16:00:00	16:59:59	256	356	612	85%		
17:00:00	17:59:59	369	355	724	100%		
18:00:00	18:59:59	331	391	722	95%	40	
19:00:00	19:59:59	245	308	553	73%		
20:00:00	20:59:59	294	315	609	94%	34	
21:00:00	21:59:59	374	237	611	85%	38	
22:00:00	22:59:59	309	252	561	78%		
23:00:00	23:59:59	94	107	201	28%		
Total		**5955**	**6301**	**12256**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-H

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	22	23	45	3%	38	63
01:00:00	01:59:59	7	3	10	1%		
02:00:00	02:59:59	7	3	10	1%		
03:00:00	03:59:59	24	2	26	2%		
04:00:00	04:59:59	24	14	38	3%		
05:00:00	05:59:59	269	113	382	30%		
06:00:00	06:59:59	405	514	919	71%		
07:00:00	07:59:59	501	658	1159	85%	40	
08:00:00	08:59:59	667	653	1320	97%		
09:00:00	09:59:59	517	622	1139	96%	35	
10:00:00	10:59:59	617	646	1263	100%	37	
11:00:00	11:59:59	579	520	1099	85%	38	
12:00:00	12:59:59	510	469	979	76%		
13:00:00	13:59:59	575	571	1146	89%		
14:00:00	14:59:59	499	574	1073	81%	39	
15:00:00	15:59:59	678	402	1080	84%	38	
16:00:00	16:59:59	538	559	1097	85%		
17:00:00	17:59:59	536	545	1081	84%		
18:00:00	18:59:59	553	607	1160	85%	40	
19:00:00	19:59:59	627	644	1271	93%		
20:00:00	20:59:59	355	495	850	74%	34	
21:00:00	21:59:59	488	386	874	68%	38	
22:00:00	22:59:59	482	195	677	52%		
23:00:00	23:59:59	228	207	435	34%		
Total		**9708**	**9425**	**19133**			

Identificação da Rede Dinâmica: RD-I

Período Horário		Quantidade de Movimentos			Taxa de Ocupação (%)	Limite de Movimentos por Hora da ANA Aeroportos	Capacidade na Aproximação
Inicial	Final	Aterragens	Descolagens	Total			
00:00:00	00:59:59	58	29	87	15%	38	63
01:00:00	01:59:59	22	14	36	6%		
02:00:00	02:59:59	7	3	10	2%		
03:00:00	03:59:59	17	8	25	4%		
04:00:00	04:59:59	14	11	25	4%		
05:00:00	05:59:59	97	34	131	23%		
06:00:00	06:59:59	169	172	341	60%		
07:00:00	07:59:59	179	276	455	76%	40	
08:00:00	08:59:59	250	248	498	83%		
09:00:00	09:59:59	233	238	471	90%	35	
10:00:00	10:59:59	256	261	517	93%	37	
11:00:00	11:59:59	249	243	492	86%	38	
12:00:00	12:59:59	230	228	458	80%		
13:00:00	13:59:59	251	258	509	89%		
14:00:00	14:59:59	239	274	513	88%	39	
15:00:00	15:59:59	267	229	496	87%	38	
16:00:00	16:59:59	244	254	498	87%		
17:00:00	17:59:59	233	232	465	82%		
18:00:00	18:59:59	235	260	495	83%	40	
19:00:00	19:59:59	272	245	517	86%		
20:00:00	20:59:59	206	222	428	84%	34	
21:00:00	21:59:59	203	214	417	73%	38	
22:00:00	22:59:59	216	137	353	62%		
23:00:00	23:59:59	142	108	250	44%		
Total		**4289**	**4198**	**8487**			

Folha em branco

Anexo C

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Aeropro Eurofox 2K	1
Aerospatiale/Alenia ATR 72	1
Aerospatiale ATR 42-300	59
Aerospatiale ATR 42-300F	168
Aerospatiale ATR 42-300QC	40
Aerospatiale ATR 42-320F	2
Aerospatiale ATR 42-500	1
Aerospatiale ATR 72-201	114
Aerospatiale ATR 72-202	5
Aerospatiale ATR 72-202F	21
Aerospatiale ATR 72-202QC	94
Aerospatiale ATR 72-211F	4
Aerospatiale ATR 72-212A	109
Aerospatiale ATR 72-600	6893
Aerospool WT9 Dynamic	1
Agusta-Bell AB139	23
AgustaWestland AW109E Power	5
AgustaWestland AW109S Grand	22
AgustaWestland AW109SP GrandNew	6
AgustaWestland AW139	10
AgustaWestland AW169	2
Airbus A220-300	186
Airbus A300B4-622R(F)	27
Airbus A310-304	1
Airbus A310-304(ET)	32
Airbus A310-308(ET)	115
Airbus A318-111	46
Airbus A319-111	27866
Airbus A319-112	5991
Airbus A319-114	19
Airbus A319-115LR	36
Airbus A319-115X CJ	2
Airbus A319-132	177
Airbus A319-133X CJ	4
Airbus A319-133X CJ (VC-1A)	2
Airbus A320	34
Airbus A320-211	392
Airbus A320-212	5
Airbus A320-214	48645
Airbus A320-214CJ Prestige	2
Airbus A320-216	427
Airbus A320-231	12
Airbus A320-232	4599
Airbus A320-233	14
Airbus A320-251N	7915
Airbus A320-271N	480
Airbus A321-111	561
Airbus A321-131	618
Airbus A321-211	5646
Airbus A321-212	2847
Airbus A321-213	147
Airbus A321-231	6453
Airbus A321-232	85
Airbus A321-251N	6746
Airbus A321-251NX	2558
Airbus A321-251NX/LR	235
Airbus A321-251NXLR	19
Airbus A321-253N	610
Airbus A321-253NX/LR	100
Airbus A321-271NX	587
Airbus A321-271NX/LR	24
Airbus A321-271NXLR	26
Airbus A321neo	13
Airbus A330-200	1
Airbus A330-202	3177
Airbus A330-203	508
Airbus A330-223	1731

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Airbus A330-243	1484
Airbus A330-300	2
Airbus A330-302	3
Airbus A330-303	9
Airbus A330-322	8
Airbus A330-342	14
Airbus A330-343	312
Airbus A330-343E	804
Airbus A330-343X	14
Airbus A330-900neo	1
Airbus A330-941	5557
Airbus A340-211	16
Airbus A340-300	10
Airbus A340-312	1567
Airbus A340-313	177
Airbus A340-313X	129
Airbus A340-642	31
Airbus A340-642X	2
Airbus A350-941	41
Airbus A380-841	2
Airbus A380-861	1
Airbus A400M-180	2
American General AG-5B Tiger	1
Antonov An-12BP	3
Antonov An-26B	2
Aquila A211G	1
Aveko VL-3A Sprint	1
Basler BT-67 Turbo 67	2
Beech 1900D	1
Beech 200 Super King Air	7
Beech 76 Duchess	2
Beech B200 Super King Air	5
Beech C-12V-1 Huron	2
Beech C90GTi King Air	1
Beech G36 Bonanza	1
Beech G58 Baron	1
Beechjet 400	1
Beechjet 400A	51
Bell 206B-3 JetRanger III	1
Bell 412EP	1
Bell 429 GlobalRanger	1
Boeing 717-2BL	7
Boeing 737-300	1
Boeing 737-31S	3
Boeing 737-322	24
Boeing 737-36EF	2
Boeing 737-36Q	4
Boeing 737-382	95
Boeing 737-3H4	4
Boeing 737-3H9	4
Boeing 737-3L9	2
Boeing 737-3Y0	10
Boeing 737-405	2
Boeing 737-406	1
Boeing 737-436	1
Boeing 737-43QF	4
Boeing 737-45DF	3
Boeing 737-46JF	1
Boeing 737-476F	4
Boeing 737-48EF	3
Boeing 737-48ESF	43
Boeing 737-490	22
Boeing 737-490(F)	13
Boeing 737-490F	37
Boeing 737-490SF	16
Boeing 737-49RF	3
Boeing 737-4K5F	1
Boeing 737-4M0	44
Boeing 737-4M0F	44
Boeing 737-4Q8	7
Boeing 737-4Q8F	134

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Boeing 737-4Y0	1
Boeing 737-4Y0F	2
Boeing 737-4Z9F	12
Boeing 737-505	14
Boeing 737-522	1
Boeing 737-524	7
Boeing 737-530	14
Boeing 737-548	2
Boeing 737-5L9	30
Boeing 737-5Q8	2
Boeing 737-600	4
Boeing 737-6D6	56
Boeing 737-6H3	47
Boeing 737-700	1
Boeing 737-705	6
Boeing 737-71B	8
Boeing 737-73A	15
Boeing 737-73S	21
Boeing 737-73U BBJ	7
Boeing 737-73V	3
Boeing 737-76N	19
Boeing 737-783	49
Boeing 737-79L	2
Boeing 737-7B6	73
Boeing 737-7BC BBJ	4
Boeing 737-7BX	3
Boeing 737-7C9	226
Boeing 737-7D6C	60
Boeing 737-7K2	543
Boeing 737-7K5	6
Boeing 737-7Q8	2
Boeing 737-8	33
Boeing 737-800	9
Boeing 737-800WL	6252
Boeing 737-804	99
Boeing 737-808	1
Boeing 737-81D	2
Boeing 737-81Q	22
Boeing 737-82R	123
Boeing 737-83N	5
Boeing 737-84P	246
Boeing 737-858	32
Boeing 737-85F	24
Boeing 737-85H	209
Boeing 737-85P	553
Boeing 737-85R	39
Boeing 737-86J	195
Boeing 737-86N	217
Boeing 737-86Q	26
Boeing 737-883	17
Boeing 737-8AS	15099
Boeing 737-8B6	707
Boeing 737-8BK	70
Boeing 737-8C9	43
Boeing 737-8CX	14
Boeing 737-8D6	73
Boeing 737-8EH	11
Boeing 737-8F2	233
Boeing 737-8FH	8
Boeing 737-8FN	4
Boeing 737-8FZ	12
Boeing 737-8GJ	220
Boeing 737-8GP	10
Boeing 737-8GQ	10
Boeing 737-8HX	56
Boeing 737-8JP	384
Boeing 737-8K2	3392
Boeing 737-8K5	289
Boeing 737-8LJ	264
Boeing 737-8LX BBJ2	2
Boeing 737-8MG	2

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Boeing 737-8Q8	171
Boeing 737-8S3	1
Boeing 737-8Z9	5
Boeing 737-8ZE BBJ2	2
Boeing 737-8ZQ	18
Boeing 737-932ER	1
Boeing 737-958ER	78
Boeing 737-9F2ER	36
Boeing 737-9GJER	2
Boeing 737-9K2	187
Boeing 737-CBK	39
Boeing 747-406ERF	1
Boeing 747-406M	1
Boeing 747-409F	1
Boeing 747-4B5	2
Boeing 747-4H6	1
Boeing 747-8R7F	2
Boeing 757-204	2
Boeing 757-208	469
Boeing 757-222SF	3
Boeing 757-223	4
Boeing 757-223SF	10
Boeing 757-224	389
Boeing 757-231	259
Boeing 757-232	1
Boeing 757-236	186
Boeing 757-236SF	5
Boeing 757-23A	1
Boeing 757-23N	2
Boeing 757-23NSF	30
Boeing 757-251	12
Boeing 757-256	19
Boeing 757-256SF	2
Boeing 757-26D	189
Boeing 757-27B	4
Boeing 757-28A	5
Boeing 757-28ASF	85
Boeing 757-2J4ER	2
Boeing 757-2K2	5
Boeing 757-2Q8	317
Boeing 757-2Q8F	75
Boeing 757-2Q8SF	388
Boeing 757-330	1
Boeing 757-3CQ	2
Boeing 767-204SF	10
Boeing 767-219SF	27
Boeing 767-232SF	31
Boeing 767-25ESF	401
Boeing 767-2AXER	2
Boeing 767-300	7
Boeing 767-304ER	3
Boeing 767-316ER	648
Boeing 767-322ER	230
Boeing 767-323ER	384
Boeing 767-332ER	29
Boeing 767-333ER	130
Boeing 767-33AER	84
Boeing 767-346ERF	4
Boeing 767-34P	7
Boeing 767-34PER	510
Boeing 767-35DER	21
Boeing 767-35HER	44
Boeing 767-36NER	403
Boeing 767-36NERSF	2
Boeing 767-375ER	79
Boeing 767-38EER	27
Boeing 767-3N6ER	2
Boeing 767-3Q8ER	16
Boeing 767-424ER	361
Boeing 767-432ER	8
Boeing 777-212ER	20

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Boeing 777-21HLR	36
Boeing 777-236ER	4
Boeing 777-246ER	4
Boeing 777-258ER	4
Boeing 777-2FBLR	2
Boeing 777-2M2ER	9
Boeing 777-300ER	108
Boeing 777-31HER	1087
Boeing 777-36NER	147
Boeing 777-3DZER	2
Boeing 777-3M2ER	1444
Boeing 787-8	405
Boeing 787-9	1
Boeing C-17A Globemaster III	7
Boeing C-32A	4
Boeing C-40A Clipper	4
Boeing C-40B	5
Boeing C-40C	1
Boeing CH-47D Chinook	1
Bombardier BD-100-1A10 Challenger 300	29
Bombardier BD-100-1A10 Challenger 350	100
Bombardier BD-500-1A10 CS100	38
Bombardier BD-500-1A11 CS300	352
Bombardier BD-700-1A10 Global 6000	166
Bombardier BD-700-1A10 Global Express	53
Bombardier BD-700-1A10 Global Express XRS	40
Bombardier BD-700-1A11 Global 5000	39
Bombardier CL-600-2E25 Regional Jet CRJ-1000	208
British Aerospace AVRO 146-RJ100	3
British Aerospace AVRO 146-RJ85	3
British Aerospace BAe 146-300QT	4
British Aerospace BAe-125 Series 1000A	2
British Aerospace BAe-125 Series 800A	2
British Aerospace BAe-125 Series 800B	1
British Aerospace Jetstream 3212	4
British Aerospace Jetstream 4100	2
BRM Aero Bristell NG5 SpeedWing	1
BRM Land Africa	3
Canadair CL-600-2B16 Challenger 604	37
Canadair CL-600-2B16 Challenger 605	59
Canadair CL-600-2B16 Challenger 650	21
Canadair CL-600-2B19 Challenger 850	28
Canadair CL-600-2B19 Regional Jet CRJ-200ER	10
Canadair CL-600-2B19 Regional Jet CRJ-200LR	1
Canadair CL-600-2D24 Regional Jet CRJ-900LR	4
Canadair Regional Jet 1000	1
CASA 295M	17
CASA 295MPA	5
Cessna 152	151
Cessna 172H Skyhawk	1
Cessna 172N Skyhawk 100	1
Cessna 172P Skyhawk	1
Cessna 172R Skyhawk	28
Cessna 172S Skyhawk SP	1
Cessna 182P Skylane	1
Cessna 182Q Skylane	1
Cessna 182T Skylane	3
Cessna 208 Caravan	1
Cessna 208B Grand Caravan	3
Cessna 208B Super Cargomaster	6
Cessna 340A	1
Cessna 402B	6
Cessna 404 Titan	1
Cessna 421C Golden Eagle	2
Cessna 501 Citation I/SP	2
Cessna 510 Citation Mustang	13
Cessna 525 Citation M2	9
Cessna 525 CitationJet	2
Cessna 525 CitationJet CJ1	11
Cessna 525 CitationJet CJ1+	4
Cessna 525A CitationJet CJ2	22

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Cessna 525A CitationJet CJ2+	11
Cessna 525B CitationJet CJ3	39
Cessna 525B CitationJet CJ3+	7
Cessna 525C CitationJet CJ4	22
Cessna 550 Citation Bravo	10
Cessna 550 Citation II	10
Cessna 550 Citation S/II	2
Cessna 560 Citation V	2
Cessna 560XL Citation Excel	6
Cessna 560XL Citation XLS	100
Cessna 560XL Citation XLS+	56
Cessna 650 Citation III	2
Cessna 650 Citation VII	2
Cessna 680 Citation Sovereign	8
Cessna 680+ Citation Sovereign	8
Cessna 680A Citation Latitude	62
Cessna 750 Citation X	9
Cessna T206H Turbo Stationair	2
Cessna U206F Stationair	1
Cessna UC-35A-1 Citation Ultra	2
Cirrus SR20	3
Cirrus SR22	2
Cirrus SR22T	2
CSA PS-28 Cruiser	1
CSA SportCruiser	2
Dassault Falcon 100	1
Dassault Falcon 10MER	1
Dassault Falcon 2000	18
Dassault Falcon 2000EX	6
Dassault Falcon 2000EX EASy	61
Dassault Falcon 2000LX	38
Dassault Falcon 2000S	4
Dassault Falcon 20C	3
Dassault Falcon 20DC	6
Dassault Falcon 50	14
Dassault Falcon 7X	80
Dassault Falcon 8X	8
Dassault Falcon 900	7
Dassault Falcon 900B	6
Dassault Falcon 900DX	2
Dassault Falcon 900EX	11
Dassault Falcon 900EX EASy	9
Dassault Falcon 900LX	3
Dassault-Dornier Alpha Jet E	1
De Havilland Canada DHC-8-Q402 Dash 8	10
Diamond DA 40 D Star	7
Diamond DA 40 NG Star	6
Diamond DA 42 M MPP Guardian	1
Diamond DA 42 M Twin Star	1
Diamond DA 42 M-NG MPP Guardian	1
Diamond DA 42 M-NG Twin Star	1
Diamond DA 42 NG Twin Star	2
Diamond DA 42 Twin Star	18
Diamond DA 62	4
Diamond DA20-C1 Eclipse	2
Diamond HK36TC Super Dimona	1
Dornier 228-212	9
Dornier 328-310 JET	7
Dornier Do-28G-92 Skyservant	1
Eclipse Aerospace EA500	1
Embraer 170-100LR	2
Embraer 170-100STD	2
Embraer 170-100SU	1
Embraer 170-200STD-175STD	3
Embraer 190-100AR	36
Embraer 190-100LR	8358
Embraer 190-100STD	9
Embraer 190-200AR-195AR	4844
Embraer 190-200LR-195LR	2571
Embraer 190-300STD-E2	1
Embraer 190-400STD	1

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Embraer 190-400STD E2	5
Embraer 195	250
Embraer EMB 500 Phenom 100	8
Embraer EMB 505 Phenom 300	108
Embraer EMB 545 Legacy 450	6
Embraer EMB 550 Legacy 500	12
Embraer ERJ 135BJ Legacy 600	23
Embraer ERJ 135BJ Legacy 650	44
Embraer ERJ 135LR	1
Embraer ERJ 145EP	10
Embraer ERJ 145EU	1
Embraer ERJ 145LU	5
Embraer ERJ 145MP	1
Embraer KC-390	1
Embraer Lineage 1000	8
Embraer VC-2B	2
Embraer VC-99B	3
Embraer VC-99C	1
Eurocopter AS350 B2 Ecureuil	1
Eurocopter AS350 B3 Ecureuil	2
Eurocopter AS350 B3e Ecureuil	1
Eurocopter AS355 N Ecureuil 2	1
Eurocopter AS365 N3 Dauphin 2	2
Eurocopter EC120 B Colibri	1
Eurocopter EC130 B4	1
Eurocopter EC130 T2	1
Eurocopter EC135 P2	1
Eurocopter EC135 P2+	1
Eurocopter EC135 T2	1
Eurocopter EC135 T2+	1
Eurocopter Juno HT1	1
Eurocopter Jupiter HT1	1
Europa Aviation Europa XS	1
Flight Design CTLS	2
Fokker 100	14
Fuji FA-200-160 Aero Subaru	1
GippsAero GA8 Airvan	2
GippsAero GA8-TC 320 Airvan	1
Glasflugel H201B Standard Libelle	1
Glasflugel Standard Libelle 201 B	1
Grob G 102 Astir Jeans	2
Grob G 109B	1
Grob G 115E Tutor T1	16
Gulfstream Aerospace C-37A	15
Gulfstream Aerospace G100	3
Gulfstream Aerospace G150	6
Gulfstream Aerospace G200	44
Gulfstream Aerospace G280	2
Gulfstream Aerospace G-IV	13
Gulfstream Aerospace G-IV (G400)	1
Gulfstream Aerospace G-IV-SP	21
Gulfstream Aerospace GIV-X (G350)	2
Gulfstream Aerospace GIV-X (G450)	105
Gulfstream Aerospace GV	17
Gulfstream Aerospace GVI (G650)	70
Gulfstream Aerospace GVI (G650ER)	6
Gulfstream Aerospace GVII-G500	8
Gulfstream Aerospace GV-SP (G550)	101
Hawker 400XP	15
Hawker Beechcraft 4000	1
Helicopters Guimbal Cabri G2	4
Ikarus C42 FB100 Bravo	4
Ikarus C42 FB80	1
Ilyushin Il-96-300	2
Ilyushin IL-96-300PU	2
Ilyushin IL-96PU(M1)	2
Israel IAI-1125A Astra SPX	1
Jodel D-117	1
Learjet 35A	15
Learjet 36A	4
Learjet 40	18

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Learjet 45	57
Learjet 55	1
Learjet 60	4
Learjet 75	16
Learjet C-21A	4
Lockheed 100-30 Hercules	2
Lockheed C-130H Hercules	5
Lockheed C-130H-30 Hercules	3
Lockheed C-130J-30 Hercules	4
Lockheed CC-130J Hercules	4
Lockheed KC-130H Hercules	2
Lockheed KC-130J Hercules	2
McDonnell Douglas MD-11F	2
McDonnell Douglas MD-82	16
McDonnell Douglas MD-83	1
McDonnell Douglas MD-90-30	1
MD Helicopters MD 900 Explorer	6
MD Helicopters MD 902 Explorer	1
Mooney M20J 201	1
Mooney M20K 231	1
Partenavia P 68B	2
Piaggio P-180 Avanti II	11
Piaggio VC-180A Avanti	1
Pilatus PC-12	1
Pilatus PC-12/47E	14
Pilatus PC-21	2
Pilatus PC-24	13
Pilatus PC-6/B2-H4 Turbo Porter	2
Piper PA-28-151 Cherokee Warrior	1
Piper PA-28-161 Warrior II	7
Piper PA-28-161 Warrior III	19
Piper PA-28-180 Challenger	1
Piper PA-28-181 Archer II	1
Piper PA-28-181 Archer III	1
Piper PA-28R-180 Arrow	1
Piper PA-28R-201 Arrow III	2
Piper PA-28RT-201T Turbo Arrow IV	2
Piper PA-31-300 Navajo	1
Piper PA-31-350 Navajo Chieftain	1
Piper PA-32R-301 Saratoga II HP	1
Piper PA-34-200T Seneca II	1
Piper PA-34-220T Seneca III	1
Piper PA-34-220T Seneca IV	1
Piper PA-34-220T Seneca V	1
Piper PA-42 Cheyenne III	2
Pipistrel Alpha BCAR-S 164	1
Pipistrel Alpha Trainer	1
Raytheon 390 Premier 1	1
Raytheon 390 Premier 1A	2
Raytheon Hawker 750	19
Raytheon Hawker 800XP	15
Raytheon Hawker 850XP	3
Raytheon Hawker 900XP	5
Reims F152	3
Reims F172M Skyhawk	1
Reims F172N Skyhawk 100	3
Reims F172P Skyhawk	1
Reims F406 Caravan II	2
Reims FA152 Aerobat	1
Reims FR172K Hawk XP	1
Robin DR 400/140B Major	4
Robin DR 400/180 Regent	2
Robin HR 200-120B	3
Robin R 2160 Acrobin	1
Robinson R44 Astro	1
Robinson R44 Clipper II	2
Robinson R44 Raven	1
Robinson R44 Raven II	1
Robinson R66 Turbine	4
Rolladen-Schneider LS-4B	1
Saab 2000	2

Tipo de Aeronave	Frequência de Operação
Saab 340A	2
Saab 340A(F)	7
Saab 340A(QC)	2
Schempp-Hirth Ventus 2cT	1
Schleicher ASK-21	2
Several Different Aircraft	5
Slingsby T-67M Firefly Mk II	1
SOCATA TB10 Tobago	3
SOCATA TB20 Trinidad	3
SOCATA TB20 Trinidad GT	1
SOCATA TBM 700B	1
SOCATA TBM 850	2
SOCATA TBM 930	2
Swearingen C-26D Metro 23	5
Swearingen SA227-BC Metro III	2
Taylorcraft J Auster Mk5A/160	1
Techpro Aviation Merlin 100UL	1
Tecnam P2002-JF Sierra	2
Tecnam P2006T	1
Tecnam P2008 JC	11
Tecnam P2010	1
TL Ultralight TL-96 Star	2
Tupolev Tu-214PU	2
Van's RV-6	1
Van's RV-6A	1
Van's RV-7A	1
Van's RV-8	1
Vulcanair P 68C-TC	1
WDFL Dallach D 4 Fascination	1
Zlin Z-143L	1
Aeronaves Não Identificadas	12682