

**Previsão de Fluxos Aéreos nas Áreas
Terminais de Voo com Base em Cadeias de
Markov**
(Versão Corrigida Após Defesa)

André Manuel Martins Almeida Campos Lopes

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Aeronáutica
(Ciclo de Estudos Integrado)

Orientador: Prof. Doutor Kouamana Bousson

julho de 2023

Declaração de Integridade

Eu, André Manuel Martins Almeida Campos Lopes, que abaixo assino, estudante com o número de inscrição 40227 de/o Mestrado Integrado em Engenharia Aeronáutica da Faculdade Engenharias, 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 assim assumo na íntegra as responsabilidades da autoria.

Universidade da Beira Interior, Covilhã 31/07/2023

André Lopes

Dedicatória

Dedico à minha família.

Agradecimentos

Em primeiro lugar quero agradecer aos meus pais, pela confiança, por toda a ajuda e por me apoiarem em todas as decisões deste meu percurso académico. Agradeço também aos meus irmãos e aos meus avós por me apoiarem sempre. Obrigado, sem vocês isto não seria possível, foram essenciais. Muito Obrigado.

Ao meu orientador, Prof. Doutor Kouamana Bousson, por me ter ajudado e partilhado todos os seus conhecimentos. Agradeço-lhe pelos bons momentos e pela boa disposição que sempre demonstrou comigo. Obrigado.

Por último, quero agradecer a todos os meus amigos, tanto aos que trago comigo desde sempre como aos que encontrei na Covilhã, nesta terra que vai deixar saudades. Obrigado por me ajudarem e principalmente por me acompanharem durante todos estes anos.

Resumo

No decorrer destes últimos anos tem havido um enorme aumento na procura de serviços de aviação, levando a que alguns aeroportos atinjam um determinado nível de saturação. Tanto o setor de controlo de tráfego aéreo, como a infraestrutura aeroportuária enfrentam limitações de capacidade. Contudo, o principal problema está relacionado com a gestão inadequada dos recursos disponíveis, especialmente no que diz respeito ao espaço aéreo.

Esta dissertação foca-se no desenvolvimento e avaliação de um modelo de previsão de fluxos aéreos nas Áreas Terminais de Voo (Terminal Manoeuvring Areas - TMA's) utilizando o conceito de cadeias de Markov. As TMA's são espaços aéreos circundantes de um aeroporto, altamente congestionados e complexos. A previsão precisa dos fluxos de tráfego nestas zonas terminais é essencial para garantir a segurança e eficiência do sistema de controlo de tráfego aéreo. Como se tratam de zonas de convergência, é necessário existir um limite de capacidade dependendo do aeroporto e, por essa razão, é fundamental a previsão do fluxo, permitindo que o serviço de controlo aéreo da TMA possa elaborar as estratégias táticas de modo a impedir o congestionamento.

Nesta dissertação, propõe-se o uso de cadeias de Markov como uma abordagem para modelar e prever os fluxos aéreos nas TMA's. As cadeias de Markov são processos estocásticos que descrevem a evolução de um sistema de estados discretos, onde a probabilidade de transição entre estados depende somente do estado atual. Esta propriedade torna as cadeias de Markov adequadas para modelar sistemas com comportamento dinâmico e aleatório, como o caso do tráfego aéreo. Para desenvolver o modelo de previsão, utilizaram-se dados históricos de tráfego aéreo nas zonas terminais de Lisboa, de modo a construir uma matriz de transição de estados, que descreve as probabilidades de transição entre os estados do sistema, que representam as diferentes configurações de fluxos de tráfego aéreo nas TMA's.

Os resultados obtidos sugerem que o modelo de previsão desenvolvido baseado nas cadeias de Markov é eficaz na previsão de fluxos aéreos nas TMA's. Foram efetuadas tanto a previsão do número de chegadas de aeronaves em intervalos de uma hora como a previsão em observações de apenas meia hora. Posto isto, foi realizada a análise do estado permanente da rede, foi efetuada a previsão do próximo estado em apenas um passo e posteriormente foi feita a previsão em n -passos. Os resultados possibilitaram identificar o estado mais provável, o estado considerado mais crítico. Desta forma, foi possível analisar as consequências que os resultados podem trazer à administração do aeroporto, resultando ou não no planeamento do aumento da sua capacidade de modo a evitar a possibilidade de saturação.

Por fim, esta dissertação demonstra que as cadeias de Markov constituem uma abordagem viável para a previsão de fluxos aéreos nas TMA's. O modelo proposto demonstra potencial para ser aplicado em sistemas reais de controlo de tráfego aéreo, oferecendo benefícios significativos para a indústria da aviação em termos de eficiência operacional e segurança. No entanto, são necessárias pesquisas e desenvolvimentos adicionais para aperfeiçoar e adaptar o modelo em outras áreas terminais, em diferentes aeroportos.

Palavras-chave

Tráfego Aéreo; Capacidade do Espaço Aéreo; Previsão de Fluxo; Área Terminal de Voo;
Cadeias de Markov

Abstract

Over the past few years there has been a huge increase in demand for aviation services, leading to some airports reaching a certain level of saturation. Both the air traffic control industry and the airport infrastructure are facing capacity constraints. However, the main problem is related to the inadequate management of available resources, especially with regard to airspace.

This dissertation focuses on the development and evaluation of a model to predict airflows in Terminal Manoeuvring Areas (TMA's) using the concept of Markov chains. TMA's are airspaces surrounding an airport that are highly congested and complex. Accurate prediction of traffic flows in these terminal areas is essential to ensure the safety and efficiency of the air traffic control system. As these are convergence zones, there needs to be a capacity limit depending on the airport, and for this reason flow forecasting is essential, allowing the TMA air traffic control service to devise tactical strategies in order to prevent congestion.

In this dissertation, the use of Markov chains is proposed as an approach to model and predict air flows in TMA's. Markov chains are stochastic processes that describe the evolution of a system of discrete states, where the probability of transition between states depends only on the current state. This property makes Markov chains suitable for modeling systems with dynamic and random behavior, such as air traffic. To develop the prediction model, historical air traffic data was used in Lisbon's terminal zones, in order to build a state transition matrix, which describes the transition probabilities between states of the system, which represent the different configurations of air traffic flows in the TMA's.

The results obtained suggest that the developed prediction model based on Markov chains is effective in predicting airflows in TMA's. Both the prediction of the number of aircraft arrivals in one-hour intervals and the prediction in half-hour observations were performed. Then, the permanent state of the network was analyzed, the next state was predicted in a single step, and then the next state was predicted in n steps. The results made it possible to identify the most likely state, the state considered most critical. In this way, it was possible to analyze the consequences that the results may bring to the airport management, resulting or not in planning to increase its capacity in order to avoid the possibility of saturation.

Finally, this dissertation demonstrates that Markov chains constitute a viable approach for predicting airflows in TMA's. The proposed model shows potential to be applied in real air traffic control systems, offering significant benefits to the aviation industry in terms of operational efficiency and safety. However, further research and development is needed to refine and adapt the model in other terminal areas at different airports.

Keywords

Air Traffic; Airspace Capacity; Flow Forecasting; Terminal Manoeuvring Area; Markov Chains

Índice

1	Introdução	1
1.1	Perspetiva Atual do Setor Aeronáutico	1
1.2	Estado Atual do Sistema ATM	2
1.3	Descrição do Problema de Gestão	5
1.4	Céu Único Europeu e o Projeto SESAR	6
1.5	Métodos Usuais Para a Previsão de Fluxo	8
1.5.1	Método Euleriano.....	8
1.5.1.1	Modelo de Fluxo Agregado	9
1.5.1.2	Modelo de Fluxo Euleriano.....	10
1.5.2	Método Bayesiano	11
1.5.2.1	Preditores de Componentes.....	11
1.5.2.1.1	ARIMA.....	11
1.5.2.1.2	Redes Neurais de Retro-Propagação	12
1.5.2.1.3	Filtragem de Kalman.....	13
1.5.2.2	BCM Tradicional e Novo BCM.....	14
1.5.3	Método Dinâmico	15
1.5.3.1	Rede Dinâmica para o Fluxo de Tráfego em Rota	16
1.5.4	Limitações	17
1.6	Objetivos da Dissertação.....	18
1.7	Visão Geral da Dissertação	18
2	Espaço Aéreo	20
2.1	Classes do Espaço Aéreo	20
2.2	Espaço Aéreo Português	22
3	Princípios das Cadeias de Markov.....	34
3.1	Introdução	34
3.1.1	Cadeias de Markov em Tempo Discreto	34
3.1.1.1	Matriz de Probabilidade de Transição.....	35
3.1.1.2	Probabilidades de Transição em n -Passos.....	36
3.1.2	Classificação dos Estados	36
3.1.2.1	Periodicidade	38
3.1.3	Comportamento em Estado Estacionário	39
3.1.3.1	Teorema da Convergência do Estado Estacionário	39
3.1.3.2	Interpretações de frequência a Longo Prazo	39
3.1.4	Probabilidades de Absorção e Tempo Esperado Para a Absorção	40
3.1.4.1	Tempo Esperado Para a Absorção	41

4	Modelação do Fluxo de Tráfego Aéreo.....	43
4.1	Conceitos Gerais	43
4.2	Modelação do Fluxo de Tráfego Aéreo	45
4.3	Previsão (<i>Forecasting</i>).....	47
4.4	Estado Permanente da Rede.....	50
5	Simulações.....	53
5.1	Estudo do Fluxo no Aeroporto de Lisboa	53
5.1.1	Observações de Uma Hora.....	53
5.1.2	Observações de Meia Hora.....	57
5.1.3	Previsão do Próximo Estado.....	60
5.1.4	Previsão em n -Passos	62
6	Conclusão	65
	Bibliografia	67

Lista de Figuras

Figura 1.1: Divisão do espaço aéreo europeu em FAB's [9].....	7
Figura 1.2: Representação do espaço aéreo sobre Lisboa [11]	7
Figura 1.3: Componentes do fluxo de aeronaves que contribuem para a contagem de tráfego num dado Centro [13]	10
Figura 1.4: Estrutura da rede neuronal de retro-propagação [20]	13
Figura 1.5: Rede dinâmica para o fluxo de tráfego em rota [23].....	16
Figura 2.1: Diferentes Classes do Espaço Aéreo [27]	22
Figura 2.2: FIR de Lisboa e Santa Maria [28].....	23
Figura 2.3: FIR's que fazem fronteira com as portuguesas [28].....	23
Figura 2.4: TMA de Lisboa [30]	26
Figura 2.5: TMA do Porto [30].....	27
Figura 2.6: CTR de Lisboa [30]	28
Figura 2.7: CTR do Porto [30].....	28
Figura 2.8: Zonas do Espaço Aéreo de Lisboa [31]	29
Figura 2.9: Zonas do Espaço Aéreo do Porto [31].....	30
Figura 2.10: ATZ de Viseu [30]	31
Figura 2.11: TRMZ da Horta [30].....	32
Figura 2.12: Zonas perigosas, restritas, temporariamente reservadas e proibidas em Portugal Continental no dia 30 de março de 2022 [31]	33
Figura 2.13: Ampliação da Zona proibida em Portugal Continental no dia 30 de março de 2022 [31].....	33
Figura 3.1: Classificação dos estados dado o gráfico de probabilidade de transição [36]	37
Figura 3.2: Interpretação das equações de equilíbrio em termos de frequências [36]..	40
Figura 4.1: Nível de ocupação do aeroporto durante três dias.....	43
Figura 4.2: Diagrama de probabilidade de transição (dos estados $E_1 \rightarrow E_2$ e $E_2 \leftrightarrow E_2$)	44
Figura 4.3: Diagrama de probabilidade de transição.....	45
Figura 4.4: Diagrama de probabilidade de transição.....	46
Figura 5.1: Diagrama de probabilidade de transição	53
Figura 5.2: Diagrama de probabilidade de transição	58

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Limites inferiores e limites superiores da FIR de Santa Maria [30]	24
Tabela 2.2: Limites inferiores e limites superiores da FIR de Lisboa [30]	24
Tabela 2.3: Limite inferior e limite superior das TMA's portuguesas [30]	25
Tabela 2.4: Subdivisões da TMA de Lisboa [30]	26
Tabela 5.1: Número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo $t+1$	60

Lista de Acrónimos

- ATM - *Air Traffic Management* (Gestão do Tráfego Aéreo)
- TMA - *Terminal Manoeuvring Area* (Área Terminal De Voo)
- ASM - *AirSpace Management* (Gestão do Espaço Aéreo)
- ATC - *Air Traffic Control* (Controlo de Tráfego Aéreo)
- ATFM - *Air Traffic Flow Management* (Gestão do Fluxo de Tráfego Aéreo)
- TWR - *Tower* (Torre de Controlo)
- APP - *Approach* (Controlo de Aproximação)
- CTR – *Control Zone* (Zona de Controlo de Tráfego Aéreo)
- ACC - *Area Control Center* (Centro de Controlo de Área)
- ANSP - *Air Navigation Services Provider* (Prestador de Serviços de Navegação Aérea)
- FIR - *Flight Information Region* (Região de Informação de Voo)
- FIS - *Flight Information Service* (Serviço de Informação de Voo)
- ALRS - *Alert Service* (Serviço de Alerta)
- CNS - *Communication, Navigation and Surveillance* (Comunicação, Navegação e Vigilância)
- ICAO - *International Civil Aviation Organization* (Organização da Aviação Civil Internacional)
- SESAR - *Single European Sky ATM Research*
- SES - *Single European Sky* (Céu Único Europeu)
- FAB - *Functional Airspace Block* (Bloco de Espaço Aéreo Funcional)
- FRA - *Free Route Airspace*
- STAM - *Short Term ATFM Measures*
- LDSM - *Modelos de Sistemas Dinâmicos Lineares*
- SEL - *Elementos de Superfície*
- BCM - *Método de Combinação Bayesiano*
- ARIMA - *Autoregressive Integrated Moving Average*
- KF - *Filtro de Kalman*
- AR - *Autoregressive*
- MA - *Moving Average*
- ANN - *Artificial Neural Network* (Redes Neurais Artificiais)

BPNN - *Back Propagation Neural Network* (Redes Neurais de Retro-Propagação)

NAIP - *National Aeronautical Information Publication*

IFR - *Instrument Flight Rules* (Regras de Voo por Instrumentos)

VFR - *Visual Flight Rules* (Regras de Voo Visual)

UIR - *Upper Flight Information Region* (Região de Informação de Voo Superior)

FL - *Flight Level* (Nível de Voo)

MSL - *Mean Sea Level* (Nível Médio das Águas do Mar)

AGL - *Above Ground Level* (Acima do Nível do Solo)

AMSL - *Above Mean Sea Level* (Acima do Nível Médio das Águas do Mar)

ATZ - *Aerodrome Traffic Zone* (Zona de Tráfego do Aeródromo)

TRMZ - *Transponder and Radio Mandatory Zone* (Zona de Equipamento Rádio e Transponder Obrigatório)

TMZ - *Transponder Mandatory Zone* (Zona de Equipamento Transponder Obrigatório)

RMZ - *Radio Mandatory Zone* (Zona de Equipamento Rádio Obrigatório)

SSR - *Secondary Surveillance RADAR* (Radar de Vigilância Secundário)

ANAC - (Autoridade Nacional de Aviação Civil)

LPD - Espaço Aéreo Perigoso

LPR - Espaço Aéreo Restrito

LPTRA - Espaço Aéreo Temporariamente Reservado

LPP - Espaço Aéreo Proibido

NAV - Navegação Aérea

Capítulo 1

Introdução

1.1 Perspetiva Atual do Setor Aeronáutico

O setor aeronáutico possui uma elevada importância ao fabricar um conjunto de produtos de alta tecnologia e com um vasto campo de aplicação, sendo do ponto de vista comercial, tecnológico e industrial uma atividade estratégica. A indústria aeronáutica tem sofrido um enorme crescimento, tornando-se fundamental na sociedade nos dias de hoje, potenciando as deslocações de forma mais rápida e cómoda.

A procura por este setor tem aumentado bastante,

- Na Europa foi atingido um novo recorde de número de voos efetuados por dia, 37228, a 28 de junho de 2019, quebrando o recorde anterior de 37101 voos, cerca de um ano antes, a 7 de setembro de 2018. A nível mundial houve um recorde histórico na aviação, com 230 mil voos apenas no dia 25 de julho de 2019; [1] [2]
- A NAV Portugal (entidade responsável pela gestão e controlo do tráfego aéreo em Portugal) registou um novo recorde em 2019, gerindo um total de 855944 voos, aumentando assim 2,7% em relação a 2018. Esta entidade regulou mais de 2300 voos por dia em 2019, cerca de 60 voos a mais em comparação com a média diária do ano anterior. [3]

Em março de 2020, com o aparecimento da pandemia de COVID-19, um dos setores mais prejudicados foi a atividade da indústria aeronáutica, tendo o tráfego aéreo diminuído mais de dois terços relativamente a 2019. Esta pandemia criou sérios problemas nos voos a nível mundial devido às restrições adotadas para evitar o contágio, levando diversas companhias aéreas a registarem imensas dificuldades financeiras devido à falta de liquidez. No entanto, espera-se que num futuro próximo o tráfego aéreo em Portugal alcance novamente os números atingidos antes desta pandemia. [4]

No decorrer destes últimos anos tem havido um enorme aumento do turismo não só em Portugal como em praticamente toda a Europa, e como a procura pelo transporte aéreo tem crescido, alguns aeroportos atingem um certo nível de saturação, como foi o caso do aeroporto Humberto Delgado, em Lisboa, em 2018. [5] Este tipo de situação veio demonstrar a falta de capacidade do Sistema ATM (*Air Traffic Management* - Gestão do Tráfego Aéreo). O principal fator que limita a capacidade geral deste Sistema ATM é a junção entre a capacidade da zona aérea terminal ou TMA (*Terminal Manoeuvring Area* - Área Terminal)¹ e a capacidade do aeroporto, quer na própria infraestrutura quer provocada por limitações tanto ambientais como políticas.

¹ Serão utilizadas de modo equivalente as terminologias “área terminal” e “zona terminal”

Dentro de 17 anos é expectável que os aeroportos não tenham capacidade de acolher 1.5 milhões de voos, ou seja, cerca de 160 milhões de passageiros serão impedidos de viajar, uma vez que resulta da falta de capacidade em determinados locais ou períodos de tempo, podendo piorar por falta de potencial melhoramento como a construção de novas infraestruturas. [6]

É de salientar o facto de que a utilização de aeroportos com um nível de saturação elevado prejudica a pontualidade e previsibilidade, fomentando a ambição de uma melhoria de performance no futuro. Deste modo, é essencial compreender como funciona o sistema de gestão e controlo de tráfego aéreo em Portugal.

1.2 Estado Atual do Sistema ATM

A aviação mundial é um sistema altamente dinâmico. Deste modo, é imprescindível sujeitar todo o tráfego aéreo a um controlo bastante exigente e disciplinado, por forma a verificar um fluxo sem qualquer anormalidade.

O termo “Gestão do Tráfego Aéreo” engloba todas as atividades envolvidas na garantia de um fluxo seguro, ordenado e expedito do tráfego aéreo. O Sistema ATM representa um agrupamento de funções indispensáveis de modo a que este fluxo ocorra de forma correta durante todas as fases de operação de um avião, evitando também colisões entre aeronaves. Este sistema abrange todos os serviços prestados numa gestão dinâmica e estratégica não só do tráfego aéreo como também do próprio espaço aéreo.

A gestão do tráfego aéreo possui três serviços principais:

- ASM (*AirSpace Management* - Gestão do Espaço Aéreo) - sendo o espaço aéreo um recurso bastante escasso, tem como objetivo controlar o mesmo da forma mais eficiente possível, a fim de servir todos os seus utilizadores, tanto militares como civis;
- ATC (*Air Traffic Control* - Controlo de Tráfego Aéreo) - trata-se de um serviço prestado por controladores de tráfego aéreo que têm como objetivo rastrear e guiar o movimento das aeronaves através do seu percurso, garantindo um fluxo bastante ordenado e seguro, evitar colisões, fornecer as informações necessárias às tripulações de voo e, em caso de emergência, aos órgãos competentes.
- ATFM (*Air Traffic Flow Management* - Gestão do Fluxo de Tráfego Aéreo) - Tem como objetivo principal, por razões de segurança, efetuar a regulação do fluxo de aeronaves da forma mais eficiente possível para impedir que determinados setores de controlo entrem num estado de saturação.

A ASM responsabiliza-se pelo modo como o espaço aéreo se encontra constituído de forma a fornecer serviços de tráfego aéreo, e pelo modo como é concedido aos seus diversos utilizadores, por meio de rotas ou por zonas e níveis de voo.

O serviço ATC é responsável por manter uma considerável separação entre aeronaves e obstruções no solo de modo a prevenir colisões, por exemplo, utilizando padrões de separação adequados, emitindo autorizações e indicações pertinentes que concebam um fluxo organizado de tráfego aéreo diminuindo tempos de espera tanto no ar como no solo.

O ATC é realizado através de normas definidas e aprovadas tanto pelas entidades aeronáuticas nacionais como pelas entidades aeronáuticas internacionais que regulam a circulação do tráfego aéreo, passando por vários membros, dividindo-se assim em três principais centros, cada um responsável por uma área estipulada. O primeiro é a Torre de Controlo (TWR - *Tower*), que é um órgão responsável pela coordenação do tráfego das aeronaves no solo e pelo tráfego destas dentro da área de responsabilidade da torre, como por exemplo, aterragem e descolagem. Depois, todas as aeronaves passam para o serviço ATC seguinte que é o Controlo de Aproximação (APP - *Approach*) que controla o tráfego aéreo das aeronaves que passam da fase de cruzeiro e se aproximam para aterrar ou das que descolam até ao momento em que passam à fase de cruzeiro, atuando apenas no espaço aéreo CTR (Zona de Controlo) e/ou TMA. De forma mais sucinta, o seu papel é o de tirar as aeronaves das TMAs e/ou colocar as aeronaves alinhadas com a pista de aterragem, para poderem aterrar. Por fim, existe o Centro de Controlo de Área (ACC - *Area Control Center*), que é responsável pelo controlo do tráfego aéreo em fase de voo de cruzeiro.

O ANSP (*Air Navigation Services Provider* – Prestador de Serviços de Navegação Aérea) trata-se de uma entidade jurídica pública ou privada que desempenha serviços de navegação aérea, administrando o tráfego aéreo em nome de uma empresa, país ou região.

O espaço aéreo mundial encontra-se dividido em várias regiões de informação de voo (FIR – *Flight Information Region*), sendo estas regiões a maior fração de espaço aéreo em que se dividem os espaços aéreos dos países de modo a que seja prestado pelo menos um dos serviços de tráfego. O tamanho de cada FIR varia muito em cada situação, havendo umas que abrangem todo o espaço aéreo de um país, de diferentes países, ou somente uma parte da área de um país.

É de realçar, que o espaço aéreo sobre os oceanos se divide de igual forma, estando estas regiões perante a supervisão das autoridades de um país vizinho. São regiões na qual são fornecidos serviços de informação de voo (FIS – *Flight Information Service*), permitindo assegurar a separação entre aeronaves, e serviços de alerta (ALRS – *Alert Service*), que tendem a receber e enviar comunicações de emergência de algum acontecimento no interior da FIR. É atribuído um ACC a cada região FIR, que controla a rota das aeronaves que nela estão inseridas. Em Portugal, são dois os centros de controlo de área, Lisboa e Santa Maria, que cobrem o espaço aéreo acima do continente português, a ilha da Madeira e o arquipélago dos Açores, bem como uma ampla área do oceano atlântico.

Posteriormente, a responsabilidade dos ACC encontra-se dividida em setores do espaço aéreo adjacentes, que por sua vez se dividem em classes separadas por níveis de voo diferentes, que podem ser operados de forma individual ou em conjunto de acordo com a demanda de tráfego aéreo. É possível dar o exemplo do espaço aéreo de Portugal, que possui cinco setores: Norte, Centro e Sul (Continente Português); Oeste (Setor Mar) e Setor Madeira.

Cada controlador de tráfego aéreo possui a enorme responsabilidade de controlar apenas um setor, e para tal necessita de uma licença de controlador genérica, de ser treinado e certificado para poder lidar com a situação. O controlador humano executa uma função elementar na organização e execução de tarefas de deteção e resolução de conflitos.

Cada Centro de Controlo de Área possui um sistema de processamento de dados de voo integrado que oferece informações de vigilância, de meteorologia, de navegação e

informações aeronáuticas, como auxílio ao trabalho do controlador, para evitar colisões ou acidentes. São sistemas que dispõem de um reduzido nível de automatização. Cada um opera na sua instalação física que contém sensores de meteorologia e CNS (*Communication, Navigation and Surveillance* - Comunicação, Navegação e Vigilância) e comunicações solo-solo para comunicar com ACC vizinhos e com o próprio aeroporto.

Como visto anteriormente, a ATFM é o serviço responsável por regular o fluxo das aeronaves, garantindo que haja um equilíbrio entre a capacidade do espaço aéreo e a demanda de tráfego aéreo de modo a ser possível utilizar esse espaço de forma mais eficiente. Segundo a EUROCONTROL, a ATFM possui dois propósitos essenciais, sendo eles: otimizar a capacidade disponível e preservar o ATC de sobrecarga, isto é, proteger os controladores de tráfego aéreo do excesso de carga de trabalho que pode levar a um nível bastante elevado de congestionamento do setor. De forma mais concreta, este serviço necessita de assegurar que o volume de tráfego aéreo se concilie com as capacidades máximas declaradas de modo a não ser atingida a saturação. O serviço ATFM sustenta o ATC não só na utilização mais eficiente do espaço aéreo e da capacidade do aeroporto, como na execução dos seus principais objetivos. Nem sempre há possibilidade de haver um excelente fluxo de tráfego aéreo uma vez que existem diversas limitações, que podem levar a que a demanda de tráfego seja maior do que a capacidade disponível, tais como: condições meteorológicas inusitadas, sistemas de navegação insuficientes e exigências de diferentes utilizadores que entram em conflito. É nestas situações que as medidas de regulação estudadas necessitam de ser ponderadas especialmente quando o sistema ATC já não conseguir enfrentar o volume de tráfego aéreo.

A capacidade de um aeroporto é expressa em operações (chegadas e partidas) por unidade de tempo, isto é, movimentos por hora. Isto deve-se ao facto de este conceito se definir como sendo o número de voos que podem ser controlados de forma eficiente, durante um determinado período de tempo, num certo espaço. Alguns dos fatores que influenciam esta capacidade são:

- Configuração da pista e procedimentos operacionais para a sua utilização;
- Performance das aeronaves;
- Tempos de ocupação da pista;
- Condições meteorológicas;
- Rácios de chegada e partida das aeronaves.

O serviço ATC possui o poder de definir a sua capacidade, ou seja, o número de aeronaves que podem ser controladas em segurança por um controlador de tráfego aéreo num determinado setor do espaço. Esta decisão é baseada na quantidade de trabalhadores, nos instrumentos, ferramentas e infraestruturas que possuem, demonstrando a capacidade do Sistema ATM de prestar serviço.

No caso da demanda, define-se como sendo o número de voos que se pretende ter num certo setor durante um determinado intervalo de tempo, sendo determinada com base no plano de voo.

Ao nível da ATFM, é definido todos os dias um plano de fluxo de tráfego aéreo para todo o país, cujo objetivo é otimizar a eficiência do sistema equilibrando a capacidade e a demanda. Estes planos são o resultado do estudo prévio feito ao longo de vários dias, ou até meses, antes do dia da operação. Os planos de voo são pensados e analisados, juntamente com valores históricos de capacidade que o possam afetar de forma a gerar situações de tráfego possíveis e planear eficientemente os recursos necessários, e as medidas de regulação, sendo realizada uma previsão da demanda.

1.3 Descrição do Problema de Gestão

A principal razão pela qual o Sistema ATM tem atingido o seu limite de capacidade é o facto de cada controlador de tráfego aéreo gerir um número de voos superior aos que consegue controlar de forma segura e eficiente. Para além de existir um número de controladores limitado, cada um também fica responsável por uma quantidade finita de aeronaves. Graças a limites na flexibilidade das rotas estabelecidas, o Sistema ATM é insuficiente na sua capacidade de fornecer serviços de tráfego aéreo no tempo e local certos, proporcionando uma oferta e demanda incompatíveis que provocam repercussões desastrosas. Geralmente, esta falta de capacidade pode ser causada não só por técnicas ineficazes que se tornam incapazes de lidar com o acréscimo do tráfego aéreo, tais como a utilização de equipamento inapropriado, assim como pela falta de trabalhadores. Disso resulta, que a disponibilidade de capacidade ATC em toda a rede tende a ser forte, ao passo que a demanda é variável. Isto leva a um excesso de carga e a um excesso da capacidade em simultâneo.

As indicações que um piloto recebe do controlador de tráfego aéreo são dadas através de comunicações de voz, estando limitadas à fraseologia de referência da ICAO (*International Civil Aviation Organization* - Organização da Aviação Civil Internacional). Tais limitações estão a dificultar a melhoria das comunicações entre o piloto e o controlador, o que levaria a rotas de voo otimizadas da perspectiva do utilizador do espaço aéreo, à diminuição da carga de trabalho dos controladores aéreos e alargaria a capacidade. As funções de comunicação de voz simbolizam entre 30% e 50% da carga de trabalho geral de um controlador de tráfego aéreo. A base de automatização para os controladores e a disponibilidade de informação que eventualmente seria capaz de interferir na trajetória de uma aeronave, nos sistemas atuais, são bastante limitadas.

Existem processos que são realizados pelo controlador de forma autónoma, a partir da criação de uma imagem ilustrativa da intenção das aeronaves, como por exemplo, a vigilância de tráfego aéreo, a deteção de conflitos e a sua resolução. Deste modo, é possível concluir que controladores distintos conceberão imagens diferentes face às competências e experiência que possuam. De facto, existe algum auxílio automático para que um controlador possa avaliar o impacto das indicações do ATC antes de serem emitidas para o piloto e avaliar a finalidade de um voo. Uma instrução do ATC deve resolver um conflito em vez de criar outro. Todavia, as limitações existentes na automatização requerem um enorme esforço para controlar o tráfego aéreo.

Existem imensos fatores que intervêm na trajetória de uma aeronave que não são conhecidos antes da descolagem, o que limita a previsibilidade das rotas causando um impacto negativo na capacidade do ATC. Esta incerteza causa também perfis de voo não ideais e uma defeituosa resolução de conflitos na rede ATM, a qual é otimizada previamente sem saber como o percurso da aeronave irá ser influenciado.

Para finalizar, as infraestruturas nacionais apresentam também baixos níveis de interoperabilidade, onde existem certas limitações na troca de informação. Embora, sejam captados muitos dados, estes não são nem partilhados nem aplicados de forma coerente de modo a gerir o sistema em circuito fechado.

Neste campo, estão a ser implementadas iniciativas como o Projeto SESAR com o intuito de desenvolver novos métodos e equipamentos que proporcionarão um Sistema ATM mais capacitado e eficaz, e uma melhor logística dos recursos disponíveis.

1.4 Céu Único Europeu e o Projeto SESAR

A segmentação do espaço aéreo europeu em função de fronteiras nacionais não forma um sistema integrado, competente e apto para garantir as necessidades do futuro. Deste modo, no final dos anos 90, a Comissão Europeia criou o projeto SES (*Single European Sky* - Céu Único Europeu), com o intuito de melhorar a segurança e a eficiência do transporte aéreo em toda a Europa, através da reorganização do espaço aéreo europeu em função dos fluxos de tráfego existentes. Em 2004 e 2009 foram anunciados dois pacotes de medidas para a elaboração do SES. Portanto, foram estipulados os objetivos seguintes: [7]

- Redução do impacto ambiental da aviação em 10%;
- Melhoria significativa da segurança do transporte aéreo;
- Redução dos custos do serviço ATM para metade;
- Redução dos atrasos no ar e em terra, triplicando a capacidade do espaço aéreo.

Serão abordadas de seguida, as duas iniciativas do âmbito do SES implementadas no continente europeu: os Blocos de Espaço Aéreo Funcionais e o *Free Route Airspace*.

Um Bloco de Espaço Aéreo Funcional (FAB - *Functional Airspace Block*) é um volume de espaço aéreo estabelecido baseado em requisitos operacionais, independente de fronteiras internacionais, como foi definido no SES. Nestes blocos, a oferta dos serviços de navegação aérea é otimizada mediante cooperação entre as entidades que atuam em cada FAB, ou até por um prestador único integrado, quando é considerado adequado. Estes FAB's foram definidos para permitir um escoamento eficaz e uma gestão dinâmica do tráfego aéreo, para minimizar os custos de coordenação de tráfego entre diferentes Centros de Controlo Regional, para maximizar a eficiência do espaço aéreo europeu, e para ter em consideração os recursos humanos e financeiros dos distintos Centros de Controlo Regional. [8]

Ainda que a implementação dos FAB's tenha sido demorada, todos os nove FAB's já foram declarados, definidos e comunicados à Comissão Europeia, encontrando-se representados na **Figura 1.1**.

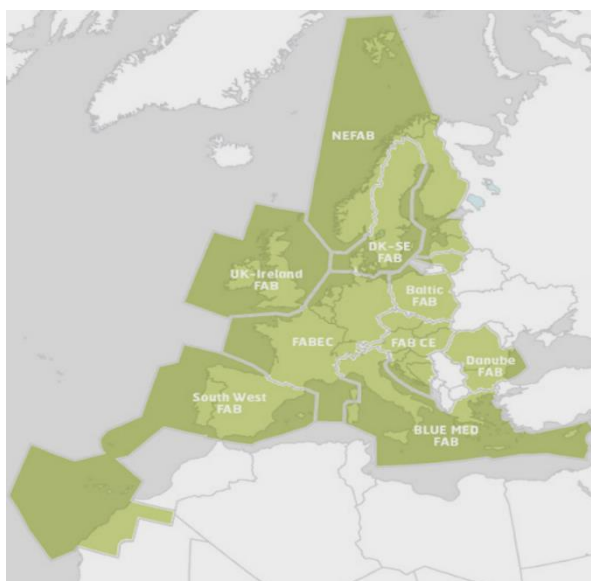


Figura 1.1: Divisão do espaço aéreo europeu em FAB's [9]

Como é possível observar na **Figura 1.1**, Portugal, juntamente com a Espanha, são responsáveis pelo *South West FAB*, no qual está incluída a FIR de Lisboa e excluída a FIR de Santa Maria.

Um *Free Route Airspace* (FRA) equivale a uma zona do espaço aéreo onde os utilizadores têm a possibilidade de decidir livremente a rota que pretendem seguir, entre um ponto de entrada e saída bem estabelecidos. Nos FRA's, o tráfego continua a depender das indicações do ATC, porém, em vez de terem de seguir rotas pré-definidas, podem escolher o mais adequado de acordo com o seu perfil de voo, consoante disponibilidade. [10] Isto leva a uma redução das trajetórias, tanto em tempo de voo como em distância, e por sua vez, a uma redução do consumo de combustível e das emissões de CO₂. A FIR de Lisboa foi pioneira em toda a Europa a adotar este projeto, mas neste momento, ambas as FIR's portuguesas já utilizam este sistema. Atualmente o espaço aéreo sobre Lisboa encontra-se representado na **Figura 1.2**.

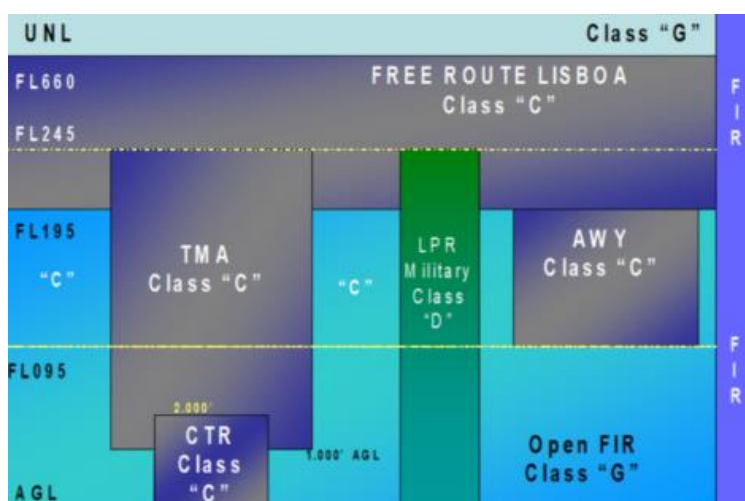


Figura 1.2: Representação do espaço aéreo sobre Lisboa [11]

Para além da criação dos FAB's, a iniciativa do SES também depende de inovações tecnológicas de modo a alcançar os seus objetivos. Desta forma, em 2004 foi criado o Projeto SESAR (*Single European Sky ATM Research*) pela União Europeia e pelo EUROCONTROL, entidade dedicada a apoiar a aviação europeia, com o intuito de atualizar a gestão do tráfego aéreo europeu e desenvolver as tecnologias fundamentais para melhorar o seu desempenho. De forma mais concreta, o objetivo do Projeto SESAR é definir, desenvolver e instituir as soluções tecnológicas necessárias para aumentar o desempenho do sistema ATM europeu. O SESAR controla e concentra os diversos esforços e iniciativas de investigação e desenvolvimento na área da gestão de tráfego aéreo da União Europeia, unindo cerca de 3000 especialistas, contando com 19 membros da comunidade aeronáutica, e tendo a colaboração de 100 empresas, entre subcontratadas e subsidiárias. A NAV Portugal pertence ao Consórcio do Projeto SESAR.

Portugal, sendo um país acionista do Projeto SESAR, tem cooperado com imensas iniciativas que tencionam não só renovar o seu Sistema ATM como reconfigurar o seu próprio espaço aéreo. São inúmeras as iniciativas levadas a cabo por Portugal, desde a criação do *South West FAB*, que foi abordado anteriormente, à melhoria de procedimentos de ATFM, como o STAM (*Short Term ATFM Measures*). Este último é definido como sendo uma abordagem para atenuar as cargas de trabalho em cada setor de controlo, reduzindo os picos de tráfego através da execução de diferentes medidas ao nível do ATFM. Isto proporciona um trabalho mais fluido e uma consequente capacidade acrescida. [12]

1.5 Métodos Usuais Para a Previsão de Fluxo

A gestão do fluxo de tráfego afeta o espaço aéreo, os diferentes aeroportos e todos os seus recursos destinados a preservar um fluxo de tráfego eficiente com segurança. Existem métodos para modelar o fluxo de tráfego aéreo nas zonas terminais e fora dessas.

1.5.1 Método Euleriano

Tradicionalmente, os modelos utilizados na gestão do fluxo de tráfego aéreo baseiam-se na simulação das trajetórias de cada aeronave. Embora seja prática, esta abordagem não oferece qualquer perspetiva sobre a dinâmica do fluxo de tráfego. Foram então apresentadas duas abordagens diferentes, a abordagem do modelo de tráfego agregado [13] e a abordagem do modelo Euleriano [14] [15], de modo a gerar modelos de sistemas dinâmicos lineares (LDSM) que representam o comportamento do fluxo de tráfego aéreo. A dimensão destes modelos depende da discretização espacial do espaço aéreo e é independente do número de aeronaves no sistema. Os modelos lineares resultantes podem ser utilizados tanto na análise como na síntese de técnicas de gestão do fluxo de tráfego.

A abordagem de fluxo agregado proporciona um modelo de resolução fixa do espaço aéreo, enquanto que a abordagem Euleriana fornece um modelo de resolução flexível. Cada uma destas pode ser útil em diferentes aspetos da tomada de decisões estratégicas de controlo do fluxo, e para além disso, apesar de existirem desigualdades na forma como abordam o problema da modelação do espaço aéreo, cada modelo pode ser utilizado para analisar a exatidão do outro modelo.

A fim de assegurar que este tráfego se movimente de forma suave e eficiente na presença de perturbações causadas por condições atmosféricas convectivas e aeroportuárias, são necessários métodos inovadores de modelização e conceção na gestão do fluxo de tráfego (ATFM).

O método Euleriano é um modelo que abrange algumas complexidades, no entanto é um modelo que realmente consegue modelar o fluxo. A vantagem deste método, por exemplo na área de sistemas, é que já estabelece um modelo dinâmico no espaço de estado, o que consegue descrever a dinâmica do sistema a partir da noção do estado. O que está na base da noção do estado é que sabendo o estado de um sistema num momento dado, consegue-se prever a evolução do sistema a partir de um instante qualquer, prever não necessariamente a longo prazo, mas a médio-curto prazo. De facto, este modelo é interessante uma vez que as equações estão descritas de acordo com o formalismo do espaço de estado.

1.5.1.1 Modelo de Fluxo Agregado

O modelo agregado emprega a relação de fluxo entre Centros adjacentes e é construído contando o número de aeronaves que saem de um Centro para um Centro adjacente, o número de aeronaves que entram num Centro a partir de um Centro vizinho e o número de aeronaves que efetuam a descolagem e aterragem dentro de um Centro. A entrada para este modelo agregado equivale ao número de partidas.

Os resultados divulgados em [16], assumindo que as partidas seguem a distribuição de Poisson, revelam que o número de aeronaves nos Centros igualmente se enquadra numa distribuição de Poisson. No entanto, a principal limitação dos resultados é que a modelização das partidas através da distribuição de Poisson despreza o facto das contagens das partidas variarem consideravelmente durante o dia à medida que as aeronaves aterram e descolam dos grandes aeroportos centrais. A contagem de aeronaves nos Centros, prevista pela LDSM, pode ser substancialmente melhorada calculando as taxas nominais de partida em função do tempo e aumentando-as a partir da modelização da incerteza de partida sobre estas taxas.

O número de aeronaves que saem e o número de aeronaves que chegam a um Centro num intervalo de tempo, ΔT , são considerados como sendo proporcionais ao número de aeronaves no Centro no início do intervalo. Utilizando o princípio de conservação do fluxo num Centro e a notação da **Figura 1.3**, o número de aeronaves no Centro no instante seguinte, $k + 1$, pode ser relacionado com o número de aeronaves no Centro no instante atual, k , através da diferença no número de aeronaves que entraram no Centro e o número de aeronaves que saíram do Centro, da seguinte maneira:

$$x_i(k + 1) = x_i(k) - \sum_{j=1}^N \beta_{ij} x_i(k) + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^N \beta_{ji} x_j(k) + d_i(k) \quad (1.1)$$

Onde, as frações β_{ij} e β_{ji} são obtidas como probabilidades de transição [17], e as partidas dentro do centro i são assinaladas por $d_i(k)$. Para modelação, estas partidas podem ser divididas numa componente estocástica e numa componente determinística. A primeira, $w_i(k)$, pode ser modelada assumindo uma distribuição apropriada como por

exemplo uma distribuição de Poisson ou Gaussiana. Neste modelo, que também pode ser gerado através de dados históricos, retrata a variação esperada em torno da componente determinística. Quanto a esta última, a parte determinística das partidas, $u_i(k)$, pode ser calculada a partir de dados históricos de partidas e de planos de voo arquivados.

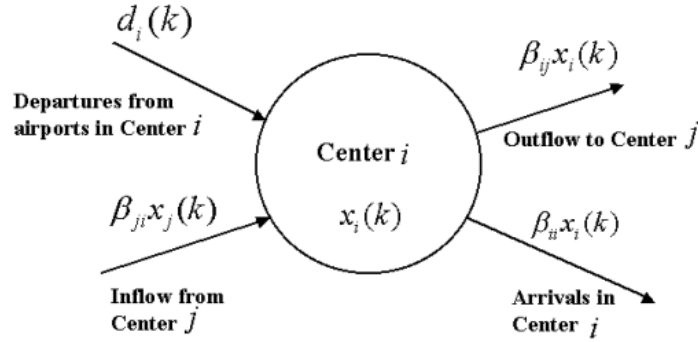


Figura 1.3: Componentes do fluxo de aeronaves que contribuem para a contagem de tráfego num dado Centro [13]

O sistema discreto em (1.1) pode ser reescrito na notação de espaço de estado padrão da seguinte forma:

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}(k)\mathbf{u}(k) + \mathbf{C}(k)\mathbf{w}(k) \quad (1.2)$$

Sendo que, ' k ' denota o instante de tempo definido por $k \Delta T$, onde ΔT é o intervalo de amostragem, ' $\mathbf{A}(k)$ ' é a matriz de transição de estado que abrange a informação de como as aeronaves efetuam a passagem de um Centro para outro, ' $\mathbf{x}(k)$ ' é o vetor de estado com o número de aeronaves nos Centros no momento k como seus elementos, ' $\mathbf{u}(k)$ ' é o vetor de controlo com o número de aeronaves que descolam dos Centros como seus elementos e, por fim, ' $\mathbf{w}(k)$ ' é o vetor para a modelação das incertezas de partida. Os elementos da matriz de transição de estado \mathbf{A} são dados por:

$$a_{ij} = \beta_{ij};$$

$$i \neq j; i = 1, \dots, N; j = 1, \dots, N$$

Onde, ' N ' é o número de centros e os termos ' a_{ij} ' são termos não-diagonais que descrevem a fração de transição das aeronaves do Centro i para o Centro j no momento k . Esta quantidade varia lentamente ao longo do tempo.

Os termos diagonais ' a_{ii} ' representam a fração da aeronave que permaneceu no Centro i durante a fase de tempo k , e podem ser obtidos pela seguinte expressão:

$$a_{ii} = 1 - \sum_{j=1}^N \beta_{ij} \quad (1.3)$$

1.5.1.2 Modelo de Fluxo Euleriano

O progresso de uma abordagem Euleriana à modelação do tráfego aéreo tem sido bastante discutido em recentes esforços de investigação [18]. Estes modelos encontram-se sob a forma de equações de diferença linear e variável no tempo. A abordagem Euleriana, que utiliza o software FACET [19] como base, molda o espaço aéreo em termos de elementos de linha que se aproximam das vias aéreas, em conjunto com os nós de fusão e divergência. Visto que este procedimento de modelação incorpora espacialmente o tráfego aéreo, a ordem do modelo do espaço aéreo depende somente deste número de elementos de linha usado para retratar as vias aéreas, e não do número de aeronaves que atuam no espaço aéreo.

Deve ser especificado um intervalo de amostra ' τ ', uma vez que o modelo Euleriano é discreto no espaço e no tempo. Embora estas discretizações se fundamentem especialmente no nível de detalhe desejado no modelo, devido a cada elemento de superfície estar ligado apenas a oito dos seus vizinhos, o intervalo de tempo da amostra deve ser decidido para que nenhuma aeronave num elemento de superfície viaje para além dos seus vizinhos imediatos num intervalo de amostra. Deste modo, o intervalo de amostra aceitável é definido pela velocidade da aeronave mais rápida no espaço aéreo e pelas dimensões do menor elemento de superfície.

O padrão de fluxo de tráfego aéreo é modelado dentro de cada elemento de superfície utilizando dois conjuntos de critérios. O primeiro são os parâmetros de inércia ' a_{ii} ', um para cada um dos oito fluxos que representam a fração da aeronave que permaneceu desde o tempo de amostra anterior. O segundo conjunto de parâmetros são os de divergência de fluxo ' β_{mn} ' que representam a aeronave que trocou de fluxos dentro de uma grelha de elementos de superfície. Uma vez que a aeronave num fluxo se pode manter nele ou então mudar para qualquer um dos outros sete, para uma dada grelha de elementos de superfície (SEL) existe uma matriz de $9 \times 8 = 72$ parâmetros de divergência de fluxo. A dinâmica do fluxo de tráfego aéreo num SEL pode ser caracterizada usando os dois conjuntos de parâmetros, através do princípio da conservação das aeronaves.

Uma aplicação relevante dos modelos Eulerianos está no desenvolvimento de ferramentas quantitativas de apoio à decisão para o controlo do fluxo de tráfego aéreo.

1.5.2 Método Bayesiano

O método de combinação Bayesiano (BCM) trata-se de um método integrado que pode de facto melhorar as previsões de preditores únicos. São então desenvolvidos e incorporados linearmente no BCM três preditores únicos, o *autoregressive integrated moving average* (ARIMA), o Filtro de Kalman (KF) e as Redes Neurais de Retro-Propagação. É de salientar que o método Bayesiano nada tem a ver com o método Euleriano, são filosofias completamente diferentes.

1.5.2.1 Preditores de Componentes

1.5.2.1.1 ARIMA

ARIMA é um modelo bastante geral que pode ser utilizado com métodos bayesianos ou não. Este modelo é uma das abordagens mais comuns para previsão de séries cronológicas, e é regularmente referido como modelo ARIMA (p, d, q), onde ' p ' representa as ordens de AR (*autoregressive*), ' d ' a diferença e ' q ' simboliza MA (*moving average*). O modelo pode ser escrito da seguinte forma:

$$\varphi(B)(1 - B)^d \hat{y}_t = \theta(B)\varepsilon_t \quad (1.4)$$

Onde, ' \hat{y}_t ' é o fluxo de tráfego previsto no intervalo ' t^{th} ', ' B ' é o operador de *backshift* definido por ' $B\hat{y}_t = \hat{y}_{t-1}$ ', ' $\varphi(B)$ ' é o operador AR de ordem ' p ' definido por ' $\varphi(B) = 1 - \varphi_1(B) - \varphi_2(B^2) - \dots - \varphi_p(B^p)$ ', ' $\theta(B)$ ' é o operador MA de ordem ' q ' definido por ' $\theta(B) = 1 - \theta_1(B) - \theta_2(B^2) - \dots - \theta_q(B^q)$ ' e, por fim, ' ε_t ' é o erro aleatório.

Os procedimentos para a conceção do modelo ARIMA são os seguintes:

1º - os operadores AR e MA são usados para detetar a estacionaridade da sequência temporal. Se esta sequência não for estacionária, é necessário fazê-la diferente para que se torne estável;

2º - utilizar o método de estimativa de probabilidade máxima para examinar os parâmetros em ARIMA;

3º - testar o modelo resultante, detetar se o erro da série residual é ou não um ruído branco, e caso não seja, reestimar os parâmetros até que esse erro se transforme em ruído branco;

4º - com os parâmetros apropriados, ARIMA pode ser empregue para previsão.

1.5.2.1.2 Redes Neurais de Retro-Propagação

Os modelos de redes neuronais artificiais (ANN – *Artificial Neural Network*) são desenvolvidos com base na emulação dos métodos do sistema neurológico humano. Os modelos de redes neuronais de retro-propagação (BPNN – *Back Propagation Neural Network*), entre inúmeros modelos ANN, são capazes de ser os mais utilizados, e que são constantemente encarados como alternativas para modelos combinados de previsão de fluxo de tráfego aéreo. Estes modelos, tal como ARIMA, podem ser utilizados com métodos bayesianos ou não.

A estrutura do BPNN, tal como ilustrado na **Figura 1.4**, contém três camadas, a de entrada, a camada intermédia e a de saída. As camadas superior e inferior encontram-se totalmente conectadas, enquanto os neurónios em cada camada estão sem conexão.

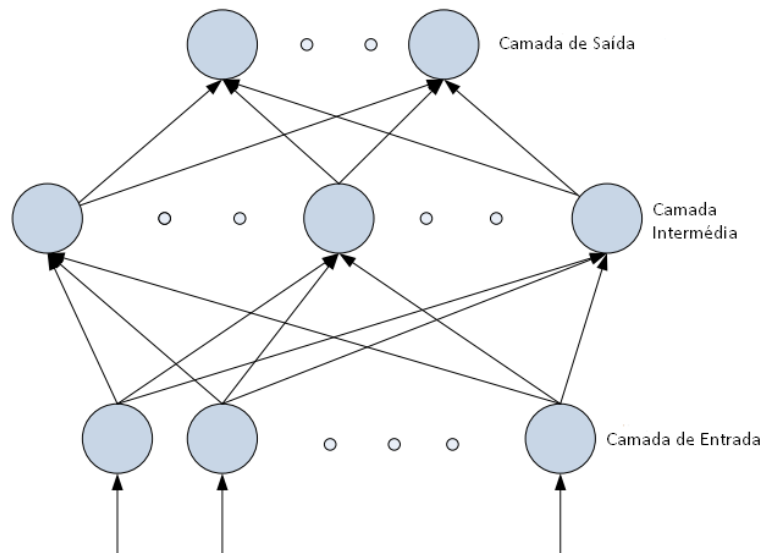


Figura 1.4: Estrutura da rede neuronal de retro-propagação [20]

Antes de ser realizada uma previsão, o BPNN necessita ser preparado com os dados históricos de forma a atualizar os pesos da camada intermédia. O processo de preparação é o seguinte: primeiramente é necessário construir a rede BPNN e estabelecer tanto os dados de entrada como os dados práticos. Após o BPNN adquirir as entradas, irá propagá-las desde a camada de entrada através da camada intermédia até à camada de saída, onde as respostas são obtidas. De seguida, os valores atingidos são comparados com os valores práticos e "retropropagados" através da rede de modo a alterar os pesos de ligação entre camadas próximas de forma a reduzir o erro dos valores obtidos. O processo de propagação inversa de erros garante que a precisão da resposta de entrada é melhorada em cada momento. O processo continua até que o gradiente do erro seja menor que um valor limite pré-definido ou até ser atingido o número máximo de ciclos de treino.

1.5.2.1.3 Filtragem de Kalman

O Filtro de Kalman (KF) foi originalmente proposto por Kalman em 1960 para problemas de filtragem linear de dados discretos. Hipoteticamente, trata-se de um estimador que concede um conjunto de equações matemáticas para estimar o estado de um processo, de forma a minimizar o erro. O filtro é bastante potente na estimativa de estados passados, presentes e até mesmo futuros. Com a elevada eficiência computacional que possui, tem sido aplicado a inúmeros setores, tais como previsão de cheias/inundações, controlo de processos, navegação e rastreamento. Para além disso, o Filtro de Kalman também é um bom estimador para a previsão de fluxo de tráfego a curto prazo.

De modo a facilitar os procedimentos de previsão e aprimorar a precisão do método KF, quando este é aplicado para a previsão de fluxo de tráfego, são utilizadas as próximas indicações:

- a dimensão da matriz de estado é definida pelo modelo ARIMA onde o número de dados históricos que mais se correlacionam com o fluxo de tráfego atual é determinado em simultâneo com AR;
- a matriz de transição A é definida como matriz idêntica;
- as matrizes de covariância de medição de ruído R podem ser alteradas a cada etapa ou medição de tempo, porém para simplificar, assume-se que seja uma constante decidida por dados de fluxo de tráfego de amostras off-line.

O Filtro de Kalman é um método 100% bayesiano, onde as matrizes Q e R (parâmetros) são necessárias de ajustar, ao contrário do modelo ARIMA onde se faz tudo isto off-line. Os parâmetros em ARIMA são determinados antes mesmo de se fazer a previsão e então são calculados tendo em conta uma base de dados de fluxo de tráfego aéreo ou de qualquer outro sistema, uma vez que ARIMA pode ser utilizado para qualquer sistema dinâmico. Desta forma, se existirem dados para ajustar os parâmetros de ARIMA, este modelo é mais eficiente que Filtragem de Kalman. A vantagem do Filtro de Kalman é quando não houver dados prévios, onde a única coisa que se tem são os dados do sistema enquanto o sistema estiver a funcionar, isto é, se não existirem dados prévios utiliza-se a Filtragem de Kalman em vez de se utilizar ARIMA. O Filtro de Kalman é um filtro ótimo, mas um filtro ótimo quando não houver dados. Cada um dos três preditores únicos foi criado num âmbito específico, ou seja, se compararmos o desempenho de cada um dos métodos fora do seu âmbito, claro que não vai fazer melhor do que os outros.

1.5.2.2 BCM Tradicional e Novo BCM

Este método tradicional foi originalmente divulgado por [21]. Considerando o intervalo de tempo 't' e sendo 'y_t' o fluxo de tráfego real nesse intervalo, obtêm-se o seguinte:

$$y_t = y_t^n(y_{t-1}, y_{t-2}, \dots, y_1) + e_t^n \quad (1.5)$$

Onde, 'y_tⁿ(y_{t-1}, y_{t-2}, ..., y₁)' é o fluxo de tráfego previsto no intervalo de tempo 't' pelo nth preditor e o 'e_tⁿ' representa o erro de previsão correspondente.

A probabilidade posterior do nth preditor de ser o melhor modelo no intervalo 't' é dada como:

$$p_t^n = \text{prob}(Z = n/y_t, y_{t-1}, \dots, y_1) \quad (1.6)$$

A previsão do BCM tradicional no intervalo de tempo 't+1' pode ser escrita como a combinação linear da saída de todos os preditores da seguinte maneira:

$$\hat{y}_{t+1} = \sum_{n=1}^N p_t^n y_{t+1}^n \quad (1.7)$$

Onde, ' \hat{y}_{t+1} ' é a previsão gerada pelo BCM tradicional, ' N ' é o número total de preditores de componentes e ' y_{t+1}^n ' é o resultado estimado pelo n^{th} preditor.

Foi proposto um novo BCM para melhorar as previsões do BCM tradicional. Analisando a correlação entre os fluxos de tráfego históricos e os correntes, o novo BCM só tem em conta os erros de previsão dos últimos intervalos no cálculo dos créditos de cada preditor de componente. Deste modo, torna-se mais sensível à precisão perturbada dos preditores de componentes podendo regular os seus créditos de forma mais rápida quando comparado com o BCM tradicional, gerando assim melhores previsões. A aplicação prática do método proposto demonstra que o novo BCM supera substancialmente o BCM tradicional, tanto em termos de precisão como de estabilidade. A previsão do fluxo de tráfego demonstra que o novo BCM não só supera o BCM tradicional nas previsões de fluxos de tráfego a curto prazo, mas também nas previsões de fluxos de tráfego a longo prazo. Portanto, é possível concluir que o novo BCM é mais preferível para previsões gerais de tráfego do que o BCM tradicional.

Outra percepção obtida é que o desempenho tanto do novo modelo BCM como do modelo BCM tradicional está bastante dependente do desempenho dos preditores de componentes que combina. Desta forma, um novo foco de estudo para melhorar ainda mais as previsões do novo BCM seria entender como melhorar a precisão dos preditores de componentes.

1.5.3 Método Dinâmico

Ao contrário dos restantes modelos de fluxo de tráfego aéreo existentes, o modelo dinâmico tem em conta a característica dinâmica da velocidade do fluxo de tráfego e fornece um mecanismo mais flexível e prático para controlar o fluxo de tráfego aéreo não só na rota aérea como nos níveis de rede de rotas.

Recentemente, foi realizado um estudo da EUROCONTROL que revela que as condições meteorológicas, a atividade, a capacidade e o funcionamento do espaço aéreo em rota representam 51,18% do total dos atrasos de voo na Europa, o que significa que a movimentação no espaço aéreo, ao invés das zonas terminais dos aeroportos, é a principal causa para o atraso do ATFM na Europa [22]. Portanto, o ATFM avançado e eficiente no espaço aéreo em rota é importante para sustentar um sistema de transporte aéreo seguro e eficaz.

As últimas décadas têm presenciado um elevado interesse relativo ao desenvolvimento de modelos e ferramentas ATFM, que se destinam a identificar e solucionar os desequilíbrios da capacidade de procura através da previsão e otimização do tráfego aéreo. Os modelos que acompanham cada aeronave individualmente baseados na trajetória, são também conhecidos como modelos de nível de aeronave. A previsão da procura de tráfego aéreo com base nestes modelos é feita através do cálculo do número

total de aeronaves num espaço aéreo, propagando as trajetórias dos voos propostos para a frente no tempo.

1.5.3.1 Rede Dinâmica para o Fluxo de Tráfego em Rota

Desenvolve-se uma rede dinâmica para representar a estrutura topológica estática do espaço aéreo, bem como a relação dinâmica entre o fluxo de tráfego e o espaço aéreo, que é ilustrado na **Figura 1.5**.

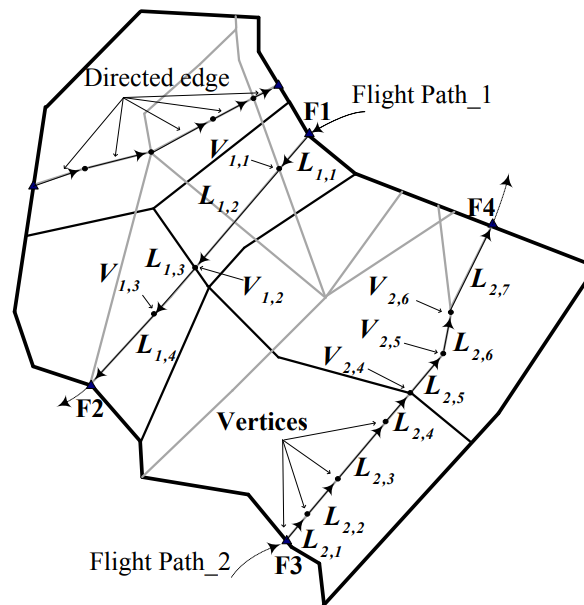


Figura 1.5: Rede dinâmica para o fluxo de tráfego em rota [23]

Na **Figura 1.5** é possível observar a estrutura real do espaço aéreo, que consiste em cinco setores de rota, e onde as linhas a negrito correspondem à fronteira do sistema aéreo. A rede dinâmica para o fluxo de tráfego em rota encontra-se desenvolvida, com as seguintes definições:

- Os vértices (por exemplo, $V_{2,5}$), representam as interseções do fluxo de tráfego aéreo e dos limites do setor e os pontos-chave na estrutura física da rota aérea, pelo que a informação sobre a estrutura real da rota aérea é incluída. No entanto, existe os vértices denominados de interfaces, onde o fluxo de tráfego transita entre o sistema de espaço aéreo e o espaço aéreo exterior (F1 e F3, interfaces onde o fluxo voa para o sistema aéreo a partir do espaço aéreo exterior, e, F2 e F4, interfaces onde o fluxo deixa o sistema aéreo para o espaço aéreo exterior);
- As arestas direcionadas representam o fluxo de tráfego entre as interfaces e os nós, onde a direção das arestas é a direção do tráfego aéreo e o comprimento das arestas é proporcional ao comprimento dos segmentos correspondentes (por exemplo, $L_{1,1}$ denota o primeiro segmento que o fluxo de tráfego aéreo 1 atravessa ao entrar no sistema);

- O peso da aresta simboliza o peso da aresta direcionada, ou seja, o tempo de viagem que a aeronave leva a transitar pela aresta direcionada correspondente, que varia em diferentes condições operacionais.

Com base nas definições descritas acima, a rede dinâmica para o tráfego em rota é definida para descrever um sistema de espaço aéreo interligado com uma dimensão definida pelo utilizador. Por exemplo, através da visualização da **Figura 1.5**, o fluxo de tráfego no sistema de espaço aéreo pode ser descrito como $F1 \rightarrow L1,1 \rightarrow V1,1 \rightarrow L1,2 \rightarrow V1,2 \rightarrow L1,3 \rightarrow V1,3 \rightarrow L1,4 \rightarrow F2$.

O que está em questão neste método é ver a partir de uma zona de voo quais são as influências, por exemplo se houver um número de aeronaves numa zona de voo, claro que essas aeronaves não vão permanecer nessa zona e vão sair para entrar noutras zonas. Então se se considerar o conjunto das zonas de voo, de facto pode-se criar uma rede, portanto os vértices desta rede são as zonas.

O tempo de viagem é definido pelo comprimento do segmento e pela velocidade da aeronave que o percorre, onde o comprimento pode ser derivado do NAIP (*National Aeronautical Information Publication*). A velocidade da aeronave varia tanto no espaço como no tempo, conforme recomendado pela análise de dados do radar, o que pode introduzir dinâmicas e incertezas no tempo de viagem. De forma a analisar a variação espacial da velocidade, as velocidades das aeronaves em cada segmento são extraídas de mais de 300.000 entradas de dados de radar do SACC durante uma semana. A análise revela que a velocidade das aeronaves num segmento segue uma distribuição normal e as distribuições normais variam para diferentes segmentos.

1.5.4 Limitações

Um exemplo de limitações pode ser observado no uso da Filtragem de Kalman em relação ao processamento, pois embora seja um método altamente vantajoso em outras áreas, requer um modelo preciso e correto para ser efetivamente aplicado. No domínio aeronáutico e aeroespacial, onde já existem modelos precisos, a Filtragem de Kalman é frequentemente utilizada para previsão, filtragem e estimação de estado. No entanto, quando o modelo não é confiável, como no caso do fluxo de tráfego aéreo, a abordagem mais apropriada seria utilizar o modelo ARIMA, que pode estimar os seus parâmetros com base nos dados disponíveis. Por exemplo, ao analisar o fluxo de aeronaves em diferentes zonas de voo, é possível criar/estimar os parâmetros do modelo ARIMA e aplicá-lo para previsões futuras. Para implementar um modelo confiável de Filtragem de Kalman, é necessário que o sistema em questão seja baseado em princípios físicos comprovados. Em áreas como a dinâmica do voo e dinâmica orbital de veículos espaciais, equações fundamentadas em princípios físicos estabelecidos, como as leis de Newton ou modelos lagrangianos, permitem a dedução de modelos confiáveis para utilização da Filtragem de Kalman. No entanto, em relação ao fluxo de tráfego aéreo, não há princípios físicos equivalentes, como as leis de Newton. Portanto, a utilização da Filtragem de Kalman para esse fim pode ser limitada.

Embora o modelo Euleriano seja derivado de princípios físicos, a sua capacidade de capturar com precisão o fenómeno do fluxo aéreo é limitada. Essa limitação decorre de vários fatores, incluindo a geometria do espaço aéreo, as restrições impostas pelas normas de controlo de tráfego aéreo e a influência dos operadores, como pilotos e controladores. Como resultado, o modelo Euleriano é uma representação complexa que

captura alguns aspetos essenciais do fluxo, mas não todos. Por exemplo, ele não considera o tempo que um controlador leva para comunicar uma instrução de desvio de rota à tripulação, o que pode ser crítico em situações de congestionamento de tráfego, especialmente em áreas terminais.

Apesar de os modelos Eulerianos serem derivados de princípios físicos, eles não consideram completamente as aplicações práticas do fluxo de tráfego aéreo. Por exemplo, não levam em conta o tempo de percepção e reação dos controladores, o tempo de reação e tomada de decisão dos pilotos, a geometria do espaço aéreo e as normas de controlo de tráfego aéreo, como as separações vertical e horizontal. Embora o modelo Euleriano seja baseado nos princípios físicos do fluxo, como na dinâmica dos gases, ele é concetual e pode não capturar completamente todos os elementos envolvidos no fluxo de tráfego aéreo.

1.6 Objetivos da Dissertação

O principal objetivo desta dissertação prende-se com a elaboração de um método para prever o número de chegadas de aeronaves numa área terminal de voo, com aplicações no caso específico da área terminal de Lisboa, mais propriamente no aeroporto Humberto Delgado, com base nas cadeias de Markov, e desta forma poder determinar também os estados mais prováveis, tanto no próximo passo como em n -passos. Posto isto, uma aplicação direta é a previsão de saturação da zona terminal com o objetivo de evitar o seu congestionamento e possíveis constrangimentos de capacidade ao nível do aeroporto, de modo a poder ser considerada a ampliação dessa capacidade.

1.7 Visão Geral da Dissertação

Esta dissertação está organizada em seis capítulos principais, cada um subdividido em várias secções para apresentar de forma clara e concisa os tópicos abordados.

O presente capítulo aborda o panorama atual do setor aeronáutico e é apresentado o futuro Céu Único Europeu, assim como algumas iniciativas levadas a cabo em Portugal que vão ao encontro da realidade do mesmo. Ainda neste capítulo, são apresentados os diferentes métodos utilizados para a previsão de fluxo, e são definidos os objetivos e limitações deste estudo.

No segundo capítulo, é realizada a apresentação do espaço aéreo português, abordando a sua divisão, limites e as restrições de voo aplicadas nas suas diferentes zonas, com particular ênfase nas áreas terminais de Lisboa e Porto.

No terceiro capítulo, são explicados os princípios das Cadeias de Markov e as suas aplicações, discutindo conceitos-chave como a matriz de transição, a distribuição estacionária e a convergência de uma cadeia.

No quarto capítulo, é abordada a modelação do fluxo de tráfego aéreo, onde é apresentado o procedimento a efetuar de forma a poder realizar a previsão do número de chegadas de aeronaves nas zonas terminais.

No quinto capítulo, são efetuadas todas as simulações necessárias e apresentados todos os resultados obtidos pelos processos estudados e desenvolvidos pela metodologia aplicada. São estabelecidas ainda várias considerações importantes para estes resultados.

No capítulo final, apresentam-se conclusões relativas ao trabalho realizado.

Capítulo 2

Espaço Aéreo

O termo “espaço aéreo” refere-se a uma determinada porção da atmosfera terrestre, que pode ser dividido em espaço aéreo controlado, não controlado ou condicionado. Tal classificação é feita consoante a densidade do fluxo de tráfego aéreo, o nível de segurança considerado necessário, a natureza das ações levadas a cabo nesse espaço e questões tanto de interesse nacional como público do próprio país. [24] O modo como o espaço aéreo é governado tem uma gigantesca influência na capacidade do Sistema ATM.

A atual divisão do espaço aéreo tem como fundamental objetivo o compromisso da gestão e acompanhamento do voo, em zonas particulares do espaço, de forma a permitir que toda esta logística seja o mais eficiente possível. Para se otimizar a gestão do fluxo de tráfego aéreo de qualquer tipo, é essencial ter em consideração a divisão do espaço aéreo, tanto as suas diferentes zonas e limites como a quem é concedida a responsabilização de controlo, pois só dessa maneira se pode elaborar uma avaliação exata da sua capacidade.

2.1 Classes do Espaço Aéreo

Na atualidade, de acordo com as normas de voo a utilizar e os serviços de tráfego aéreo que são disponibilizados, a ICAO estabeleceu sete classes de espaço aéreo. Este espaço encontra-se dividido em duas zonas principais que se designam por Espaço Aéreo Controlado, composto pelas classes A, B, C, D e E, e por Espaço Aéreo Não Controlado, composto pelas classes F e G. No entanto, nem todos os países possuem todas estas classes, podendo ser dado o exemplo do Reino Unido e do Estados Unidos da América, que não utilizam as classes B e F, e a classe F, respetivamente. [25] O Espaço Aéreo Controlado, sendo a área onde o serviço de controlo de tráfego aéreo é prestado às aeronaves que, voando nessa zona, o requeiram, o seu suporte é garantido por instituições responsáveis pelo fluxo aéreo, que, através de uma rede de sistemas de comunicação, concedem a troca de informação entre as torres de controlo e as aeronaves. As diferentes classes do espaço aéreo, ilustradas na **Figura 2.1**, encontram-se resumidas da seguinte forma: [26]

- Classe A – zona compreendida entre os 18000 e os 60000 pés acima do nível do mar. É a classe mais restritiva, sendo meramente permitidos voos IFR (*Instrument Flight Rules* – Regras de Voo por Instrumentos). Todas as aeronaves são mantidas a uma distância segura pelo ATC e têm de ser autorizadas para poderem voar neste espaço aéreo, não sendo colocados quaisquer limites de velocidade, apesar de nos Estados Unidos da América o Mach 1 não poder ser ultrapassado. Os principais usufruidores deste espaço são os jatos executivos e as companhias aéreas;

- Classe B – espaço aéreo compreendido entre os 10000 e os 18000 pés acima do nível do mar. A partir desta classe são permitidos voos IFR e VFR (*Visual Flight Rules* – Regras de Voo Visual). Situa-se em zonas circundantes dos aeroportos, onde todas as aeronaves que lá tencionem circular precisam de pedir autorização ao ATC, não havendo também limites de velocidade, à semelhança da classe A;
- Classe C – espaço compreendido entre a superfície do aeroporto e os 4000 pés. São permitidos nesta zona voos IFR e VFR. No entanto, a diferença relativamente à classe anterior é que os voos IFR são separados tanto entre si como dos voos VFR, ao passo que os voos VFR não são separados entre si pelo ATC, mas sim apenas dos voos IFR, recebendo informação quanto a outros voos VFR. É de salientar que todos os voos necessitam de ter ATC *Clearance* para entrar neste espaço, isto é, um pedido de autorização feito à Torre de Controlo para voar num espaço aéreo restrito;
- Classe D – zona circundante do aeroporto, compreendida entre a superfície do aeroporto e os 2500 pés. Aqui, somente os voos IFR são separados entre si e recebem informação de tráfego relativa aos voos VFR, enquanto que os voos VFR recebem informações sobre todos os voos. Ambos, quando o piloto pede, recebem estes avisos de modo a evitar o tráfego aéreo. Todos os voos precisam de autorização por parte do ATC para circular nesta zona;
- Classe E – espaço aéreo controlado, para além dos 700 ou 1200 pés acima de qualquer superfície, mas que não pertence a nenhuma das classes anteriores. É uma zona utilizada para realizar a passagem da zona terminal para a zona de rota. Neste espaço, os voos VFR podem voar sem autorização prévia, ou seja, não necessitam de ATC *Clearance*. Os voos IFR são separados entre si pelo ATC, precisando de ter autorização para entrar neste espaço aéreo;
- Classe F – espaço aéreo não controlado onde nenhuma aeronave necessita de ATC *Clearance* para entrar e transitar neste espaço aéreo. Apenas os voos IFR recebem serviço de ajuda. Todos os voos recebem informações de voo, se o piloto solicitar;
- Classe G – espaço aéreo não controlado e menos restritivo, onde todos os voos recebem serviço de informação de voo, caso seja solicitado.

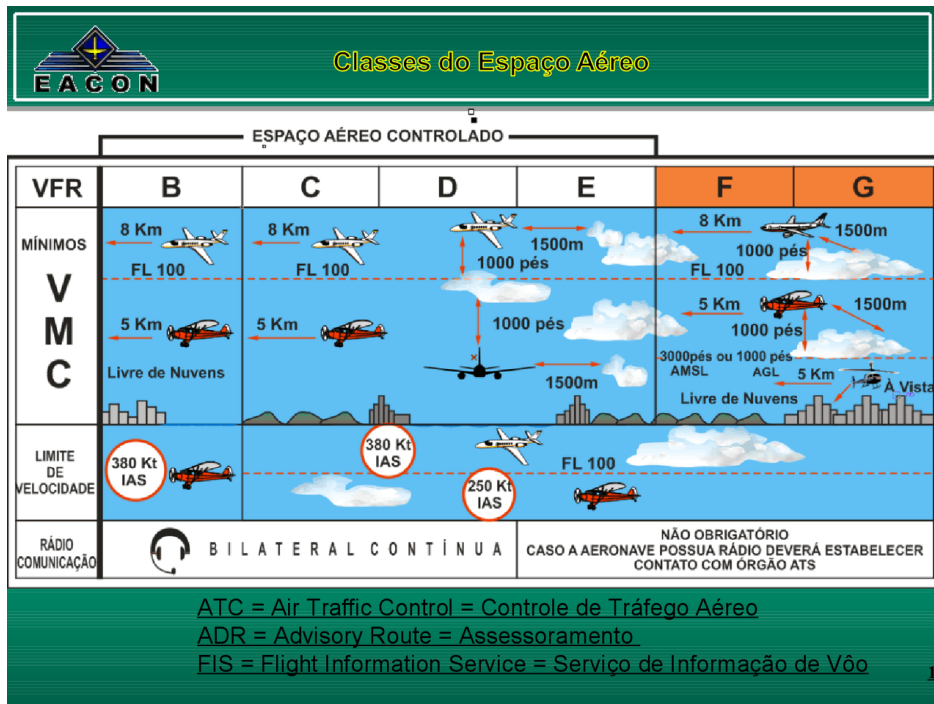


Figura 2.1: Diferentes Classes do Espaço Aéreo [27]

2.2 Espaço Aéreo Português

O espaço aéreo português é constituído por duas grandes áreas: FIR de Lisboa e FIR de Santa Maria, nos Açores, representadas na **Figura 2.2**. Estas representam espaços de dimensões bem definidas onde se prestam serviços de informação de voo e de alerta, com a finalidade de dar informações e recomendações pertinentes, de maneira a que as aeronaves que circulam no espaço aéreo português sejam controladas de forma segura e bastante ordenada. Cada região FIR é vigiada pelo respetivo ACC. Estas duas FIR's totalizam cerca de 5,75 milhões de km^2 de céu, 55 vezes a área de Portugal continental, e possuem fronteiras com FIR's adjacentes de 7 outros Estados, **Figura 2.3**:

- FIR de Madrid e Canárias (Espanha);
- FIR de Casablanca (Marrocos);
- FIR de Sal Oceanic (Cabo Verde);
- FIR de Piarco Oceanic (Trinidad & Tobago);
- FIR de Nova Iorque Oceanic (USA);
- FIR de Gander Oceanic (Canadá);
- FIR de Shanwick Oceanic (Irlanda/UK).

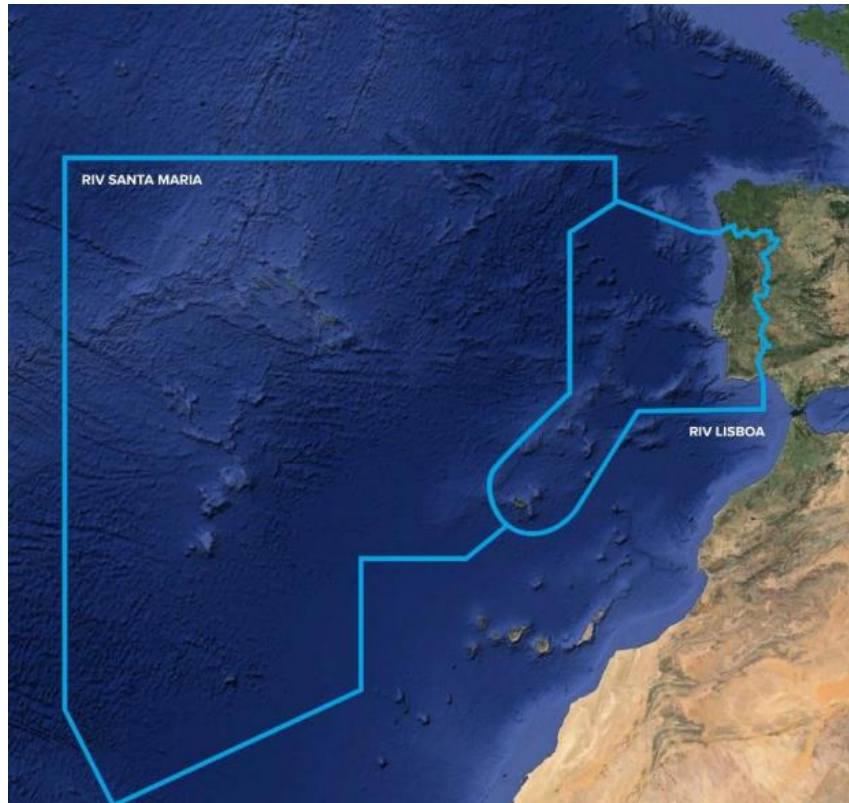


Figura 2.2: FIR de Lisboa e Santa Maria [28]

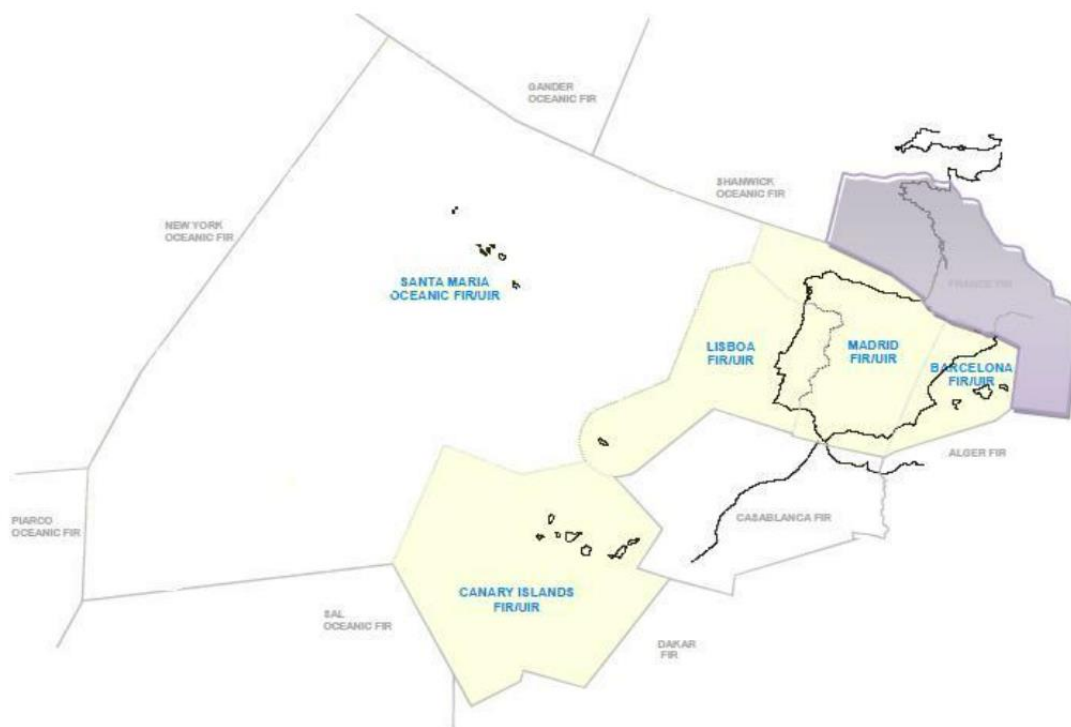


Figura 2.3: FIR's que fazem fronteira com as portuguesas [28]

De uma forma mais explícita, a Região de Informação de Voo de Lisboa cobre uma área total superior a 600 mil km^2 e inclui o Centro de Controlo de Lisboa e as Torres de Controlo dos aeroportos de Cascais, Porto, Lisboa, Funchal, Faro, e Porto Santo. Esta região engloba todo o território continental e o arquipélago da Madeira, tendo registado em 2019, ano de referência da aviação, 649500 movimentos. Quanto à Região de Informação de Voo de Santa Maria, esta cobre uma área total superior a 5,1 milhões de km^2 e inclui o Centro de Controlo Oceânico e as Torres de Controlo dos aeroportos de Ponta Delgada, Horta, Flores, e Santa Maria. Esta região engloba uma enorme parte do oceano Atlântico Norte, abrangendo todo o arquipélago dos Açores, tendo registado em 2019, ano de referência da aviação, 166800 movimentos. Em toda esta área, a NAV Portugal é a entidade responsável pela prestação de serviços ATM.

As FIR's de Portugal encontram-se divididas em espaço aéreo controlado e não controlado. O primeiro trata-se de uma região com dimensões finitas na qual todas as aeronaves estão sujeitas a serviços de controlo de tráfego aéreo, providenciados pela NAV Portugal. Por outro lado, num espaço aéreo não controlado, os voos não dispõem de serviços de controlo de tráfego aéreo, sendo possível estabelecer contacto na mesma quando for preciso. Neste momento, a decisão cabe ao controlador aéreo ceder a passagem de forma a evitar qualquer incidente.

No caso das FIR's portuguesas, encontram-se separadas verticalmente em secções inferiores e superiores (*lower* e *upper*, respetivamente). A secção superior é designada de UIR (*Upper Flight Information Region* – Região de Informação de Voo Superior) enquanto que a secção inferior continua a ser denominada de FIR. Em Portugal, o nível de voo que separa estas duas secções é o FL195, desde 2003. [29]

Como referido anteriormente, o espaço aéreo é composto por 7 classes. Em Portugal, o espaço aéreo encontra-se dividido nas classes A, C, D e G. É possível verificar como se encontram limitadas tanto a FIR de Santa Maria, **Tabela 2.1**, e a FIR de Lisboa, **Tabela 2.2**:

Tabela 2.1: Limites inferiores e limites superiores da FIR de Santa Maria [30]

	Limite Inferior	Limite Superior	Classe do Espaço Aéreo
LPAZ	Surface FL055	Unlimited Unlimited	A

Tabela 2.2: Limites inferiores e limites superiores da FIR de Lisboa [30]

	Limite Inferior	Limite Superior	Classe do Espaço Aéreo
LPPC	Surface	Unlimited	
LPPC – alto mar	Mean Sea Level	FL055	G
	FL055	Unlimited	C
LPPC – território nacional	Surface	FL095	G
	FL095	FL660	C
	FL660	Unlimited	G

Como é possível observar através das tabelas anteriores, na FIR de Santa Maria, a classe do espaço aéreo na área do espaço que vai desde o FLO55 e segue sem limite é a classe A, com exceção da zona do espaço da área terminal de Santa Maria, enquanto na FIR de Lisboa, a classe do espaço aéreo na porção do território nacional que vai desde a superfície até ao FLO95 é a classe G, havendo exclusão das zonas do espaço aéreo controlado.

Para além desta separação do espaço aéreo em duas FIR's, e a consecutiva divisão em espaço aéreo controlado e não controlado, o espaço aéreo português encontra-se dividido em diferentes zonas e áreas de controlo.

Uma TMA ou Área Terminal de Voo (*Terminal Manoeuvring Area*) é uma área que abrange o próprio aeroporto, isto é, trata-se do espaço aéreo circundante de um aeroporto, onde o fluxo de tráfego aéreo é muito denso, fora disso tem uma dispersão onde o fluxo é mínimo, mas como se trata de uma zona de convergência tem que haver um limite de capacidade dependendo do aeroporto ou aeródromo que não pode conter mais do que um certo número de aeronaves. Por essa razão, há necessidade de prever o fluxo, onde a principal vantagem é permitir que o serviço de controlo aéreo da TMA possa elaborar as estratégias táticas de forma a impedir o congestionamento. Outra das vantagens que a previsão do fluxo tem é o facto de quando as aeronaves chegam à entrada dessas zonas terminais, estas não terem de esperar demasiado tempo, senão o combustível pode esgotar, sendo necessário saber em antemão o que se deve fazer. Assim, as companhias aéreas também conseguem poupar combustível. De facto, é possível afirmar que a previsão do fluxo aéreo é bastante importante pois pode salvar muitos voos e principalmente vidas.

Um aeroporto é uma estrutura física, enquanto uma TMA é virtual com dimensões bem especificadas que abrange no sentido de proteger o aeroporto. Geralmente, o que acontece é que entram na TMA aquelas aeronaves que pretendem aterrar no aeroporto em questão, havendo raras exceções de aeronaves que devido a regulações do tráfego aéreo podem entrar e sair da TMA sem aterrar no aeroporto, mas em modo geral acima das 98% de aeronaves que entram na zona terminal vão com o intuito de efetuar a sua aterragem no aeroporto.

Em Portugal, são 5 as áreas terminais de voo existentes: uma na FIR de Santa Maria (TMA de Santa Maria), onde está colocada toda a estrutura de trajetórias/rotas que auxilia todos os aeroportos e aeródromos do Arquipélago do Açores, e quatro na FIR de Lisboa (TMA de Lisboa, TMA de Faro, TMA da Madeira e TMA do Porto). Na **Tabela 2.3** encontram-se apresentados tanto os limites inferiores como os limites superiores destas TMA's portuguesas:

Tabela 2.3: Limite inferior e limite superior das TMA's portuguesas [30]

TMA	Limite Inferior	Limite Superior	Classe do Espaço Aéreo
Lisboa	FL055	FL245	C
Porto	300m AGL/MSL	FL245	C
Santa Maria	300m AGL/MSL FL195	FL195	C
		FL285	A
Madeira	300m AGL/MSL	FL245	C
Faro	300m AGL/MSL	FL245	C

Onde: MSL significa nível médio das águas do mar (*Mean Sea Level*) e AGL quer dizer acima do nível do solo (*Above Ground Level*).

Encontram-se incorporados na TMA de Lisboa, **Figura 2.4**, o Órgão de Controlo de Tráfego Aéreo, as zonas de controlo de Cascais e Lisboa, diversas áreas militares, e o Setor do Órgão de Controlo de Aproximação (Setor APP de Lisboa). Por sua vez, a **Tabela 2.4** representa como se encontra subdividida a TMA de Lisboa:

Tabela 2.4: Subdivisões da TMA de Lisboa [30]

	Limite Inferior	Limite Superior	Classe do Espaço Aéreo
Setor Superior da TMA de Lisboa	FL145	FL245	C
Setor Inferior da TMA de Lisboa	FL055	FL145	C
Setor do APP de Lisboa	300m AGL/MSL 450m AGL/MSL	FL085 FL085	C
Setor 1 do APP de Lisboa	2000ft AMSL	FL085	C
Setor 2 do APP de Lisboa	450m AGL/MSL	2000ft AMSL	C

Onde: AMSL significa acima do nível médio das águas do mar (*Above Mean Sea Level*) e ft é a unidade de medida norte-americana (*foot*).



Figura 2.4: TMA de Lisboa [30]

Quanto à TMA do Porto, encontram-se inseridas parte da área militar restrita de Ovar e a zona de controlo de tráfego aéreo do Porto. Na **Figura 2.5** é possível observar a representação gráfica da TMA do Porto.

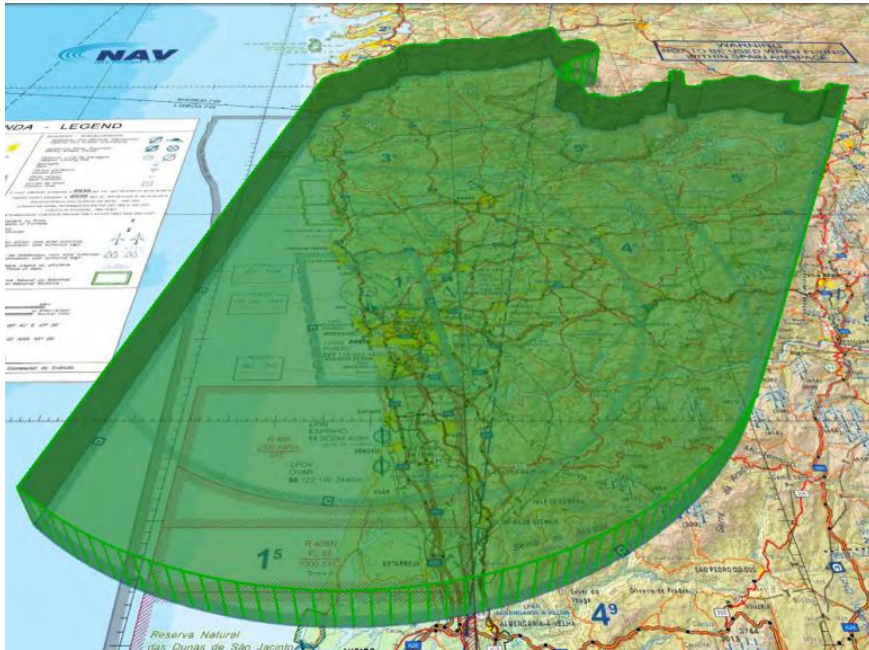


Figura 2.5: TMA do Porto [30]

Existem outras zonas e espaços aéreos, como o caso das Zonas de Tráfego do Aeródromo (ATZ), as Zonas de equipamento rádio e transponder, e as Zonas de Controlo de Tráfego Aéreo (CTR), que são características a cada TMA. Existem outras áreas, sendo elas perigosas, proibidas, restritas e temporariamente reservadas, que são também inerentes a cada TMA.

Uma Zona de Controlo de Tráfego Aéreo (CTR) tem como fundamental objetivo vigiar e proteger as aeronaves na descolagem e aterragem, sendo um espaço aéreo controlado e limitado inferiormente pelo nível médio das águas do mar ou pelo nível do solo.

Em Portugal, são 11 as zonas de controlo de tráfego aéreo existentes: cinco na FIR de Santa Maria (CTR da Horta, CTR de Flores, CTR de Ponta Delgada, CTR de Santa Maria e CTR de Lajes, este último militar), e seis na FIR de Lisboa (CTR de Lisboa, CTR de Faro, CTR da Madeira, CTR do Porto, CTR de Porto Santo e CTR de Cascais). Todas as CTR representam espaços aéreos de classe C.

A CTR de Lisboa auxilia o Aeroporto Humberto Delgado e é limitada inferiormente pelo solo e superiormente por uma altura de 600 metros. Inserem-se nesta CTR algumas infraestruturas aeronáuticas tais como, os heliportos de Algés, Salemas e Alfragide, e os heliportos hospitalares de Santa Maria, Carnaxide, Loures, Amadora--Sintra, Garcia de Orta em Almada e São Francisco Xavier. Estas infraestruturas, embora não sejam controlados situam-se inseridos num espaço aéreo controlado, ficando desta forma sujeitos ao ATC de Lisboa. De seguida, encontra-se representada graficamente na **Figura 2.6** a CTR de Lisboa.



Figura 2.6: CTR de Lisboa [30]

A CTR do Porto serve o Aeroporto Francisco Sá Carneiro e é limitada inferiormente pelo solo e superiormente por uma altura de 600 metros. Encontram-se inseridas nesta CTR o heliporto de Massarelos e os heliportos hospitalares de Matosinhos e do Porto. Estas infraestruturas, embora não sejam controladas situam-se inseridas num espaço aéreo controlado, ficando desta forma sujeitas ao ATC do Porto. Está representada graficamente a CTR do Porto na **Figura 2.7**.

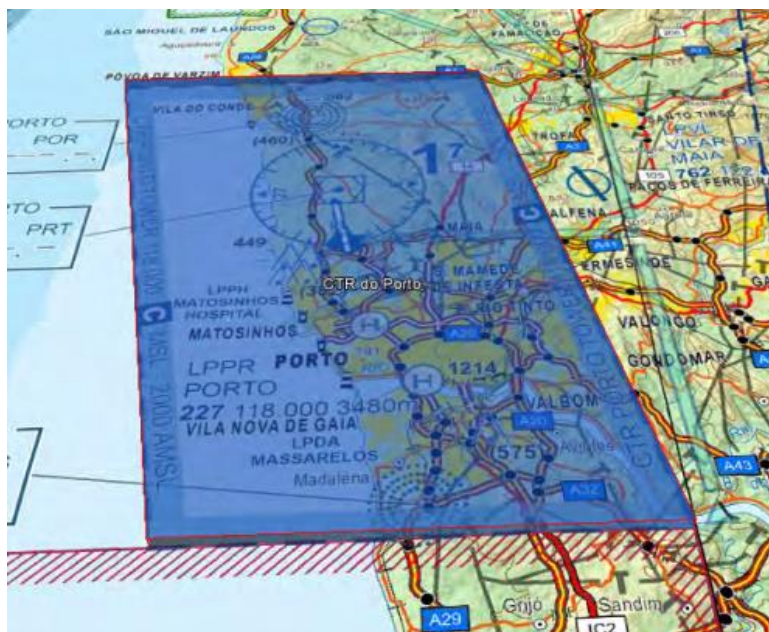


Figura 2.7: CTR do Porto [30]

A **Figura 2.8** exibe os diferentes espaços aéreos de Lisboa. É possível observar a TMA de Lisboa, sendo representada pela maior zona limitada a azul. Dentro da TMA distingue-se o maior círculo incompleto a azul, como sendo o setor 2 do APP de Lisboa, e outra zona ainda mais pequena limitada a azul escuro, como sendo o setor 1 do APP de Lisboa. Por fim, o círculo incompleto mais pequeno a azul claro diz respeito à CTR de Cascais e aquela área mais pequena a azul claro corresponde à CTR de Lisboa.

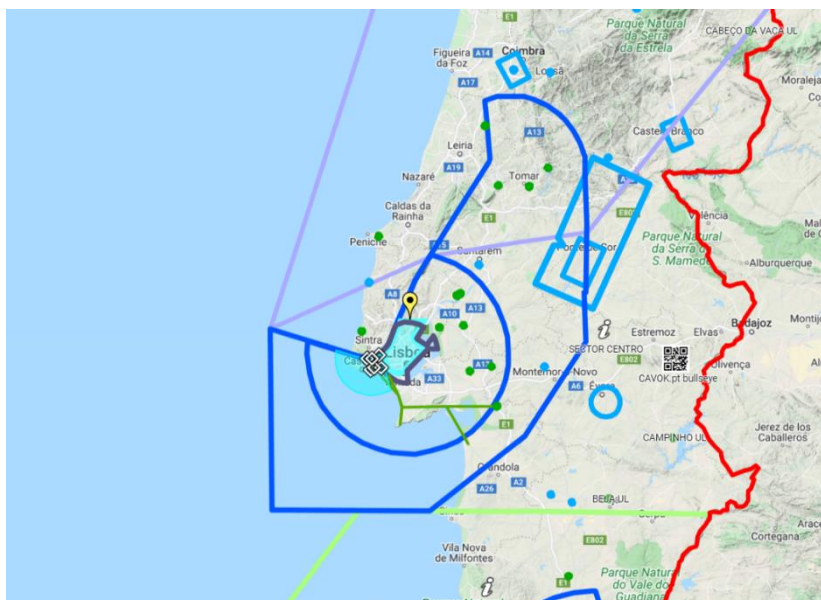


Figura 2.8: Zonas do Espaço Aéreo de Lisboa [31]

A **Figura 2.9** mostra os vários espaços aéreos do Porto. É possível verificar a TMA do Porto, sendo representada pela maior zona limitada a azul escuro. Dentro da TMA distingue-se o maior círculo incompleto a azul, como sendo o setor 2 do APP do Porto, e outra zona onde o círculo incompleto é mais pequeno limitada a azul, como sendo o setor 1 do APP do Porto. Por fim, a área mais pequena a azul claro corresponde à CTR do Porto.

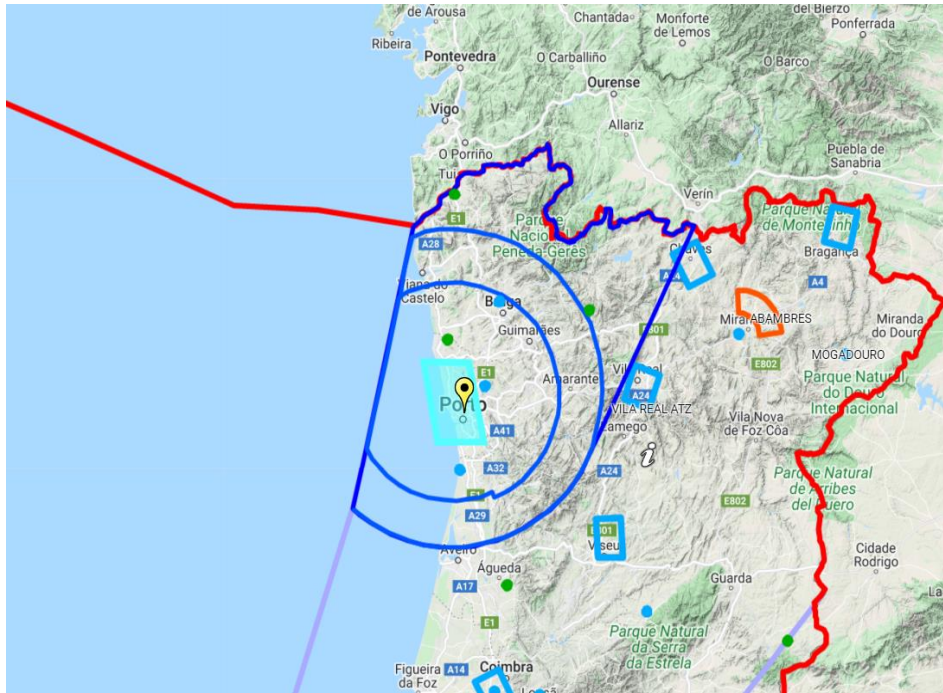


Figura 2.9: Zonas do Espaço Aéreo do Porto [31]

Uma Zona de Tráfego do Aeródromo (ATZ) é um espaço aéreo de dimensões bem definidas instalado à volta de um aeródromo com o intuito de proteger o tráfego local. Estas zonas são espaços aéreos não controlados, isto é, só é fornecido o serviço de informação de voo. Em Portugal, estão estipuladas ATZ's nos seguintes aeródromos: Aeródromo de Viseu, Portimão, Chaves, Bragança, Vila Real, Graciosa, Ponte de Sor, Corvo, Pico, São Jorge, Coimbra e Évora. Em todos estes aeródromos há obrigatoriedade do estabelecimento de comunicações bilaterais entre o serviço que presta o serviço de informação de voo e as aeronaves. O ATZ de Viseu, por exemplo, está representado na **Figura 2.10**.

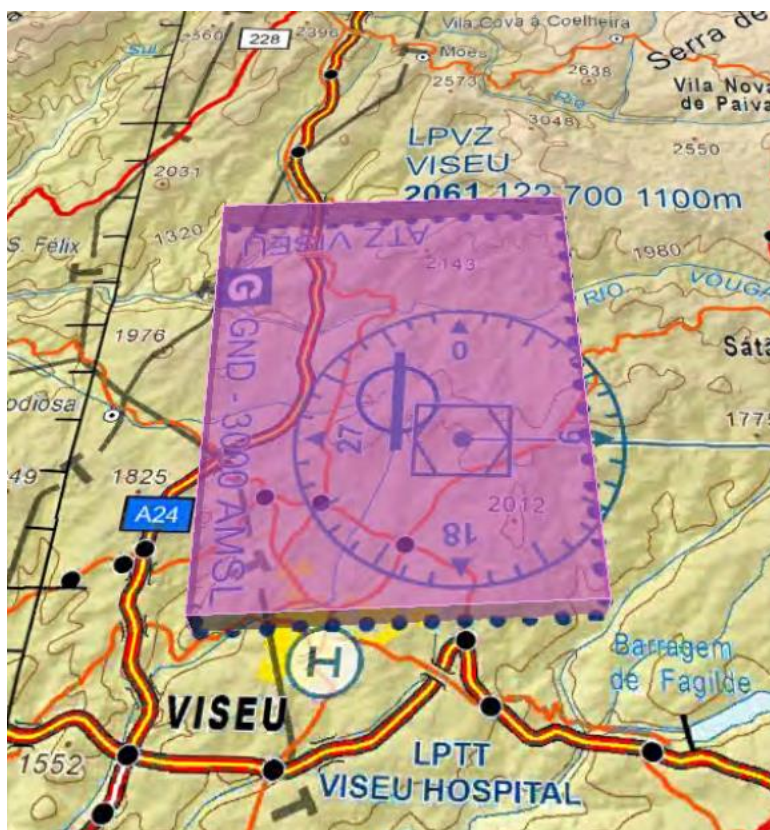


Figura 2.10: ATZ de Viseu [30]

No espaço aéreo português existem também as zonas de equipamento rádio e transponder obrigatório (TRMZ) que podem ser divididas em duas zonas: as zonas de equipamento transponder obrigatório (TMZ), onde os voos devem usar transponders SSR (Radar de Vigilância Secundário), e as zonas de equipamento rádio obrigatório (RMZ), onde deve permanecer uma escuta contínua às comunicações de voz ar-solo e, caso seja preciso, definir comunicações bidirecionais no canal de comunicações apropriado.

Em Portugal, são duas as zonas de equipamento rádio e transponder obrigatório existentes: uma no grupo central dos Açores, contendo a CTR da Horta e perante responsabilidade do controlo de tráfego aéreo da NAV Portugal, e uma na zona do aeródromo de Ponte de Sor. Para voar dentro de qualquer uma destas zonas é necessário pedir uma autorização antecipada ao prestador de serviços de navegação aérea encarregue pela zona e, depois de conseguida essa permissão as aeronaves podem voar até aos 120 metros acima da superfície, pois caso se pretenda voar acima dessa altitude é preciso obter autorização por parte da ANAC (Autoridade Nacional de Aviação Civil). A **Figura 2.11** mostra a zona de equipamento rádio e transponder obrigatório da Horta.



Figura 2.11: TRMZ da Horta [30]

Para finalizar, serão abordadas nesta parte, as Áreas Perigosas, Proibidas, Restritas e Temporariamente Reservadas.

O Espaço Aéreo Perigoso é um espaço de dimensões bem definidas, sobre o território terrestre e/ou marítimo de um Estado onde, em certos períodos, podem existir atividades perigosas para o voo de aeronaves, como por exemplo, exercícios militares como paraquedismo, utilização de veículos aéreos não tripulados, ou até mesmo atividades que envolvam tiros e explosões. É necessário realçar que a entrada de aeronaves nestas zonas é permitida, no entanto, compete ao piloto decidir se vai evitar ou não essas áreas. Estas zonas são designadas por “LPD”. [32]

O Espaço Aéreo Proibido é, tal como o próprio nome diz, um espaço de dimensões estabelecidas, sobre o território marítimo e/ou terrestre de um Estado, onde o voo de aeronaves é proibido, à exceção de certos casos em específico que necessitam da aprovação do estado. Zonas de segurança nacional, refinarias ou mesmo centrais nucleares são exemplos destas áreas. Estas zonas são denominadas por “LPP”, e em Portugal, consta apenas nas publicações de informação aeronáutica uma área proibida, LPP2 - Pinhal do Arneiro. [33]

O Espaço Aéreo Restrito é um espaço de dimensões bem definidas, sobre o território e/ou águas territoriais de uma nação, no qual o voo de aeronaves está dependente de restrições segundo condições específicas. Parques naturais e zonas onde ocorram treinos/exercícios aéreos são alguns exemplos. Estas zonas são designadas por “LPR”, e em Portugal, todas as áreas restritas têm fins militares e a sua extensão começa desde a superfície, sendo elas: LPR40A - Ovar, LPR51A - Beja, LPR61 - Beja, LPR44A - Alverca, LPR26A - Montijo, LPR42A - Sintra, LPR43C - Ota, LPR39A - Tancos, LPR60A - Monte Real. [34]

O Espaço Aéreo Temporariamente Reservado é um espaço que se destina unicamente a atividades militares de exercícios ou de treino, sendo áreas que se encontram divulgadas nas publicações de informação aeronáutica nacionais. [35]

Na **Figura 2.12** estão assinaladas, em Portugal Continental, as zonas perigosas, restritas, temporariamente reservadas e a única área perigosa do dia 30 de março de 2022. As áreas perigosas (LPD), encontram-se sinalizadas a preto, as áreas restritas (LPR), encontram-se representadas a vermelho e amarelo no mapa, a área

temporariamente reservada (LPTRA) está assinalada a bordeaux e, a única área proibida portuguesa (LPP) está representada a preto, em maior detalhe na **Figura 2.13**.

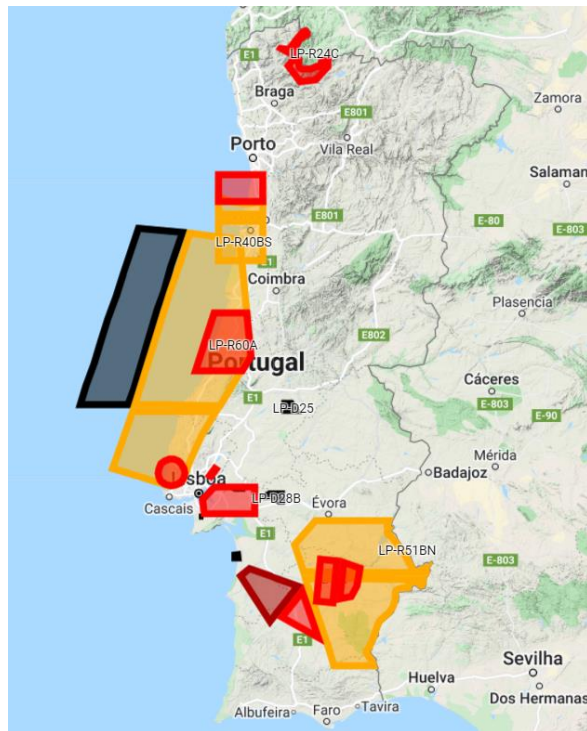


Figura 2.12: Zonas perigosas, restritas, temporariamente reservadas e proibidas em Portugal Continental no dia 30 de março de 2022 [31]

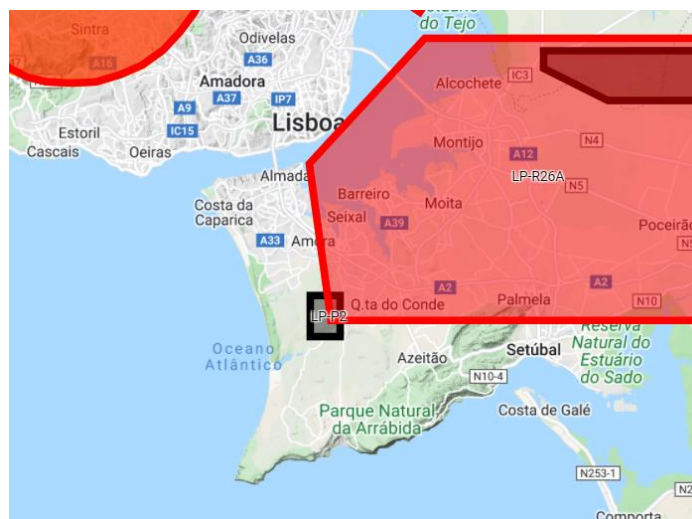


Figura 2.13: Ampliação da Zona proibida em Portugal Continental no dia 30 de março de 2022 [31]

Capítulo 3

Princípios das Cadeias de Markov

3.1 Introdução

As cadeias de Markov são sistemas matemáticos que testam transições de um estado para outro de acordo com determinadas normas probabilísticas. São também casos específicos de processos estocásticos com estados discretos com a particularidade de que a distribuição de probabilidade do próximo estado depende somente do estado atual e não da forma como o estado atual foi alcançado. A propriedade de Markov é entendida como, a probabilidade condicional de qualquer estado futuro, conhecidos os estados do presente e do passado, é independente dos estados do passado, isto é, para se saber os estados do futuro apenas é necessário conhecer os estados do presente.

Serão apresentados os conceitos da cadeia de Markov discreta uma vez que é o que se adequa melhor às aplicações de análise de fluxo.

3.1.1 Cadeias de Markov em Tempo Discreto

As cadeias de Markov discretas [36], onde o estado se altera em certos instantes de tempo discretos, indexados pela variável inteira n . A cada passo n , a cadeia de Markov possui um estado X_n que pertence a um conjunto finito S de possíveis estados, designado de espaço de estados. Sem perda de generalidade, assume-se que $S = \{1, \dots, m\}$ para alguns inteiros positivos m . A cadeia de Markov é descrita em termos das suas probabilidades de transição p_{ij} : sempre que o estado for i , há probabilidade de que o próximo estado seja igual a j . Matematicamente:

$$p_{ij} = \mathbf{P}(X_{n+1} = j \mid X_n = i), \quad i, j \in S \quad (3.1)$$

A teoria principal subjacente aos processos de Markov é que as probabilidades de transição p_{ij} se aplicam sempre que o estado i for visitado, sem ter em conta o que aconteceu no passado, e não importa como o estado i foi alcançado. Assume-se, matematicamente, a propriedade de Markov, que tem como requisito:

$$\mathbf{P}(X_{n+1} = j \mid X_n = i, X_{n-1} = i_{n-1}, \dots, X_0 = i_0) = \mathbf{P}(X_{n+1} = j \mid X_n = i) = p_{ij} \quad (3.2)$$

Onde, para todos os tempos n , todos os estados $i, j \in S$, e todas as sequências possíveis i_0, \dots, i_{n-1} dos estados anteriores. Deste modo, a lei de probabilidade do próximo estado X_{n+1} depende do passado somente apenas através do valor do estado atual X_n .

As probabilidades de transição p_{ij} necessitam de ser não negativas e ter soma igual a um:

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1, \quad \text{para todos os } i \quad (3.3)$$

Frequentemente, permite-se que as probabilidades p_{ii} sejam positivas, onde é possível que o próximo estado seja o mesmo que o atual. Apesar de o estado não alterar, vê-se isto como uma transição de estado, designada de “auto-transição”. Se as probabilidades de transição não dependerem do instante de tempo n , a cadeia designa-se como homogénea, isto é, as probabilidades de transição não se alteram ao longo do tempo.

3.1.1.1 Matriz de Probabilidade de Transição

As cadeias de Markov podem ser representadas graficamente através de uma matriz de transição, que contém todas as probabilidades de transição entre estados num dado intervalo de tempo. Trata-se de uma matriz bidimensional, cujo elemento na linha i , possível estado atual, e coluna j , possível estado futuro, é p_{ij} :

$$\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ p_{m1} & p_{m2} & \cdots & p_{mm} \end{bmatrix}$$

Por definição, qualquer probabilidade de transição varia entre zero e um:

$$0 < p_{ij} < 1$$

A soma da linha na matriz de transição tem de ser igual a 1, isto é:

$$\sum_{j=1}^m p_{ij} = 1 \quad (3.3)$$

Torna-se também benéfico estabelecer o modelo no chamado gráfico de probabilidade de transição, onde cada estado é caracterizado por um ponto e cada linha que liga dois pontos representa uma transição possível, de acordo com uma determinada probabilidade, entre dois estados num certo período de tempo.

3.1.1.2 Probabilidades de Transição em n -Passos

A obtenção das probabilidades de transição entre os estados demonstra elevada importância nas cadeias de Markov. A probabilidade de transição em n -passos estabelece-se por:

$$P_{ij}^n = \mathbf{P}\{X_{n+h} = j \mid X_h = i\}, \quad n, h \geq 0, \quad i, j \geq 0 \quad (3.4)$$

Onde, X_{n+h} significa X no tempo t_{n+h} e X_h significa X no tempo t_h .

Por palavras, P_{ik}^n trata-se da probabilidade de que o estado após n períodos de tempo seja k , sendo i o estado atual. Esta probabilidade pode ser determinada através da equação de Chapman-Kolmogorov, onde: (n número de passos e K é o estado)

$$P_{ij}^{n+m} = \sum_{k=0}^{\infty} P_{ik}^n P_{kj}^m, \quad n, m \geq 0, \forall i, j \quad (3.5)$$

Deixe $\mathbf{P}^{(n)}$ denotar a matriz de probabilidades de transição em n -passos P_{ij}^n , então:

$$\mathbf{P}^{(n+m)} = \mathbf{P}^{(n)}\mathbf{P}^{(m)} = \mathbf{P}^n\mathbf{P}^m \quad (3.6)$$

De forma a determinar o valor de P_{ij}^n , é possível escolher qualquer um destes dois métodos:

- Calcular o elemento ij da n -ésima potência da matriz de transição. Esta metodologia é eficiente, porém é bastante exigente do ponto de vista computacional quando a matriz é de grandes dimensões [37];
- Calcular a probabilidade de cada um dos caminhos que, partindo do estado inicial i , leva ao estado pretendido j em exatamente n -passos e somar as probabilidades obtidas para todos estes caminhos. Quando se trata de cadeias com n elevado ou com muitos estados, este método mostra-se pouco eficaz [37].

3.1.2 Classificação dos Estados

É possível classificar os estados de uma cadeia de Markov com base na regularidade a longo prazo com que são visitados.

Estados Acessíveis

Um estado j é **acessível** através de um estado i se para $n \geq 0$, P_{ij}^n é positiva, isto é, se houver uma probabilidade positiva de chegar a j a partir de i , após alguns períodos de tempo.

Estados Recorrentes

Um estado é **recorrente** se entrando neste estado o processo inevitavelmente irá regressar para esse mesmo estado. Sendo $A(i)$ o conjunto de estados acessíveis a partir de i , diz-se que i é recorrente se para cada j que é acessível a partir de i , este é também acessível a partir de j , ou seja, para qualquer j que pertence a $A(i)$, tem-se que i pertence a $A(j)$.

Estados Transitórios

Se um estado não for recorrente, então é chamado de **transitório**. Um estado é dito transitório, se entrando nesse estado, o processo pode não regressar novamente para esse estado. Existem estados $j \in A(i)$ onde i não é acessível a partir de j . Existe uma probabilidade positiva de o estado ser j depois de cada visita ao estado i . Isto irá acontecer, no devido tempo, e o estado i não pode ser visitado depois disso. É possível concluir que um estado transitório só será visitado um número finito de vezes.

Considere-se f_i como sendo a probabilidade de, a partir do estado i , o processo voltar sempre a entrar no estado i :

$$f_i = P\{U_{n=1}^{\infty}(X_n = i) \mid X_0 = i\} \quad (3.7)$$

Diz-se que o estado i é **recorrente** se $f_i = 1$ e **transitório** se $f_i < 1$. Então, o estado i é **recorrente** se $\sum_{n=1}^{\infty} P_{ii}^n = \infty$ e é **transitório** se $\sum_{n=1}^{\infty} P_{ii}^n < \infty$.

É de salientar que a recorrência ou a transição não são definidas pelos valores numéricos de p_{ij} , mas sim pelos arcos do gráfico de probabilidade de transição (pares (i, j) para os quais $p_{ij} > 0$). A **Figura 3.1** exemplifica um gráfico de probabilidade de transição, e os respetivos estados transitórios e recorrentes. É possível observar que 1 é um estado recorrente pois o único estado acessível é o seu. O estado 2 é transitório, porque os estados 1, 3 e 4 encontram-se acessíveis a partir de 2, mas este último não é acessível a partir de nenhum deles. Por fim, os estados 3 e 4 são recorrentes uma vez que são acessíveis somente entre os dois e cada um entre si mesmo.

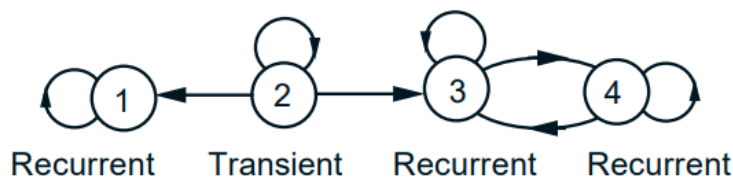


Figura 3.1: Classificação dos estados dado o gráfico de probabilidade de transição [36]

De forma resumida, uma cadeia de Markov pode ser decomposta em uma ou mais classes recorrentes, além de possivelmente em alguns estados transitórios. Um estado transitório não é acessível a partir de qualquer estado recorrente, enquanto que um estado recorrente é acessível a todos os estados da sua classe, não sendo acessível a partir de estados recorrentes noutras classes. Pelo menos um estado, possivelmente mais recorrente, é acessível a partir de um certo estado transitório.

Estados Comunicantes

Um estado i diz-se **comunicante** com o estado j se o estado i é alcançável a partir do estado j e o estado j é alcançável através do estado i . A relação de comunicação satisfaz as seguintes três propriedades:

- Todo o estado i se comunica com ele mesmo, $(i \leftrightarrow i)$, pois P_{ii}^0 ;
- Se o estado i comunica com o estado j , então o estado j comunica com o estado i , $(i \rightarrow j) \Rightarrow (j \rightarrow i)$;
- Se o estado i comunica com o estado j , e o estado j comunica com o estado k , então o estado i comunica com o estado k , $(i \rightarrow j) \Rightarrow (j \rightarrow k) \Rightarrow (i \rightarrow k)$.

Diz-se que dois estados que se comunicam estão na mesma **classe**, logo, se todos os estados comunicarem entre si, todos os estados pertencem a uma só classe, sendo neste caso a cadeia de Markov **irreduzível**.

Estados Absorventes

Um estado é designado de **absorvente** se entrando nesse estado, o processo não sairá desse estado. Um estado i é absorvente se e só se $P_{ii} = 1$. Então, é possível afirmar que um estado absorvente é um caso especial de um estado recorrente. Desta forma:

- Todo o estado absorvente é recorrente;
- Todo o estado absorvente pertence a uma única classe, $C = \{i\} \Rightarrow i$ é absorvente;
- Numa cadeia de Markov um conjunto de estados forma uma classe C , se quaisquer que forem estes estados, eles sejam comunicantes.

3.1.2.1 Periodicidade

A presença ou ausência de um certo padrão periódico nos tempos em que um estado é visitado é uma caracterização de uma classe recorrente. Esta classe é **periódica** se os seus estados conseguirem ser agrupados em $d > 1$ subconjuntos desarticulados S_1, \dots, S_d de forma a que todas as transições de um subconjunto levem ao subconjunto seguinte. De modo mais preciso:

$$\text{se } i \in S_k \text{ e } p_{ij} > 0, \text{ então } \begin{cases} j \in S_{k+1}, & \text{se } k = 1, \dots, d-1 \\ j \in S_1, & \text{se } k = d \end{cases} \quad (3.8)$$

Uma classe recorrente que não é periódica, designa-se de **aperiódica**. Isto acontece se e apenas se houver um tempo \bar{n} e um estado s na classe, tal que $p_{is}(\bar{n}) > 0$ para todo $i \in R$.

Quanto à ergodicidade, uma rede é considerada **ergódica** se for aperiódica e também, irreduzível.

3.1.3 Comportamento em Estado Estacionário

3.1.3.1 Teorema da Convergência do Estado Estacionário

Suponha-se uma cadeia de Markov com uma só classe recorrente aperiódica. Então, os estados j são associados com probabilidades de estado estacionário (π_j) que possuem as seguintes características:

- $\lim_{n \rightarrow \infty} P_{ij}^n = \pi_j$, para qualquer i, j
- π_j são a solução única do seguinte sistema: (equações de equilíbrio)

$$\pi_j = \sum_{k=1}^m \pi_k p_{kj}, \quad j = 1, \dots, m, \quad (3.9)$$

$$1 = \sum_{k=1}^m \pi_k \quad (3.10)$$

- Tem-se que:

$$\pi_j > 0, \quad \text{para todos os estados recorrentes } j$$

$$\pi_j = 0, \quad \text{para todos os estados transitórios } j$$

3.1.3.2 Interpretações de frequência a Longo Prazo

Probabilidades de estado estacionário como frequências de estado esperadas

No caso de uma cadeia de Markov com apenas uma classe aperiódica, as probabilidades de estado estacionário (π_j) satisfazem:

$$\pi_j = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{v_{ij}(n)}{n} \quad (3.11)$$

Sendo $v_{ij}(n)$ o valor esperado do número de visitas ao estado j a partir do estado i nas primeiras transições n .

Deste modo, é possível afirmar que π_j é a fração de tempo esperada a longo prazo que o estado passa a ser j . Cada vez que este é visitado, existe a probabilidade de que a transição seguinte leve ao estado k . Pode-se então concluir que $\pi_j p_{jk}$ nota-se como sendo a fração de transições esperada a longo prazo que move o estado de j para k .

Frequência esperada de uma transição particular

Considerando n transições de uma cadeia de Markov com uma única classe que é aperiódica, a partir de um determinado estado inicial, e sendo $q_{jk}(n)$ o número esperado de tais transições que direcionam o estado de j para k , então, independentemente do estado inicial, tem-se:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{q_{jk}(n)}{n} = \pi_j p_{jk} \quad (3.12)$$

A interpretação da frequência de π_j e de $\pi_j p_{jk}$ facilita a análise das equações de equilíbrio. O estado é j se e apenas se houver uma transição que leve o estado para j . Desta forma, a frequência esperada π_j das visitas a j é igual à soma das frequências esperadas $\pi_k p_{kj}$ de transições que levem a j , e $\pi_j = \sum_{k=1}^m \pi_k p_{kj}$, **Figura 3.2.**

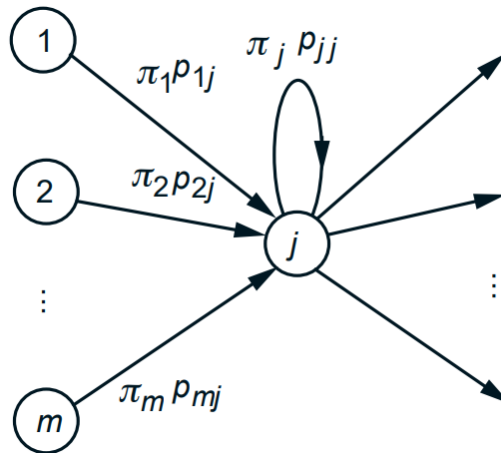


Figura 3.2: Interpretação das equações de equilíbrio em termos de frequências [36]

3.1.4 Probabilidades de Absorção e Tempo Esperado Para a Absorção

Será abordado agora o comportamento a curto prazo das cadeias de Markov. Considere-se o caso em que a cadeia de Markov inicia num estado transitório. Tem interesse o primeiro estado recorrente a ser introduzido, bem como o tempo até que isso ocorra.

O comportamento imediato da cadeia Markov é imaterial, após um estado recorrente ser detetado. Deste modo, assume-se que cada estado recorrente k está a absorver, ou seja:

$$p_{kk} = 1, \quad p_{kj} = 0 \quad \text{para qualquer } j \neq k$$

No caso de haver apenas um estado de absorção k , a sua probabilidade de estado estacionário é 1, uma vez que os restantes estados são transitórios e possuem zero probabilidade de estado estacionário. Este é alcançado com probabilidade 1, através de qualquer estado inicial. Se existirem diversos estados de absorção, a probabilidade de um deles possivelmente ser obtido continua a ser 1, só que neste caso a identidade do estado absorvente a ser introduzido é aleatória e as probabilidades que se encontram

associadas podem depender do estado inicial. Nesta sequência, fixa-se um determinado estado de absorção s e considera-se a probabilidade de absorção a_i que é provavelmente obtida a partir de i :

$$a_i = \mathbf{P}(X_n \text{ eventualmente fica igual ao estado absorvente } s \mid X_0 = i) \quad (3.13)$$

As probabilidades de absorção são capazes de ser alcançadas através da resolução do seguinte sistema de equações lineares:

$$a_s = 1, \quad (3.14)$$

$$a_i = 0, \quad \text{para todos os } i \neq s \text{ absorventes} \quad (3.15)$$

$$a_i = \sum_{j=1}^m p_{ij} a_j, \quad \text{para todos os } i \text{ transitórios} \quad (3.16)$$

De forma a analisar esta última equação, considera-se um estado transitório i e que A seja o acontecimento onde o estado s é eventualmente alcançado. Assim sendo:

$$\begin{aligned} a_i &= \mathbf{P}(A \mid X_0 = i) \\ &= \sum_{j=1}^m \mathbf{P}(A \mid X_0 = i, X_1 = j) \mathbf{P}(X_1 = j \mid X_0 = i) \quad (\text{Teorema de Probabilidade Total}) \\ &= \sum_{j=1}^m \mathbf{P}(A \mid X_1 = j) p_{ij} \quad (\text{Propriedade de Markov}) \\ &= \sum_{j=1}^m p_{ij} a_j \end{aligned}$$

3.1.4.1 Tempo Esperado Para a Absorção

Para qualquer estado i , sendo \mathbf{E} o número de transições até à absorção a partir de i , expressa-se:

$$\mu_i = \mathbf{E} [\min\{n \geq 0 \mid X_n \text{ é recorrente}\} \mid X_0 = i] \quad (3.17)$$

Se i for recorrente, esta definição estabelece μ_i para zero.

O tempo esperado μ_i para a absorção, a partir do estado i é a solução única das seguintes equações:

$$\mu_i = 0, \quad \text{para todos os estados recorrentes } i \quad (3.18)$$

$$\mu_i = 1 + \sum_{j=1}^m p_{ij} \mu_j, \quad \text{para todos os estados transitórios } i \quad (3.19)$$

Capítulo 4

Modelação do Fluxo de Tráfego Aéreo

4.1 Conceitos Gerais

Nesta parte será apresentado um exemplo da modelação de sistemas dinâmicos através das cadeias de Markov, de modo a ser possível determinar a matriz de transição.

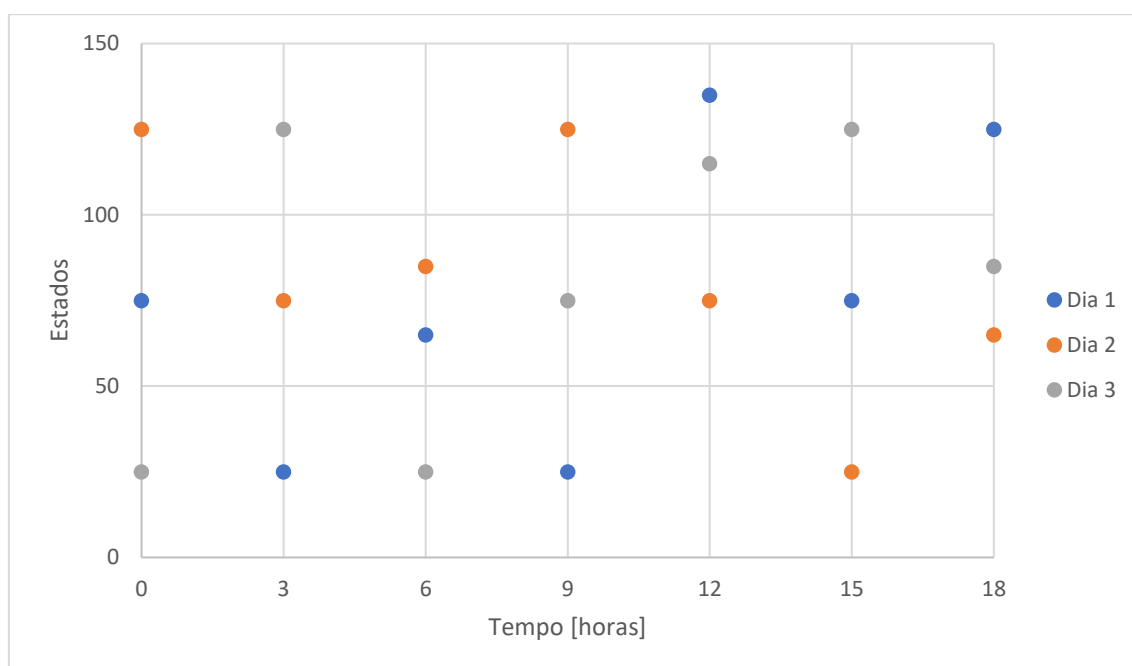


Figura 4.1: Nível de ocupação do aeroporto durante três dias

Considere-se, por exemplo, um aeroporto que se encontra aberto ao fluxo aéreo desde as 5h da manhã até às 23h da noite, isto é, funciona 18 horas por dia. Os Estados discretos do modelo da cadeia de Markov considerados foram definidos da seguinte forma:

- Nível de Fluxo Baixo (E1) – $[0, 50[$;
- Nível de Fluxo Médio (E2) – $[50, 100[$;
- Nível de Fluxo Alto (E3) – $[100, 150]$.

O número de Estados considerados é apenas um exemplo. No caso do fluxo de tráfego aéreo, pode ser um fluxo baixo, médio, normal, alto, ou até muito alto. Neste caso optou-se apenas por utilizar três estados, e o tempo tanto poderia ser em horas, dias ou até anos.

Começa-se então por calcular as probabilidades de transição, de modo a ser possível efetuar a representação do diagrama de transição. Na **Figura 4.2** está representada uma parte do diagrama, de forma a facilitar a explicação do cálculo das probabilidades. Neste caso foram apenas dados dois exemplos, a probabilidade de transição do estado E1 para o estado E2 e a probabilidade de iniciando no estado E2 permanecer no mesmo.

Começando pela transição de E1 para E2, a probabilidade de transição é calculada da seguinte maneira:

- Numerador: através da visualização da **Figura 4.1**, analisa-se quantas vezes em cada dia, existe a transição de um Nível de Fluxo Baixo (E1) para um Nível de Fluxo Médio (E2). No Dia 1 tem-se apenas uma transição, no Dia 2 e Dia 3 também uma única transição, ou seja, o numerador é a soma do número de transições ($1 + 1 + 1 = 3$);
- Denominador: a partir da **Figura 4.1**, observa-se o número de vezes em cada dia, onde exista transição de um Nível de Fluxo Baixo (E1) para outro Nível de Fluxo qualquer (E1, E2 ou E3). No Dia 1 verificam-se duas transições, no Dia 2 apenas uma transição e no Dia 3 volta a haver duas transições, ou seja, o denominador é a soma deste número de transições ($2 + 1 + 2 = 5$).

Agora, a probabilidade de estando em E2 e continuar no mesmo estado é calculada da seguinte forma:

- Numerador: através da **Figura 4.1**, analisa-se quantas vezes em cada dia, o aeroporto estando num Nível de Fluxo Médio (E2) permanece exatamente no mesmo estado (E2). No Dia 1 e Dia 3 não existe nenhuma transição, ao contrário do Dia 2 onde se observa uma única transição, ou seja, o numerador é a soma do número de transições ($0 + 1 + 0 = 1$);
- Denominador: a partir da análise da **Figura 4.1**, observa-se o número de vezes em cada dia, onde exista transição de um Nível de Fluxo Médio (E2) para outro Nível de Fluxo qualquer (E1, E2 ou E3). Tanto no Dia 1 como no Dia 2 existem três transições, enquanto que no Dia 3 visualiza-se uma só transição, ou seja, o denominador é a soma deste número de transições ($3 + 3 + 1 = 7$).

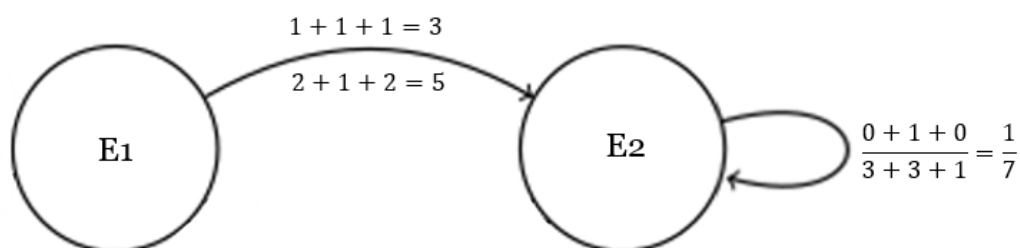


Figura 4.2: Diagrama de probabilidade de transição (dos estados $E1 \rightarrow E2$ e $E2 \leftrightarrow E2$)

Posto isto, utilizando a mesma metodologia, é possível calcular as restantes probabilidades de transição. Deste modo, o diagrama de transição obtido está representado na **Figura 4.3**.

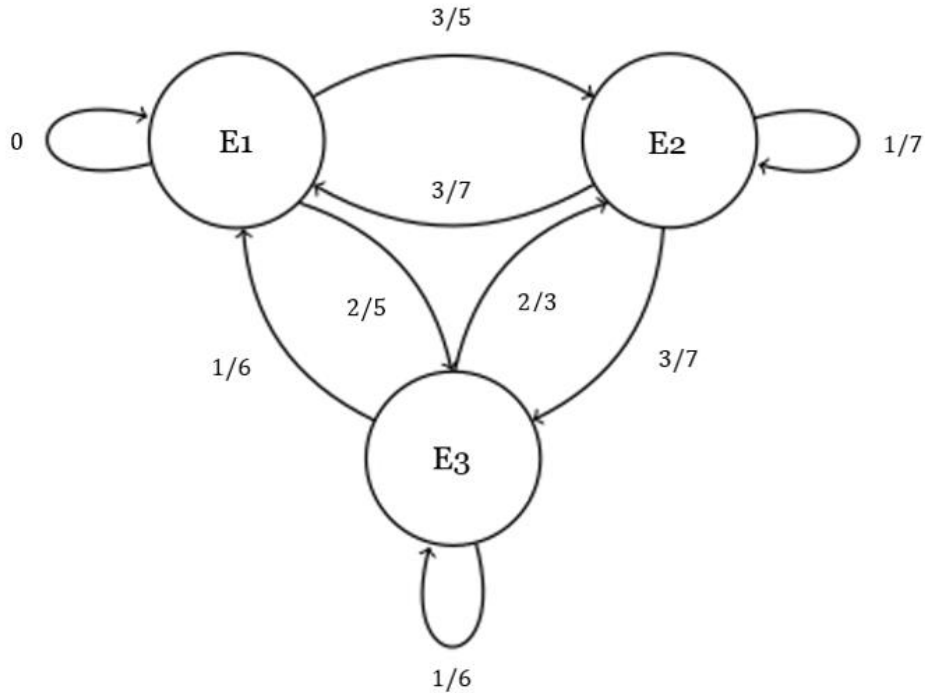


Figura 4.3: Diagrama de probabilidade de transição

Uma vez calculadas todas as probabilidades, a matriz de probabilidade de transição é dada por:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & 3/5 & 2/5 \\ 3/7 & 1/7 & 3/7 \\ 1/6 & 2/3 & 1/6 \end{bmatrix}$$

4.2 Modelação do Fluxo de Tráfego Aéreo

De modo a ilustrar o procedimento a efetuar, utilizando um *Excel* fornecido pela *AirNav* (www.airnavsystems.com) relativo ao número de chegadas de aeronaves ao aeroporto de Lisboa durante apenas seis dias, e estudado em intervalos de uma hora (das 5h às 24h), o diagrama de transição obtido está representado na **Figura 4.4**.

Os Estados discretos do modelo da cadeia de Markov considerados encontram-se definidos da seguinte forma:

- Nível de Fluxo Baixo (E1) – [0, 8[;
- Nível de Fluxo Médio (E2) – [8, 16[;
- Nível de Fluxo Alto (E3) – [16, 100].

Este número 100 significa tudo o que fica acima de 16 (é um número exagerado que não pode ser atingido).

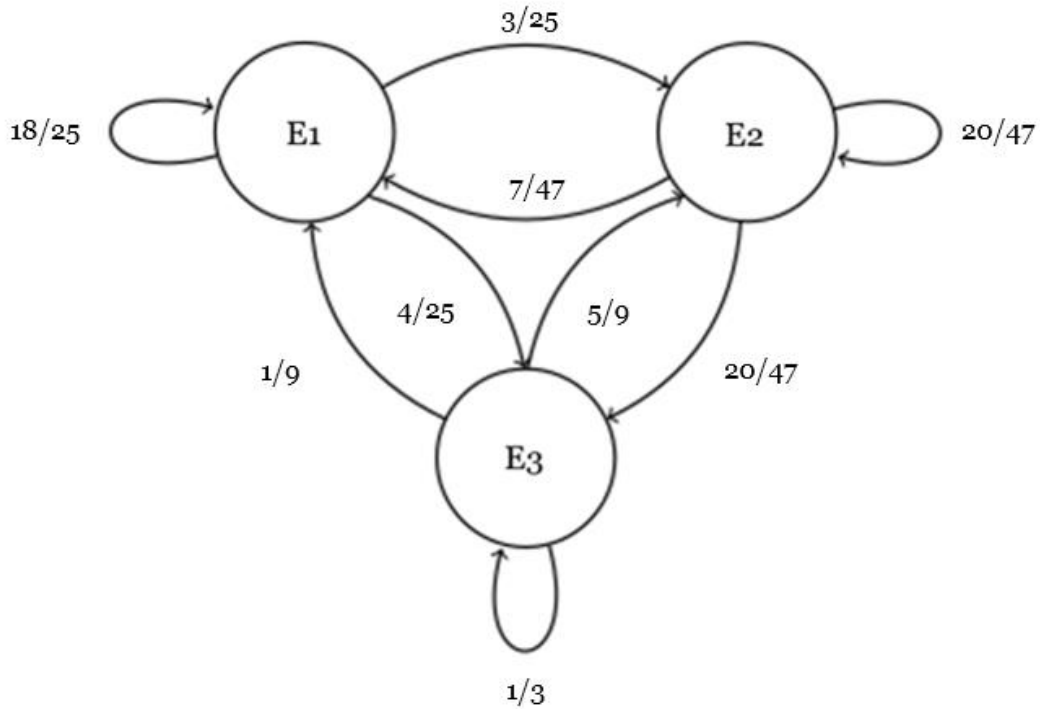


Figura 4.4: Diagrama de probabilidade de transição

Uma vez calculadas todas as probabilidades, a matriz de probabilidade de transição é dada por:

$$P = \begin{bmatrix} 18/25 & 3/25 & 4/25 \\ 7/47 & 20/47 & 20/47 \\ 1/9 & 5/9 & 1/3 \end{bmatrix}$$

Para depois se utilizar esta rede de modo a fazer previsões é preciso acertar que esta tenha as propriedades desejadas. Verifique-se primeiro a ergodicidade da rede, ou seja, é necessário analisar se esta é aperiódica e irredutível.

Como abordado anteriormente, uma rede é considerada irredutível se todos os estados são alcançáveis a partir de qualquer outro estado num número finito de passos. De facto, através do grafo é possível observar que isto se cumpre, ou seja, a rede é irredutível. O problema de irredutibilidade surge quando houver zeros na matriz de transição.

Quanto à periodicidade, uma rede é aperiódica se o período de cada estado for igual a 1. Determinando os períodos dos estados:

- O estado 1 é aperiódico, uma vez que consegue retornar a si mesmo com probabilidade maior que zero num só passo. (Período igual a 1)
- O estado 2 pode retornar a si mesmo em 2 passos ($2 \rightarrow 2$) ou em 3 passos ($2 \rightarrow 3 \rightarrow 2$). Desta forma, o período é 1, pois é o maior divisor comum de 2 e 3.
- O estado 3 pode retornar a si mesmo em 2 passos ($3 \rightarrow 3$) ou em 3 passos ($3 \rightarrow 2 \rightarrow 3$). Logo, o período deste estado é o maior divisor comum de 2 e 3, ou seja, é 1.

Sendo todos os estados aperiódicos, a cadeia diz-se aperiódica.

Por fim, é possível confirmar que a rede é ergódica.

Com base na revisão bibliográfica realizada, é possível utilizar, do modo clássico convencional, os métodos das séries temporais ou séries cronológicas, como o método ARIMA, que utiliza a dinâmica da evolução da associação dos estados do sistema. No entanto, a abordagem utilizada neste estudo envolve a análise de conjuntos de estados para determinar a probabilidade de encontrar um determinado estado no próximo tempo discreto. Esta probabilidade é condicional e baseia-se na probabilidade de transição, que pode ser obtida através de uma matriz de transição, a rede bayesiana.

Durante o funcionamento do sistema, a probabilidade de transição pode ser atualizada, mas inicialmente ela é determinada pela análise dos estados anteriores e dos próximos estados possíveis. O objetivo é prever o estado do sistema no próximo tempo discreto com base na probabilidade de transição.

Tudo isto se baseia na aplicação do Teorema de Bayes para obter a probabilidade condicional necessária. O Teorema de Bayes é uma fórmula que permite determinar a probabilidade de um evento ocorrer, com base em informações prévias. É dado por:

$$P(A|B) = \frac{P(B|A) * P(A)}{P(B)} \quad (4.1)$$

Onde:

- $P(A|B)$ é a probabilidade condicional de A dado B ;
- $P(B|A)$ é a probabilidade condicional de B dado A ;
- $P(A)$ é a probabilidade de A ocorrer;
- $P(B)$ é a probabilidade de B ocorrer.

A equação da esperança condicional, por sua vez, representa o valor médio esperado de uma variável aleatória X , dada alguma informação ou conhecimento sobre outra variável aleatória Y , e é dada por:

$$E[X|Y] = \sum x * P[X = x|Y] \quad (4.2)$$

Onde:

- $E[X|Y]$ é a esperança condicional de X dado Y ;
- $P[X = x|Y]$ é a probabilidade condicional de X igual a x dado Y .

4.3 Previsão (*Forecasting*)

De acordo com a expressão da esperança condicional na sessão anterior. Então têm-se a seguinte equação:

$$\widehat{X}_{t+1} = \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^i) \widehat{X}_{t+1}^j \quad (4.3)$$

A fórmula apresentada permite estimar o número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo seguinte, $t + 1$. Para tal, X_t^i representa o estado atual do sistema no tempo t , enquanto que \widehat{X}_{t+1} representa a estimativa do número de aeronaves no tempo seguinte. Mais especificamente, \widehat{X}_{t+1}^j é a estimativa do número de aeronaves no estado j no tempo $t + 1$. A probabilidade condicional $P(X_{t+1}^j | X_t^i)$, onde X_{t+1}^j é um estado, indica a probabilidade de o sistema transitar do estado i para o estado j num período de tempo e pode ser obtida através da matriz de transição. Posteriormente, a probabilidade obtida deve ser multiplicada pelo número de elementos no estado em questão para obter a estimativa correta.

Vamos considerar um modelo de estados onde, no tempo t , o estado atual é E1. É possível transitar deste estado para E1, E2 ou E3. Durante o período de observação, é possível calcular a média de aeronaves em cada um destes estados em função do tempo.

Por exemplo, suponha-se que o estado E1 tem duas aeronaves, o estado E2 tem cinco aeronaves e o estado E3 tem sete aeronaves. Agora, considere-se que, no tempo t , encontra-se no estado E1. A questão é quantas aeronaves entrarão na zona terminal no tempo $t + 1$. Para responder a esta pergunta, deve-se multiplicar o número de aeronaves do estado E1 (dois) pela probabilidade de permanecer no mesmo estado (E1E1), somado ao número de aeronaves do estado E2 (cinco) multiplicado pela probabilidade de transição para E2 (E1E2), somado ao número de aeronaves do estado E3 (sete) multiplicado pela probabilidade de transição para E3 (E1E3). Esta média ponderada, obtida pela multiplicação dos números de aeronaves pelas probabilidades de transição, representa a previsão do número de aeronaves que entrarão no tempo $t + 1$.

Em cada estado, é o número de aeronaves por intervalo Δt definido. Por exemplo, considerando que se está no estado E1 num determinado momento t e o intervalo de tempo definido for de uma hora, a questão é quantas aeronaves aparecerão no intervalo de tempo entre a 1 h e as 2 h, por exemplo. A determinação é feita por meio da multiplicação da probabilidade associada a cada transição pelo número de aeronaves correspondente. No final, o resultado obtido representa a previsão do número de aeronaves que entrarão neste intervalo de tempo.

Se, num dado momento, o sistema estiver no estado E2, a questão é: qual será o estado do sistema no tempo $t + 1$ e o número de aeronaves associado. Para responder a esta pergunta, deve-se considerar as possíveis transições de estado, multiplicando-se o número de aeronaves do estado E2 (cinco) pela probabilidade de permanecer no mesmo estado (E2E2), somado ao número de aeronaves do estado E3 (sete) multiplicado pela probabilidade de transição para E3 (E2E3), somado ao número de aeronaves do estado E1 (dois) multiplicado pela probabilidade de transição para E1 (E2E1). É importante destacar que a identificação correta do estado atual é crucial para determinar o número de aeronaves na próxima etapa e, depois disso, é necessário relacionar o número de aeronaves com cada estado (E1, E2, E3) em função do intervalo de tempo Δt .

O próximo passo $t + 1$ corresponde ao próximo intervalo de tempo. Nesse momento, estima-se o número de aeronaves e verifica-se em qual estado se encontra.

Então, utiliza-se a matriz de transição de Markov para estimar o estado, o que é uma abordagem direta para trabalhar com valores numéricos. Embora a cadeia de Markov possa ser utilizada para trabalhar variáveis que não sejam numéricas, como previsão do tempo (sol, chuva ou nublado), quando as variáveis são numéricas, como no caso do número de aeronaves, a estimativa é obtida por meio do conceito de probabilidade de transição, que corresponde ao cálculo da média condicional ou da esperança matemática condicional. Essa é a forma utilizada para fazer previsões na cadeia de Markov para grandezas numéricas. Importante realçar que todas essas etapas são válidas apenas quando a rede é ergódica, caso contrário, elas não se aplicam.

Neste caso, no total, o estado E1 tem 109 aeronaves, o estado E2 tem 642 aeronaves e o estado E3 tem 525 aeronaves. Efetuando a divisão desse número de aeronaves pelo número de intervalos de uma hora, obtém-se a média de aeronaves para cada estado em cada intervalo. O estado E1 tem uma média de 0,9561 aeronaves (M_E1), o estado E2 tem uma média de 5,6316 aeronaves (M_E2) e o estado E3 tem uma média de 4,6053 aeronaves (M_E3). Utilizando o diagrama de transição da **Figura 4.4**, e considerando-se que, no tempo t , encontra-se no estado E1, quantas aeronaves entrarão na zona terminal no tempo $t + 1$. Para isso, utiliza-se a equação anterior:

$$\widehat{X}_{t+1} = \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^1) \widehat{X}_{t+1}^j$$

$$\widehat{X}_{t+1} = P(E1E1). (M_E1) + P(E1E2). (M_E2) + P(E1E3). (M_E3)$$

$$\widehat{X}_{t+1} = \frac{18}{25} \cdot 0,9561 + \frac{3}{25} \cdot 5,6316 + \frac{4}{25} \cdot 4,6053$$

$$\widehat{X}_{t+1} = 2,1011$$

Este resultado representa a previsão do número de aeronaves que entrarão no tempo $t + 1$. Então, chegam em média duas aeronaves.

Para estimar o desvio padrão, pode-se utilizar a raiz quadrada da variância do número de aeronaves previsto. O respetivo desvio padrão calculado é de 0.204079. Agora, é possível determinar o erro padrão, através da seguinte equação:

$$\text{Erro Padrão} = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\sqrt{\text{Tamanho da Amostra}}} \quad (4.4)$$

Onde, *Tamanho da Amostra* é o número total de aeronaves analisadas. Então, o erro padrão obtido é de 0.0057.

Quanto ao intervalo de confiança do número de aeronaves previsto para chegar no próximo intervalo de tempo, é necessário definir um nível de confiança desejado, que é a probabilidade de que o valor real esteja dentro do intervalo de confiança. Assume-se então um nível de confiança de 95%. De modo a calcular o intervalo de confiança, utiliza-se a distribuição normal. A fórmula para o intervalo de confiança é a seguinte:

$$\text{Intervalo de Confiança} = \text{Valor Previsto} \pm Z * \text{Erro Padrão} \quad (4.5)$$

Onde, *Valor Previsto* é a previsão do número de aeronaves no próximo intervalo de tempo, *Z* é o valor crítico da distribuição normal para o nível de confiança desejado (por exemplo, se o nível de confiança for 95%, *Z* é 1,96), e *Erro Padrão* é o erro padrão calculado. Posto isto, o intervalo de confiança calculado é [2.0899; 2.1123], ou seja, neste caso em que o erro padrão é quase nulo, é possível dizer que chegam em média duas aeronaves.

4.4 Estado Permanente da Rede

Na equação (3.11) trata-se da determinação teórica da probabilidade estacionária de cada estado. Mas, de facto, esta equação é inexplorável (por ser uma equação bastante teórica). Na prática, a probabilidade estacionária de cada estado está obtida pelo estado permanente da rede.

Este estado é a solução da seguinte equação:

$$s = s.P \quad (4.6)$$

O estado permanente da rede é representado pelo vetor *s*, cuja dimensão é igual à dimensão da própria rede e equivale ao número de estados possíveis. A solução deste sistema é determinada pelo vetor *s*, que é obtido em função da disposição da matriz de transição *P*. A equação a ser resolvida é $s = s.P$ ou $s = P.s$, onde *s* representa a incógnita a ser encontrada e *P* representa a matriz de transição. De facto, o que está aqui presente é o vetor próprio associado ao valor próprio 1, que é responsável por representar o estado permanente da rede. Este vetor *s* é, na verdade, um vetor de probabilidade cujos elementos somados equivalem a 1. Cada elemento do vetor *s* representa uma probabilidade associada a um determinado estado da rede. Como exemplo, pode-se imaginar que o primeiro elemento de *s* seja 0,3, o segundo elemento seja 0,5 e o terceiro elemento seja 0,2, cuja soma resulta em 1. Isso significa que o sistema estará no estado E1 com probabilidade 0,3, no estado E2 com probabilidade 0,5 e no estado E3 com probabilidade 0,2. Então, tendo a matriz *P* é possível determinar a solução desta equação.

Para resolver esta equação, é possível utilizar um método iterativo. Inicialmente, é necessário definir o vetor *s* com elementos cujo somatório é igual a 1. O valor inicial de *s* (s_0) pode ser obtido dividindo-se 1 pela dimensão da rede para cada elemento. Por exemplo, se *s* tiver três elementos e a dimensão da rede for três, o primeiro elemento inicial para iterar seria 1/3, o segundo elemento seria 1/3 e o terceiro elemento seria 1/3. Durante a iteração, é necessário calcular o vetor *s* e, em seguida, passar para o outro lado da equação para calcular o próximo valor de *s*. Isso é feito iterativamente até que haja estabilização, ou seja, até que não haja diferença significativa entre s_{k+1} e s_k , imaginando a equação $s_{k+1} = s_k.P$. Nesse ponto, a solução é encontrada e o vetor *s* resultante fornece informações sobre a probabilidade de ocorrência de cada estado da rede. Com base nesse vetor, é possível determinar qual é o estado com maior probabilidade de ocorrência, o segundo com maior probabilidade e até o que tem menor probabilidade de ocorrência. É importante destacar que a matriz de transição fornece as

probabilidades de transição entre estados independentemente dos estados anteriores. Portanto, a partir dessa matriz, é possível determinar as probabilidades independentes da ocorrência de cada estado da rede. O vetor s resultante da iteração é um vetor de probabilidade de se encontrar em qualquer estado da rede independentemente dos estados anteriores, ou seja, é um vetor de probabilidades não condicionais.

Neste caso, para determinar o valor de s , utiliza-se a matriz P já obtida e o vetor s_0 como um vetor linha inicial, uma vez que, como referido acima, s tem três elementos e a dimensão da rede é três. Posto isto, utiliza-se a equação:

$$s_{k+1} = s_k \cdot P, \quad \text{para } k = 0,1,2,3 \dots \quad (4.7)$$

Fazendo $s_0 = [1/3 \quad 1/3 \quad 1/3]$, esta iteração converge para o seguinte resultado:

$$s = [1/3 \quad 1/3 \quad 1/3] \cdot \begin{bmatrix} 18/25 & 3/25 & 4/25 \\ 7/47 & 20/47 & 20/47 \\ 1/9 & 5/9 & 1/3 \end{bmatrix}$$

$$s = [0.3198 \quad 0.3683 \quad 0.3118]$$

Neste caso foram efetuadas nove iterações, visto que o valor de s estabilizou em $[0.3198 \quad 0.3683 \quad 0.3118]$. Através deste resultado é possível observar a probabilidade de ocorrência de cada estado. A probabilidade de o sistema se encontrar no estado E1 é de 31,98%, a probabilidade de o sistema se encontrar no estado E2 é de 36,83% e a probabilidade de o sistema se encontrar no estado E3 é de 31,18%. Então, o estado mais provável é o estado E2 e o menos provável é o estado E3.

Capítulo 5

Simulações

5.1 Estudo do Fluxo no Aeroporto de Lisboa

5.1.1 Observações de Uma Hora

Com o auxílio de um *Excel* fornecido pela *AirNav* (www.airnavsystems.com) relativo ao número de chegadas de aeronaves ao aeroporto Humberto Delgado, em Lisboa, durante cerca de um ano (de 31/12/2018 a 31/01/2020), foi possível efetuar todo o procedimento abordado no capítulo anterior. Sendo um aeroporto que se encontra aberto ao fluxo aéreo durante 19 horas (das 5h às 24h), foram estudadas as chegadas de aeronaves em intervalos de uma hora, o que possibilitou obter o diagrama de transição que se encontra representado na **Figura 5.1**.

Os Estados discretos do modelo da cadeia de Markov considerados foram definidos da seguinte forma:

- Nível de Fluxo Baixo (E1) – [0, 11[;
- Nível de Fluxo Médio (E2) – [11, 22[;
- Nível de Fluxo Alto (E3) – [22, 100].

Este número 100 significa tudo o que fica acima de 22 (é um número exagerado que não pode ser atingido).

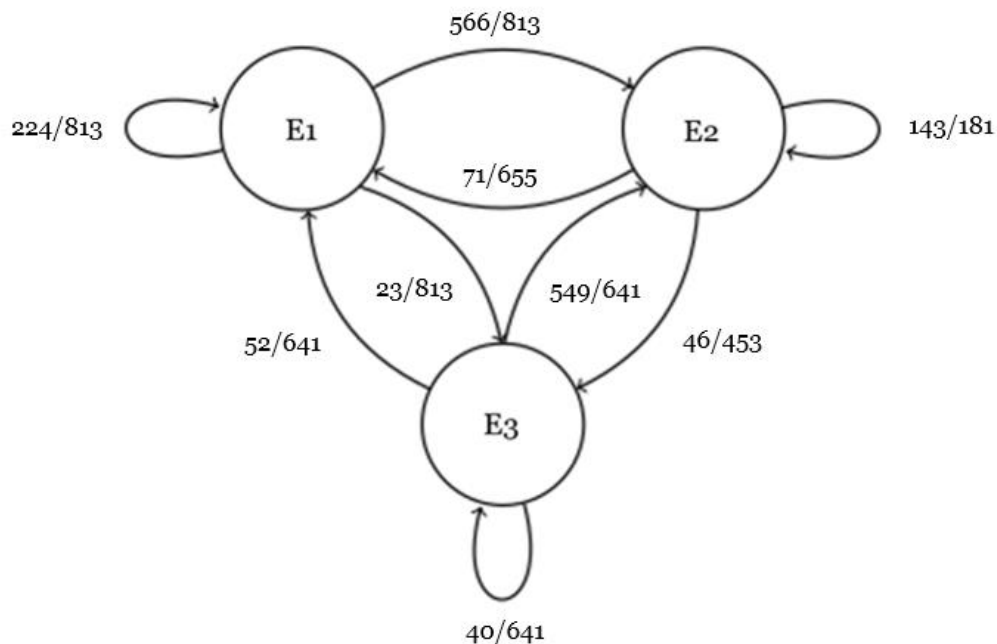


Figura 5.1: Diagrama de probabilidade de transição

Uma vez calculadas todas as probabilidades, a matriz de probabilidade de transição é dada por:

$$P = \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}$$

Para se utilizar esta rede para fazer previsões, é necessário garantir que ela tenha as propriedades desejadas. Primeiro, é preciso verificar se a rede é ergódica, ou seja, se ela é aperiódica e irredutível.

Para verificar a irredutibilidade da matriz, é possível utilizar o diagrama de transição associado a ela, **Figura 5.1**. Cada elemento não nulo da matriz representa uma transição do estado representado pela linha correspondente para o estado representado pela coluna correspondente. Pode-se então verificar se é possível alcançar qualquer estado partindo de qualquer outro estado através de uma sequência finita de transições. Utilizando esse método, pode-se concluir que a matriz é irredutível, pois é possível alcançar qualquer estado partindo de qualquer outro estado.

Para verificar se a matriz é aperiódica, pode-se utilizar o teorema do maior divisor comum para encontrar o menor número de passos necessários para voltar a qualquer estado após partir de um estado inicial. Se esse número for 1, então a matriz é aperiódica. Utilizando esse método, é possível concluir que a matriz é aperiódica, pois o maior divisor comum dos comprimentos dos ciclos no diagrama de transição é 1.

Portanto, conclui-se que a rede é ergódica.

Uma vez confirmada a ergodicidade da rede, é possível utilizá-la para efetuar previsões. Deste modo, é utilizada a fórmula apresentada no capítulo anterior, que permite estimar o número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo seguinte, $t + 1$.

Neste caso, o estado E1 possui um total de 11996 aeronaves, enquanto o estado E2 possui 95036 aeronaves e o estado E3 tem um total de 9096 aeronaves. Ao dividir o número total de aeronaves de cada estado pelo número de intervalos de uma hora, obtém-se a média de aeronaves por estado em cada intervalo. O estado E1 apresenta uma média de 1,5903 aeronaves (M_E1), o estado E2 apresenta uma média de 12,5992 aeronaves (M_E2) e o estado E3 apresenta uma média de 1,2059 aeronaves (M_E3). Com base no diagrama de transição apresentado na **Figura 5.1**, e levando em consideração que, no tempo t , o sistema está no estado E1, é possível determinar o número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo $t + 1$ utilizando a equação mencionada anteriormente:

$$\begin{aligned} \widehat{X}_{t+1} &= \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^1) \widehat{X}_{t+1}^j \\ \widehat{X}_{t+1} &= P(E1E1) \cdot (M_E1) + P(E1E2) \cdot (M_E2) + P(E1E3) \cdot (M_E3) \\ \widehat{X}_{t+1} &= \frac{224}{813} \cdot 1,5903 + \frac{566}{813} \cdot 12,5992 + \frac{23}{813} \cdot 1,2059 \\ \widehat{X}_{t+1} &= 9,2437 \end{aligned}$$

Então, chegam em média dez aeronaves.

Agora, considerando que o sistema está no estado E2 no tempo t , é viável determinar o número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo $t + 1$:

$$\widehat{X}_{t+1} = \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^2) \widehat{X}_{t+1}^j$$

$$\widehat{X}_{t+1} = P(E2E1) \cdot (M_E1) + P(E2E2) \cdot (M_E2) + P(E2E3) \cdot (M_E3)$$

$$\widehat{X}_{t+1} = \frac{71}{655} \cdot 1,5903 + \frac{143}{181} \cdot 12,5992 + \frac{46}{453} \cdot 1,2059$$

$$\widehat{X}_{t+1} = 10,2489$$

Portanto, em média, chegam onze aeronaves.

Considerando agora, que o sistema está no estado E3 no tempo t , é possível determinar o número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo $t + 1$:

$$\widehat{X}_{t+1} = \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^3) \widehat{X}_{t+1}^j$$

$$\widehat{X}_{t+1} = P(E3E1) \cdot (M_E1) + P(E3E2) \cdot (M_E2) + P(E3E3) \cdot (M_E3)$$

$$\widehat{X}_{t+1} = \frac{52}{641} \cdot 1,5903 + \frac{549}{641} \cdot 12,5992 + \frac{40}{641} \cdot 1,2059$$

$$\widehat{X}_{t+1} = 10,9952$$

Desta forma, chegam em média onze aeronaves.

O valor do respetivo desvio padrão é de 0.325177. Em seguida, é possível determinar o erro padrão por meio da aplicação da seguinte equação:

$$\text{Erro Padrão} = \frac{\text{Desvio Padrão}}{\sqrt{\text{Tamanho da Amostra}}}$$

$$\text{Erro Padrão} = \frac{0.325177}{\sqrt{116128}}$$

$$\text{Erro Padrão} = 9.5423e - 04$$

Logo, o erro padrão obtido é de 0.00095423.

No que se refere ao intervalo de confiança do número previsto de aeronaves que chegarão no próximo intervalo de tempo, é necessário estabelecer um nível de confiança desejado, que tal como visto anteriormente, representa a probabilidade de que o valor real esteja contido no intervalo de confiança. Adota-se então, o mesmo nível de confiança de 95%. Deste modo, pode-se determinar o intervalo de confiança:

$$\text{Intervalo de Confiança} = \text{Valor Previsto} \pm Z * \text{Erro Padrão}$$

Considerando que o sistema está no estado E1 no tempo t :

$$\text{Intervalo de Confiança} = 9,2437 \pm 1,96 * 9.5423e - 04$$

Posto isto, o intervalo de confiança resultante é [9.2418; 9.2456]. Por outras palavras, considerando que o erro padrão é praticamente nulo neste caso, pode-se afirmar que em média nove ou dez aeronaves chegam nesse período.

Agora, considerando que o sistema se encontra no estado E2 no instante t :

$$\text{Intervalo de Confiança} = 10,2489 \pm 1,96 * 9.5423e - 04$$

Desta forma, o intervalo de confiança calculado é [10,2471; 10,2508], isto é, sendo o erro padrão praticamente nulo, é possível dizer que chegam dez ou onze aeronaves.

Por último, levando em conta que o sistema está no estado E3 no tempo t :

$$\text{Intervalo de Confiança} = 10,9952 \pm 1,96 * 9.5423e - 04$$

Assim, o intervalo de confiança calculado é [10,9933; 10,9971], o que significa que, com um erro quase nulo, pode-se afirmar que chegam onze ou doze aeronaves.

Agora será realizada a análise do estado permanente da rede, conforme explicado no capítulo anterior. Neste caso, para determinar o valor de s , utiliza-se a matriz de transição (P) já obtida e o vetor s_0 como um vetor linha inicial, uma vez que s tem três elementos e a dimensão da rede é três. Nesse sentido, é possível utilizar a equação:

$$s_{k+1} = s_k \cdot P, \quad \text{para } k = 0,1,2,3 \dots$$

Assumindo $s_0 = [1/3 \ 1/3 \ 1/3]$, esta iteração converge para o seguinte resultado:

$$s = [1/3 \ 1/3 \ 1/3] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}$$

$$s = [0.1272 \ 0.7840 \ 0.0887]$$

Neste caso, foram efetuadas seis iterações, uma vez que o valor de s estabilizou em $[0.1272 \ 0.7840 \ 0.0887]$. Com base neste resultado, é possível observar a probabilidade de ocorrência de cada estado. A probabilidade de o sistema estar no estado E_1 é de 12,72%, a probabilidade de o sistema estar no estado E_2 é de 78,40% e a probabilidade de o sistema estar no estado E_3 é de 8,87%. Assim, pode-se concluir que o estado mais provável é o estado E_2 e o menos provável é o estado E_3 , existindo uma discrepância significativa entre o estado E_2 e os restantes.

As implicações em relação à administração do aeroporto são relevantes, pois se observa que, considerando a possibilidade de 11 a 22 aeronaves a cada hora, é necessário avaliar se a capacidade do aeroporto é suficiente para suportar tais ocorrências. Caso o limite de capacidade seja de facto 22 aeronaves, é importante considerar a ampliação dessa capacidade, uma vez que há uma probabilidade de cerca de 80% de ocorrência entre 11 a 22 aeronaves em cada hora. É relevante destacar que a referência ao aeroporto se trata, na verdade, da zona terminal. Caso o dimensionamento do aeroporto não possua a capacidade necessária para suportar um número de aeronaves acima de 22, é evidente a possibilidade de saturação.

5.1.2 Observações de Meia Hora

Utilizando exatamente o mesmo *Excel* relativo ao número de chegadas de aeronaves ao aeroporto de Lisboa, foram agora estudadas as chegadas de aeronaves em intervalos de meia hora, possibilitando obter o diagrama de transição que se encontra representado na **Figura 5.2**.

Os Estados discretos do modelo da cadeia de Markov considerados foram definidos da seguinte forma:

- Nível de Fluxo Baixo (E_1) – $[0,6[$;
- Nível de Fluxo Médio (E_2) – $[6,12[$;
- Nível de Fluxo Alto (E_3) – $[12, 100]$.

O número 100 significa tudo o que fica acima de 12 (é um número exagerado que não pode ser atingido).

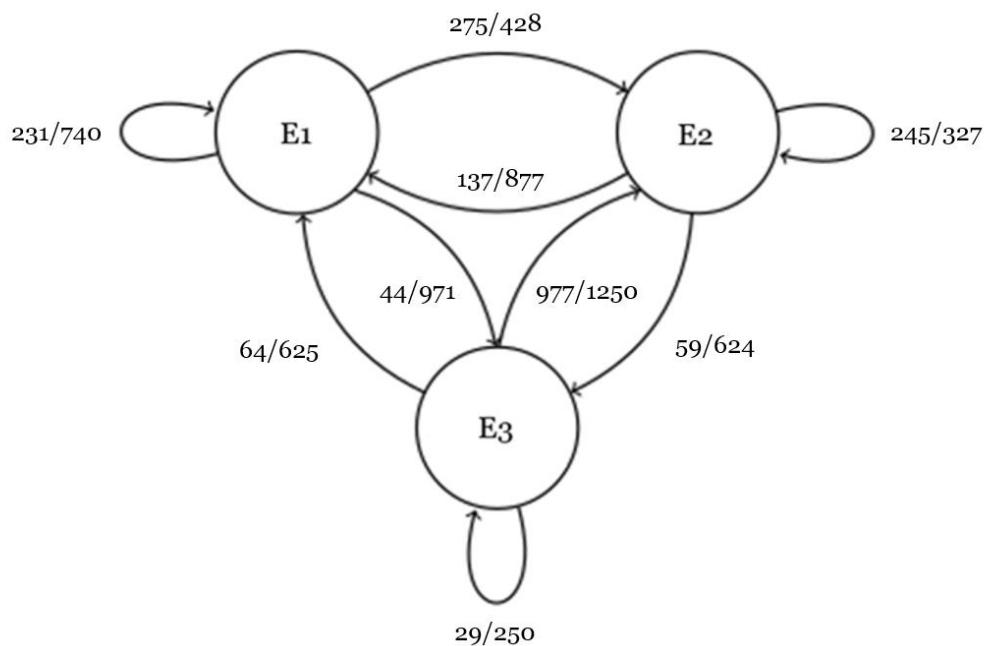


Figura 5.2: Diagrama de probabilidade de transição

Uma vez calculadas todas as probabilidades, a matriz de probabilidade de transição é dada por:

$$P = \begin{bmatrix} 231/740 & 275/428 & 44/971 \\ 137/877 & 245/327 & 59/624 \\ 64/625 & 977/1250 & 29/250 \end{bmatrix}$$

Verifique-se então a ergodicidade da rede. Para determinar se a matriz é irredutível, é possível utilizar o diagrama de transição associado a ela, **Figura 5.2**. Ao efetuar esta análise verifica-se que todos os estados são alcançáveis a partir de qualquer outro estado, ou seja, a matriz é irredutível.

Para determinar se a matriz é aperiódica, calcula-se o período de cada estado. Verifica-se que todos os estados têm período 1, portanto a matriz é aperiódica.

Desta forma, conclui-se que a matriz é ergódica. Posto isto, é possível utilizar a rede para efetuar previsões.

Neste caso, o estado E1 possui um total de 20079 aeronaves, enquanto o estado E2 possui 87537 aeronaves e o estado E3 tem um total de 7825 aeronaves. Efetuando a divisão do número total de aeronaves de cada estado pelo número de intervalos de meia hora, obtém-se a média de aeronaves por estado em cada intervalo. O estado E1 apresenta uma média de 1,3669 aeronaves (M_{E1}), o estado E2 apresenta uma média de 5,9594 aeronaves (M_{E2}) e o estado E3 apresenta uma média de 0,5327 aeronaves (M_{E3}). Utilizando o diagrama de transição apresentado na **Figura 5.2** e considerando que o sistema está no estado E1, no tempo t , é possível calcular quantas aeronaves entrarão na área terminal no tempo $t + 1$, utilizando a seguinte equação:

$$\widehat{X}_{t+1} = \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^1) \widehat{X}_{t+1}^j$$

$$\widehat{X}_{t+1} = P(E1E1). (M_E1) + P(E1E2). (M_E2) + P(E1E3). (M_E3)$$

$$\widehat{X}_{t+1} = \frac{231}{740} \cdot 1,3669 + \frac{275}{428} \cdot 5,9594 + \frac{44}{971} \cdot 0,5327$$

$$\widehat{X}_{t+1} = 4,2799$$

Então, chegam em média cinco aeronaves.

Agora, considerando que o sistema se encontra no estado E2 no tempo t , é viável determinar o número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo $t + 1$:

$$\widehat{X}_{t+1} = \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^2) \widehat{X}_{t+1}^j$$

$$\widehat{X}_{t+1} = P(E2E1). (M_E1) + P(E2E2). (M_E2) + P(E2E3). (M_E3)$$

$$\widehat{X}_{t+1} = \frac{137}{877} \cdot 1,3669 + \frac{245}{327} \cdot 5,9594 + \frac{59}{624} \cdot 0,5327$$

$$\widehat{X}_{t+1} = 4,7289$$

Portanto, em média, chegam cinco aeronaves.

Considerando agora, que no tempo t , o sistema está no estado E3, é possível determinar o número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo $t + 1$:

$$\widehat{X}_{t+1} = \sum_{j=1}^{N_x} P(X_{t+1}^j | X_t^3) \widehat{X}_{t+1}^j$$

$$\widehat{X}_{t+1} = P(E3E1). (M_E1) + P(E3E2). (M_E2) + P(E3E3). (M_E3)$$

$$\widehat{X}_{t+1} = \frac{64}{625} \cdot 1,3669 + \frac{977}{1250} \cdot 5,9594 + \frac{29}{250} \cdot 0,5327$$

$$\widehat{X}_{t+1} = 4,8596$$

Desta forma, chegam em média cinco aeronaves.

Com os resultados obtidos nas observações a cada hora, e agora com os cálculos para os intervalos de meia hora, torna-se possível sumaria-los na **Tabela 5.1**.

Tabela 5.1: Número de aeronaves que entrarão na zona terminal no tempo t+1

Sistema	Intervalos de Tempo	
	1 Hora	30 Minutos
Estado E1	10	5
Estado E2	11	5
Estado E3	11	5

Em função destes resultados, conclui-se que para um fluxo a cada meia hora, as probabilidades condicionais são iguais, isto é, não existe qualquer diferença significativa entre elas. Então, seja qual for o período de observação considerado, chega-se às mesmas conclusões.

Realizando agora a análise do estado permanente da rede, conforme efetuado no caso anterior:

$$s_{k+1} = s_k \cdot P, \quad \text{para } k = 0,1,2,3 \dots$$

$$s = [1/3 \quad 1/3 \quad 1/3] \cdot \begin{bmatrix} 231/740 & 275/428 & 44/971 \\ 137/877 & 245/327 & 59/624 \\ 64/625 & 977/1250 & 29/250 \end{bmatrix}$$

$$s = [0.1795 \quad 0.7329 \quad 0.0876]$$

Neste caso, foram efetuadas cinco iterações, uma vez que o valor de s estabilizou em $[0.1795 \quad 0.7329 \quad 0.0876]$. Assim, pode-se concluir que o estado mais frequente e mais crítico é o estado E2 e o menos provável é o estado E3, existindo uma discrepância significativa entre o estado E2 e os restantes.

5.1.3 Previsão do Próximo Estado

Utilizando a matriz de transição obtida durante as observações de uma hora, calcula-se as probabilidades incondicionais no próximo estado (apenas um passo).

Considerando que o sistema se encontra no estado E1 e sendo $s_0 = [1 \quad 0 \quad 0]$:

$$s_1 = s_0 \cdot P$$

$$s_1 = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}$$

$$s_1 = [0.2755 \quad 0.6962 \quad 0.0283]$$

No próximo passo, o estado mais provável será o estado E2.

Se o estado atual for o estado E2 e sendo $s_0 = [0 \quad 1 \quad 0]$:

$$s_1 = s_0 \cdot P$$

$$s_1 = [0 \quad 1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}$$

$$s_1 = [0.1084 \quad 0.7901 \quad 0.1015]$$

No próximo passo, o estado mais provável será o estado E2.

Considerando agora que o sistema está no estado E3, e sendo $s_0 = [0 \quad 0 \quad 1]$:

$$s_1 = s_0 \cdot P$$

$$s_1 = [0 \quad 0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}$$

$$s_1 = [0.0811 \quad 0.8565 \quad 0.0624]$$

No próximo passo, o estado mais provável será o estado E2.

Estes exemplos dados é para o caso de se saber, com certeza, em que estado o sistema se encontra. No entanto, podem ocorrer situações em que não se sabe exatamente em que estado está, mas sabe-se qual a distribuição de probabilidades s_0 . Então faz-se novamente a pergunta, no próximo passo, qual será o estado mais provável?

Considerando então, por exemplo, que o sistema se encontra numa distribuição de probabilidades $s_0 = [0.2 \quad 0.3 \quad 0.5]$:

$$s_1 = s_0 \cdot P$$

$$s_1 = [0.2 \quad 0.3 \quad 0.5] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}$$

$$s_1 = [0.1282 \quad 0.8045 \quad 0.0673]$$

Ou seja, no próximo passo, o estado mais provável será o estado E2.

Para finalizar, é de realçar que isto se trata meramente de um exemplo, mas o mais interessante é como se lida com uma situação assim onde nenhum dos estados tem uma probabilidade certa. Mesmo na prática acontece esta situação, em que cada estado tem uma probabilidade que necessariamente não é igual a um e que também não é impossível.

5.1.4 Previsão em n -Passos

O que é possível fazer também, é a abordagem pela equação de Chapman-Kolmogorov e neste caso a previsão não terá como objetivo determinar o número de aeronaves, mas sim o estado mais provável. Em vez de fazer a previsão só num passo, Chapman-Kolmogorov permite em n -passos dizer em que estado se encontrará. Neste caso, não foi utilizada diretamente a equação de Chapman-Kolmogorov, uma vez que se trata de uma matriz muito pequena, isto é, se a matriz fosse de maiores dimensões, tivesse imensas linhas e colunas, a utilização de Chapman-Kolmogorov facilitava bastante tornando todo o processo mais rápido.

Considerando que o estado atual é o estado E1, em que estado se encontrará em 3 passos, por exemplo. Para isso utiliza-se a seguinte equação:

$$s_n = s_0 \cdot P^n \quad (5.1)$$

Sendo então $n = 3$, tem-se que:

$$s_3 = s_0 \cdot P^3$$
$$s_3 = [1 \quad 0 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}^3$$
$$s_3 = [0.1319 \quad 0.7810 \quad 0.0871]$$

Então, o estado mais provável daqui a três passos, será o estado E2.

Considerando agora, que o sistema está no estado E2, em que estado se encontrará em 6 passos:

$$s_6 = s_0 \cdot P^6$$
$$s_6 = [0 \quad 1 \quad 0] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}^6$$
$$s_6 = [0.1272 \quad 0.7840 \quad 0.0888]$$

Logo, o estado mais provável daqui a seis passos, será o estado E2.

Por fim, considerando que o sistema se encontra no estado E3, em que estado se encontrará em, por exemplo, 10 passos:

$$s_{10} = s_0 \cdot P^{10}$$

$$s_{10} = [0 \quad 0 \quad 1] \cdot \begin{bmatrix} 224/813 & 566/813 & 23/813 \\ 71/655 & 143/181 & 46/453 \\ 52/641 & 549/641 & 40/641 \end{bmatrix}^{10}$$

$$s_{10} = [0.1272 \quad 0.7840 \quad 0.0888]$$

O estado mais provável daqui a dez passos será o estado E2.

Verifica-se então, que os resultados tanto de s_6 como de s_{10} foram iguais. É possível afirmar que, por exemplo, s_6 já convergiu, mas este já convergiu devido ao s_0 inicial, se s_0 fosse diferente se calhar seria preciso de mais ou menos para convergir. É possível efetuar a ligação com o que já foi analisado anteriormente em relação ao estado permanente para observações de uma hora. A ideia é a seguinte, a distribuição de probabilidade de se encontrar em determinados estados vai sempre tender para o estado permanente, para n suficientemente grande.

Capítulo 6

Conclusão

A presente dissertação teve como objetivo elaborar um método para efetuar a previsão do número de aeronaves que chegam numa área terminal de voo com base nas cadeias de Markov, determinando também os estados mais prováveis e mais críticos, tanto no próximo passo como em n -passos. O método resultante poderá contribuir em operações de gestão de fluxos de tráfego aéreo, de modo a evitar o congestionamento da área terminal.

Como referido, a abordagem utilizada para fazer previsões de estado de fluxo foram as cadeias de Markov, que constituem casos particulares de processos estocásticos com estados discretos, caracterizados pela propriedade de que a distribuição de probabilidade do próximo estado depende exclusivamente do estado atual, independentemente de como esse estado foi alcançado. A vantagem de se efetuar previsões com as cadeias de Markov é que estas não se vão preocupar com detalhes ou pormenores, vão sim analisar a um nível macroscópico, global, podendo ser importante, por exemplo, para os controladores de tráfego aéreo.

Em termos de simulações, foram efetuadas tanto a previsão do número de chegadas de aeronaves em intervalos de uma hora como a previsão em observações de apenas meia hora. Posto isto, observou-se que para um fluxo de meia hora, não existe qualquer diferença significativa entre as suas probabilidades condicionais, isto é, independentemente do período de observação avaliado, chega-se às mesmas conclusões. Portanto, determinou-se que, estando o sistema no estado E1, E2 e E3 no tempo t , chegam em média 10, 11 e 11 aeronaves, respetivamente, na zona terminal durante a hora seguinte. Também foi realizada a análise do estado permanente da rede onde, para observações de uma hora, verificou-se que o estado mais provável é o estado E2, com 78,40 %, e o menos provável é o estado E3, com 8,87 %, havendo uma enorme discrepância entre o estado E2 e os restantes. Por fim, foi efetuada a previsão do próximo estado em apenas um passo, e posteriormente foi feita a previsão em n -passos, onde se verificou que o estado E2 continua a ser o mais provável.

De facto, para os casos analisados os resultados obtidos foram muito satisfatórios, pois foi possível identificar o estado mais crítico e mais provável. Identificado o estado E2 como o mais provável, é de realçar as consequências que daí advém para a administração do aeroporto, uma vez que considerando a possibilidade de 11 a 22 aeronaves a cada hora, é necessário verificar se o aeroporto tem capacidade suficiente para suportar estas situações. Caso o limite de capacidade seja de facto 22 aeronaves, é fundamental considerar a ampliação dessa capacidade, caso contrário será evidente a possibilidade de saturação. Desta forma surgem um conjunto de dados críticos e analíticos que poderão fundamentar e despoletar a necessidade de um planeamento adequado da capacidade de um aeroporto.

Quanto à previsão do próximo estado em apenas um único passo, foram dados exemplos onde se sabe exatamente em que estado o sistema está. No entanto, foi interessante analisar a situação onde não se sabe em que estado o sistema se encontra,

isto é, nenhum dos estados tem uma probabilidade certa. Concluiu-se aqui, que o estado mais provável continua a ser o estado E2. Por último, na previsão em n -passos, para n suficientemente grande, é possível concluir que a distribuição de probabilidade de se encontrar em determinados estados vai sempre tender para o estado permanente.

Apesar de os resultados obtidos terem sido muito satisfatórios, o trabalho pode ser estudado posteriormente de modo a melhorar os conceitos e resultados obtidos nesta dissertação. De forma resumida, o tema desta dissertação foca-se essencialmente na criação de métodos com base nas cadeias de Markov para previsões de estado de fluxo que teve como aplicação apenas a área terminal de Lisboa, contudo será interessante e desafiante num futuro desenvolvimento a realização de mais simulações, com a abordagem a dados de outras zonas terminais, em outros aeroportos, de forma a estudar a reação do método em diferentes realidades e poder chegar a resultados mais globais e abrangentes valorizando e enriquecendo todo o resultado obtido nesta tese.

Bibliografia

- [1] “New traffic record set: 37,228 flights in one day | EUROCONTROL.” <https://www.eurocontrol.int/news/new-traffic-record-set-37228-flights-one-day> (accessed Aug. 03, 2022).
- [2] “Recorde histórico na aviação: 230 mil voos num dia – Observador.” <https://observador.pt/2019/07/30/recorde-historico-na-aviacao-230-mil-voos-num-dia/> (accessed Aug. 03, 2022).
- [3] “NAV Portugal alcança novo recorde: quase 856 mil voos geridos em 2019.” <https://www.jn.pt/economia/nav-portugal-alcanca-novo-recorde-quase-856-mil-voos-geridos-em-2019-11713491.html> (accessed Aug. 03, 2022).
- [4] “IATA agrava projeções e só prevê recuperação do tráfego aéreo em 2024 – Observador.” <https://observador.pt/2020/07/28/iata-agrava-projecoes-e-so-preve-recuperacao-do-trafego-aereo-em-2024/> (accessed Aug. 03, 2022).
- [5] “Lisboa, o turismo e um aeroporto saturado | Euronews.” <https://pt.euronews.com/2018/07/17/lisboa-o-turismo-e-um-aeroporto-saturado> (accessed Aug. 03, 2022).
- [6] EUROCONTROL, “European Aviation in 2040, Challenges of Growth,” Tech. Rep., Oct. 2018.
- [7] “Transporte aéreo: Céu Único Europeu | Fichas informativas sobre a União Europeia | Parlamento Europeu.” <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/133/air-transport-single-european-sky>. (accessed Aug. 03, 2022).
- [8] “NAV Portugal - Desafio do céu único europeu.” <https://www.nav.pt/espaco-aereo/desafio-do-ceu-unico-europeu> (accessed Aug. 03, 2022).
- [9] “About the FAB | UK Ireland FAB.” <https://www.ukirelandfab.eu/about/> (accessed Aug. 03, 2022).
- [10] “Free Route Airspace (FRA) | SKYbrary Aviation Safety.” <https://skybrary.aero/articles/free-route-airspace-fra> (accessed Aug. 03, 2022).
- [11] https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2019-06/lssip2018_portugal_release.pdf (Accessed: 2023-05-25)
- [12] “Short Term ATFCM Measures (STAM) | SKYbrary Aviation Safety.” <https://skybrary.aero/articles/short-term-atfcm-measures-stam> (accessed Aug. 03, 2022).
- [13] Sridhar, B., and Menon, P. K., “Comparison of Linear Dynamic Models for Air Traffic Flow Management”, Vol. 38, No. 1, 2005, pp. 13-18.
- [14] Menon, P. K., Sweriduk, G. D., Lam, T., Cheng, V. H. L., and Bilimoria, K. D., “Air Traffic Flow Modeling, Analysis and Control,” *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, August, 2003, pp. 11-14.

- [15] Menon, P. K., Sweriduk, G. D., Lam, T., Diaz, G. M., and Bilimoria, K. D., “Computer-aided Eulerian Air Traffic Flow Modelling and Predictive Control,” *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, August, 2004, pp. 16-19.
- [16] Roy, S., Sridhar, B., and Verghese, G. C., “An Aggregate Dynamic Stochastic Model for Air Traffic Control,” *Proceedings of the 5th USA/Europe ATM 2003 R & D Seminar*, June, 2003, pp. 23-27.
- [17] Sridhar, B., Soni, T., Sheth, K. S., and Chatterji, G. B., “An Aggregate Flow Model for Air Traffic Management”, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 29, No. 4, 2006, pp. 992-997.
- [18] “On kinematic waves II. A theory of traffic flow on long crowded roads”, Accessed: Aug. 03, 2022. [Online]. Available: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/>
- [19] Bilimoria, K. D., Sridhar, B., Chatterji, G., Sheth, K. S., and Grabbe, S., “FACET: Future ATM Concepts Evaluation Tool”, *Air Traffic Control Quarterly*, Vol. 9, No. 1, 2001, pp. 1–20.
- [20] Wang, J., Deng, W., and Guo, Y., “New Bayesian combination method for short-term traffic flow forecasting”, *Transport. Res. Part C*, Vol. 43, No. 1, 2014, pp. 79-94.
- [21] Petridis, V., Kehagias, A., Petrou, L., Bakirtzis, A., Kiartzis, S., Panagiotou, H., and Maslaris, N., “A Bayesian Multiple Models Combination Method for Time Series Prediction”, *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, Vol. 31, 2001, pp. 69-89.
- [22] “Edition Number: 1.0 ANNUAL NETWORK OPERATIONS REPORT 2016 Main Report”, Accessed: Aug. 03, 2022. [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/publication/files/nm-annual-network-operations-report-2016-main-report.pdf>
- [23] Chen, D., Hu, M., Zhang, H., Yin, J., and Han, K., “A network based dynamic air traffic flow model for en route airspace system traffic flow optimization.”, *Transportation Research Part E Logistics and Transportation Review*, Vol. 106, 2017, pp. 1-19.
- [24] A. Traffic Procedures, “Aeronautical Information Manual Official Guide to Basic Flight Information and ATC Procedures,” 2017, Accessed: Aug. 03, 2022. [Online]. Available: <http://www.faa.gov/atpubs>
- [25] “Introdução ao Espaço Aéreo - NATS.” <https://www.nats.aero/ae-home/introduction-to-airspace/> (accessed Aug. 03, 2022).
- [26] “Classificação do Espaço Aéreo | Segurança da aviação SKYbrary.” <https://skybrary.aero/articles/classification-airspace> (accessed Aug. 03, 2022).
- [27] “Classificação do Atscontinuação Referências Altimétricas - VFR curso completo | Docsity” <https://www.docsity.com/pt/classificacao-do-atscontinuuacao-referencias-altimetricas/4804842/> (Accessed: 2023-06-06).
- [28] “Portugal e Espanha concluíram e formalizaram os acordos para a criação do Bloco de EspaçoAéreo Funcional do Sudoeste (SW FAB).” <https://www.anac.pt/vPT/Generico/Noticias/noticias2012/Paginas/PortugaleE>

- spanhaconcluireformalizaramosacordos.aspx?FrList=true&pagenr=6
(accessed Aug. 03, 2022).
- [29] <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/2020-04/eurocontrol-lssip-2019-portugal-level1.pdf> (Accessed: 2023-06-06)
- [30] “ANAC Autoridade Nacional da Aviação Civil Portuguese Civil Aviation Authority.” [Online]. Available: www.anac.pt
- [31] “ESPAÇO AÉREO – Google Os Meus Mapas.”
https://www.google.com/maps/d/u/o/viewer?mid=1Og8rGguyGgNR1DUUpGW7Oq9k4_Xw&ll=41.220773533839036%2C-8.464675736383283&z=8 (accessed Aug. 03, 2022).
- [32] “Danger Area | SKYbrary Aviation Safety.”
<https://skybrary.aero/articles/danger-area> (accessed Aug. 03, 2022).
- [33] “Prohibited Area | SKYbrary Aviation Safety.”
<https://www.skybrary.aero/articles/prohibited-area> (accessed Aug. 03, 2022).
- [34] “Restricted Area | SKYbrary Aviation Safety.”
<https://skybrary.aero/articles/restricted-area> (accessed Aug. 03, 2022).
- [35] “Temporary Reserved Area (TRA)| SKYbrary Aviation Safety.”
<https://skybrary.aero/articles/temporary-reserved-area-tra> (accessed Aug. 03, 2022).
- [36] Bertsekas, D. P., and Tsitsiklis, J. N., “*Introduction to Probability*”, Athena Scientific, 2008.
- [37] ALVES, R., DELGADO, C. *Processos estocásticos*. Porto, 1997. (Publicação didática). Universidade do Porto. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/71434>. (Accessed: 2022-10-15).