



UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR  
Engenharia

# Previsão da Densidade do Tráfego Aéreo nas Zonas Terminais do Voo

**Nelson Manuel Antunes Coelho**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Aeronáutica**  
(2º Ciclo de Estudos)

Orientador: Prof. Doutor Kouamana Bousson

Covilhã, Junho de 2012



Os que querem são os que conseguem.

Nelson Coelho



# Dedicatória

Dedicado à minha família e aos meus amigos.



# Agradecimentos

Pelas dificuldades sentidas ao longo desta dissertação, sei que só me foi possível realizá-la graças à ajuda e motivação generosamente dada pelas pessoas que me acompanharam, não só nesta dissertação, mas em todos os momentos da minha vida. Agradeço ao meu orientador de tese, o Professor Doutor Kouamana Bousson, pelas orientações que me deu, sendo fulcrais na realização desta dissertação e pela confiança em mim creditada na capacidade de atingir os objetivos com que me deparei para a realização desta dissertação. Tenho também, de agradecer aos restantes membros do corpo docente desta Universidade, em especial, aos que contribuíram para a minha instrução, pelo apoio e ensinamentos que me facultaram, durante esta caminhada académica. Faço um agradecimento muito especial à minha namorada, Sara de Andrade, que já me acompanha há alguns anos nesta caminhada, em momentos mais difíceis que me serviram para aprender e crescer. Aos meus pais e irmãos presto homenagem e gratidão, pelo infinito apoio e confiança prestados no decorrer da minha caminhada académica, pois sem eles ter-me-ia sido muito difícil de concluir. Um obrigado muito especial a todos os meus amigos pela sua amizade e ajuda que têm sido muito importantes para ultrapassar muitos dos obstáculos com que me tenho deparado. Um bem-haja aos que criaram e contribuem, diariamente, para o funcionamento do site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com), pois sem esses dados não me teria sido possível concretizar este trabalho.



# Resumo

O congestionamento do tráfego aéreo em zonas terminais do voo é um problema com impactos económicos e ao nível da segurança aérea nessas áreas. Esta dissertação pretende modelar e simular, numa primeira fase, o fluxo de tráfego aéreo para prever a duração do voo através de estimativas feitas ao longo do mesmo. Os dados de voo utilizados na criação das estimativas foram recolhidos do site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com) e, com recurso a um programa em *MatLab*, conseguiram separar-se, numa forma matricial, os dados importantes para a previsão da duração do voo, sendo estes: o instante de tempo, a latitude, a longitude, a altitude, a velocidade instantânea e o rumo da aeronave. Para estas estimativas foram calculados os dados relativos às posições dos *waypoints*<sup>1</sup>, por onde a aeronave tinha ainda que passar até chegar ao seu destino. Nesta análise a velocidade média foi calculada determinando a distância percorrida aproximadamente nos últimos dez minutos até ao instante atual do voo, sendo depois essa distância dividida pelo tempo que demorou a percorrê-la. Com base nessa velocidade média, tendo uma noção da distância loxodrómica que falta percorrer e a já percorrida, pode estimar-se o tempo total do voo com recurso à *função sigmoide*.

Numa segunda fase desta dissertação pretendeu-se prever a densidade de tráfego numa zona de voo terminal (TMA<sup>2</sup>). Esta previsão foi conseguida através de estimativas dos tempos de voo de uma amostra de dez aeronaves que se dirigiam para uma mesma TMA e que iriam chegar até ela num intervalo de tempo aproximadamente entre os 60 e os 200 minutos.

Foi possível concluir que as estimativas de duração do voo se aproximavam mais do valor real quanto mais próximo estivesse o fim do voo. Também se concluiu que as estimativas eram mais precisas se os intervalos de tempo entre os pontos do voo em que foi possível recolher dados fossem mais constantes. Mesmo utilizando dados recolhidos entre intervalos de tempo inconstantes, foi possível prever aproximadamente as densidades de aeronaves presentes em TMAs para instantes futuros.

## Palavras-chave

Tráfego Aéreo, Espaço Aéreo, TMA, Função Sigmoide, Previsão, Densidade de ocupação.

---

<sup>1</sup> Pontos fictícios, que existem num percurso, onde se verificam alguns parâmetros da viagem, para validar se a aeronave mantém a rota prevista.

<sup>2</sup> Do Inglês *Terminal Maneuvering Area*, que significa área terminal do voo.



# Abstract

The air traffic congestion in flight terminal areas is a problem with economic impacts and at the air safety level in those areas. This dissertation aims to model and simulate, initially, the flow of air traffic for predicting the duration of the flight through estimates made over the same. The flight data used in creating the estimates were gathered from site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com) and, by using a program in *MatLab*, we managed to separate, in a matrix form, the important data for predicting the duration of the flight. These data were: instant of time, latitude, longitude, altitude, current speed and aircraft course. In order to create these estimates, the *waypoints* position data were calculated, where the aircraft had yet to pass through until reaching its destination. In this analysis the average speed was calculated by determining the distance traveled in the last ten minutes, approximately, until the present moment of the flight. After that, the distance is divided by the time it took to make it. Based on this average speed, and having a notion of the *loxodromic* distance ahead and the one already passed, one can estimate the total flight time using the *sigmoid function*.

In a second phase of this work, it was intended to predict aircrafts density in a Terminal Maneuvering Area (TMA<sup>3</sup>). This prediction was achieved by estimating the flight time of a ten aircraft sample that went to the same TMA and would get there in a time interval between approximately 60 and 200 minutes.

We were able to conclude that the flight duration estimates were closer to the real value as the end of the flight was closer. It could also be concluded that the estimates were more accurate if the time intervals between the flight points, where it was possible to collect data, to be more constant. In what concerns the prediction of the TMA occupation density, we could conclude that it was a hard task to achieve, and yet it was not impossible. Even using collected data within irregular time intervals, it was possible to accurately predict the TMA density of aircrafts present in close future moments.

## Keywords

Air Traffic, Airspace, TMA, Sigmoid Function, Forecast, Occupation density.

---

<sup>3</sup> TMA stands for Terminal Maneuvering Area. Is the airspace close the airport reserved for aircrafts landing or liftoff of this airport.



# Índice

<b>1 Introdução</b>	1
1.1 Análise da Densidade de Tráfego Aéreo	3
1.2 Objetivos da Dissertação	6
<b>2 Modelação</b>	7
2.1 Aquisição de Dados	7
2.2 Navegação Aérea	8
2.2.1 Loxodromia	8
2.3 Função Sigmoide	10
2.3.1 Aplicação da Função Sigmoide na Previsão do instante de chegada de uma aeronave	11
2.4 Densidade de Tráfego	14
<b>3 Simulação e Validação</b>	17
3.1 Identificação das Aeronaves e da TMA	17
3.1.1 Identificação das Aeronaves	17
3.1.2 Identificação da TMA	18
3.2 Previsão do Instante de Chegada de duas Aeronaves a um ponto	19
3.2.1 Validação da Utilidade da Função Sigmoide	19
3.2.2 Comparação das Previsões da duração dos dois voos	22
3.3 Resultados da Previsão da Taxa de Ocupação de uma TMA	24
<b>4 Conclusões</b>	31
4.1 Conclusões da Aplicação desta Dissertação	31
4.2 Trabalhos Futuros	32
<b>Bibliografia</b>	33
<b>Anexos</b>	35



# Lista de Figuras

Figura 1.1.1 – Ilustração Representativa do Espaço Aéreo	4
Figura 2.2.1.1 – Representação de uma curva loxodrómica unindo dois pontos na superfície terrestre	8
Figura 2.3.1 – Cua S representativa da função Sigmoide e aproximação linear	10
Figura 2.3.1.1 – Representação do percurso a realizar pela aeronave x	11
Figura 2.3.1.2 – Representação do percurso próximo realizado pela aeronave x	12
Figura 3.1.2.1 – Representação do modelo físico da TMA utilizada no presente estudo	18
Figura 3.2.1.1 – Representação gráfica da função Sigmoide referente à contagem da aeronave A na TMA de chegada durante o voo desde a origem à TMA de destino	20
Figura 3.2.1.2 – Representação gráfica da contagem da aeronave B na de chegada durante o voo desde a origem do voo ao seu destino	21
Figura 3.2.2.1 – Representação gráfica da previsão da duração total do voo da aeronave A	22
Figura 3.2.2.2 – Representação gráfica da previsão da duração total do voo da aeronave B	23
Figura 3.3.1 – Representação gráfica da previsão da densidade de ocupação prevista aos 60 minutos, para os 180 minutos seguintes	25
Figura 3.3.2 – Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 80 minutos, para os 160 minutos seguintes	26
Figura 3.3.3 – Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 100 minutos, para os 140 minutos seguintes	27
Figura 3.3.4 – Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 120 minutos, para os 120 minutos seguintes	28
Figura 3.3.5 – Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 140 minutos, para os 100 minutos seguintes	29
Figura 3.3.6 – Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 160 minutos, para os 80 minutos seguintes.	30



## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Dados do voo da aeronave A	35
Tabela 2 - Dados do voo da aeronave B	36
Tabela 3 - Dados do voo da aeronave 1	37
Tabela 4 - Dados do voo da aeronave 2	38
Tabela 5 - Dados do voo da aeronave 3	39
Tabela 6 - Dados do voo da aeronave 4	40
Tabela 7 - Dados do voo da aeronave 5	41
Tabela 8 - Dados do voo da aeronave 6	42
Tabela 9 - Dados do voo da aeronave 7	43
Tabela 10 - Dados do voo da aeronave 8	44
Tabela 11 - Dados do voo da aeronave 9	45
Tabela 12 - Dados do voo da aeronave 10	46



# Lista de Acrónimos

TMA	Terminal Maneuvering Area
IFR	Instrument Flight Rules
ATC	Air Traffic Control
VFR	Visual Flight Rules
AGL	Above Ground Level
MSL	Mean Sea Level
NM	Nautical Miles
SSR	Secondary Surveillance Radar
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance-Broadcast
SES	Single European Sky



# Capítulo 1

## Introdução

O congestionamento do espaço aéreo, mais em particular nas áreas terminais do voo em aeroportos com elevado volume de tráfego aéreo, tem levantado alguns problemas, nomeadamente ao nível económico, por provocar atrasos nos voos, ou por levar as aeronaves a voarem em regimes de voo menos eficientes, de modo a aproveitar o melhor possível o espaço aéreo disponível. Outro dos problemas que o congestionamento das áreas terminais de voo tem levantado é ao nível da segurança, pois o espaço aéreo é confinado e o número de aeronaves no seu interior tem aumentado, levando a um acréscimo da densidade de tráfego aéreo nas zonas de voo terminais. Portanto, muitas atividades de pesquisa [1] - [6] têm-se centrado, nas últimas décadas, em tentar lidar com o congestionamento, não só em TMAs, mas também em rotas de espaços aéreos controlados, encorajando a gestão avançada do tráfego aéreo baseado no radar Secundário de vigilância (SSR) e no sistema de vigilância dependente automática (ADS-B), permitindo o uso mais eficiente dos sistemas de rede existentes para o controlo do fluxo de tráfego aéreo, prevenindo os congestionamentos de tráfego, atrasos e otimizando o consumo de energia e a segurança. Além disso, o programa *SESAR* [7] [8], que vai combinar parâmetros tecnológicos, económicos e de regulação, usando a legislação que organiza o Céu Único Europeu (SES) para sincronizar os planos e ações entre os diferentes intervenientes, no sentido de desenvolver e implementar as necessárias melhorias em toda a Europa, tanto nos sistemas das aeronaves, como nos terrestres.

A questão fundamental é como modelar de forma eficiente o fluxo aéreo. Muitos conceitos têm surgido como resposta a esta pergunta, alguns baseados em física da matéria [4], e outros no sistema de teoria dinâmica [2], [3]. Neste trabalho, optou-se por uma abordagem baseada nos conceitos de rede dinâmica. Este conceito apareceu como um campo centrado na modelação, análise, simulação e previsão das relações entre várias entidades como atores, eventos e recursos, bem como o impacto desta dinâmica no seu ambiente [9]. As redes dinâmicas permitem lidar com a complexidade das redes de sistemas dinâmicos cujas variáveis podem ser relacionadas de uma forma não linear e cujos parâmetros podem variar ao longo do tempo.

A incapacidade do aeroporto e do espaço aéreo para atender à procura crescente de tráfego aéreo é uma das principais causas do congestionamento e dos atrasos no tráfego aéreo [1]. A curto prazo estão a ser estudados novos métodos operacionais no fluxo de tráfego aéreo, que produzam estratégias que aumentem as capacidades dos aeroportos e do espaço aéreo com medidas potencialmente eficazes para otimizar os recursos e capacidades existentes. Devido à complexidade dos padrões de fluxo de tráfego aéreo em que as áreas terminais, as zonas de rota, bem como os centros de controlo do tráfego aéreo, estão

envolvidos. A presente pesquisa pretende trabalhar os conceitos de redes dinâmicas de modo a produzir ferramentas para lidar com a modelação do fluxo de tráfego aéreo, bem como a previsão da densidade de aeronaves em áreas terminais.

São apresentados dois modelos de previsão, um primeiro para prever o instante de chegada de uma aeronave a um destino e um segundo para prever a densidade de aeronaves numa área terminal de voo.

## 1.1 Análise da Densidade de Tráfego Aéreo

Com o advento de novas tecnologias, nomeadamente a seguir à 2ª Guerra Mundial, com o aumento do tráfego aéreo ao serviço da sociedade civil, efetuando ligações aéreas regulares entre aeroportos, surgiram instrumentos que permitiram a utilização das aeronaves de uma forma mais segura e eficiente, iniciando-se assim a regulamentação do espaço aéreo que levou à criação de normas e requisitos que definiram qual o nível de instrumentação que as aeronaves deveriam possuir para poderem operar em determinados espaços aéreos.

Atualmente, o espaço aéreo encontra-se dividido em duas zonas principais [10] que se designam por *Espaço Aéreo Não Controlado*, composto pelas classes F e G, e por *Espaço Aéreo Controlado*, zona onde o serviço de controlo de tráfego Aéreo (ATC) é prestado às aeronaves, que, voando nessa região, o solicitem. O suporte a este serviço é assegurado por organismos responsáveis pela circulação aérea, que, utilizando uma rede de sistemas de comunicação, permitem a troca de informação via rádio entre as aeronaves e as torres de controlo de tráfego aéreo. Esta região é composta pelas classes A, B, C, D e E.

Em baixo encontram-se descritas, de forma resumida, algumas especificações sobre as várias classes do espaço aéreo supra mencionadas.

- Classe A - Espaço Aéreo compreendido entre os 18000 pés acima do nível do mar e incluindo o nível de voo FL600, até aos 60000 pés. Exceto quando é autorizado, todo o tráfego aéreo permitido nesta classe deve seguir as regras de voo por instrumentos (*IFR*).
- Classe B - Espaço Aéreo compreendido entre os 10000 pés acima do nível do mar e os 18000 pés. Esta classe situa-se em zonas circundantes de aeroportos movimentados, sendo a sua configuração uma característica individual de cada aeroporto. Todas as aeronaves que pretendam operar nesta classe necessitam de pedir previamente *clearence*<sup>4</sup> ao ATC.
- Classe C - Espaço Aéreo compreendido entre a superfície do aeroporto e os 4000 pés acima dessa superfície. Encontra-se em zonas circundantes aos aeroportos, sendo a sua configuração uma característica individual de cada aeroporto. No entanto, esta zona consiste geralmente, numa área aproximadamente circular com um raio de 5 milhas náuticas até aos 1200 pés acima do aeroporto e dos 1200 aos 4000 pés. Este círculo passa a ter um raio de 10 milhas náuticas, dispondo da assistência de uma torre de controlo operacional, estando as aeronaves que aqui operam a serem servidas por um radar de aproximação. Nesta zona é necessário realizar algumas operações por instrumentos (*IFR*). Antes da entrada nesta classe, cada aeronave deve estabelecer com facilidade contacto via rádio com a ATC e manter essa comunicação com facilidade já dentro dela.

---

<sup>4</sup> Pedido de autorização feito à Torre de Controlo para entrar num espaço aéreo restrito.

- Classe D - Zona envolvente do aeroporto compreendida entre a superfície do aeroporto e os 2500 pés acima dessa superfície.
- Classe E - Espaço Aéreo controlado, mas que não pertence às classes A, B, C ou D, estende-se desde qualquer superfície, acima dos 700 ou 1200 pés acima do nível do solo. O espaço aéreo está configurado para conter todos os procedimentos. Esta zona é usada para fazer a transição da zona terminal para a zona de rota.
- Classe G - É a porção de espaço aéreo que não tenha sido classificada como A, B, C, D, ou E. É, portanto designado espaço aéreo não controlado. Esta classe estende-se desde a superfície até à base do espaço aéreo E sobrejacente. Embora a ATC não tenha autoridade ou responsabilidade em controlar o tráfego aéreo, os pilotos devem respeitar a regra de voo visual (VFR).

Na figura 1.1.1 encontra-se a representação destas classes do espaço aéreo.

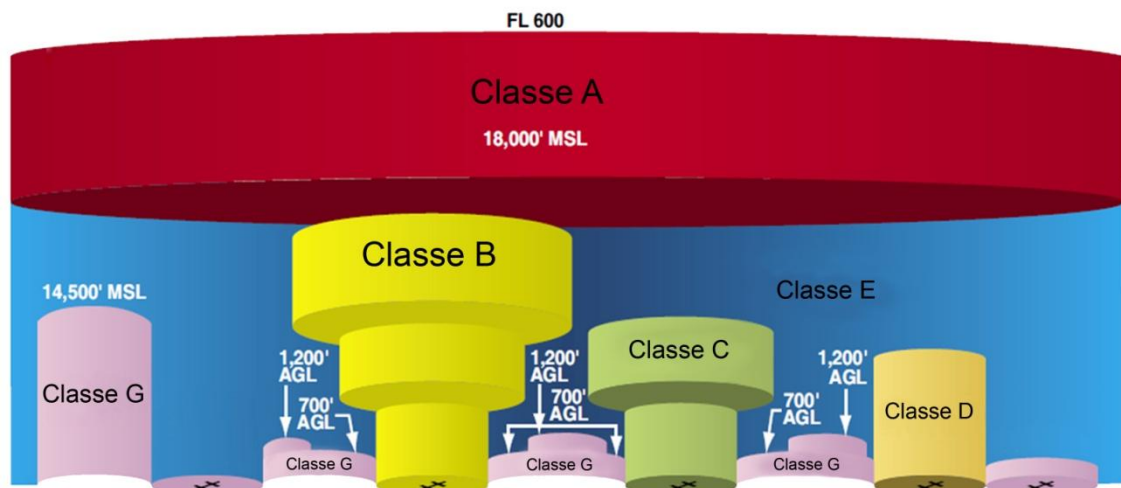


Figura 1.1.1: Ilustração representativa do Espaço Aéreo.

Os autores do artigo [1] basearam a sua pesquisa nos problemas causados pelo congestionamento em TMAs de aeroportos com grande volume de tráfego, concluindo que nestes aeroportos o grande volume de tráfego constituía um problema com impacto em todos os aspetos do fluxo de tráfego aéreo, não só a nível nacional, mas podendo também induzir atrasos a nível internacional, reconhecendo a necessidade de prever a densidade de tráfego aéreo em TMAs para que as decisões apropriadas pudessem ser tomadas para otimizar as suas taxas de ocupação.

A abordagem adotada pelos autores baseou-se em conceitos de rede dinâmica para a modelagem do fluxo de tráfego aéreo e simulação. O foco do seu trabalho incidiu na estimativa de previsão do número de aeronaves nas TMAs especificadas ao longo do tempo. Estes realizaram simulações para validar com sucesso a dinâmica do fluxo de tráfego aéreo, utilizando dados reais de três TMAs na Península Ibérica.

Os autores concluíram que o seu trabalho estabeleceu fundações para a modelação do fluxo de tráfego aéreo baseado em redes dinâmicas, tendo como objetivo principal proporcionar meios para quantificar a taxa de ocupação de áreas de controlo terminais (TMA) em termos do número de aeronaves a qualquer momento. No primeiro modelo por eles simulado, as aeronaves apenas eram contabilizadas quando estavam presentes no interior da TMA. No entanto, para ser contabilizada a alteração progressiva do número de aeronaves nas TMAs, tiveram a necessidade de recorrer a um segundo modelo, baseado na função sigmoide, para lidar com a dinâmica do fluxo de tráfego no que diz respeito ao número de aeronaves nas TMAs. Verificaram que os resultados das simulações corroboraram a eficácia dos modelos sugeridos.

Os autores do artigo [11] basearam a sua pesquisa na importância que o controlo de aproximação de aeronaves tem para a redução do impacto ambiental. Estes autores pretendiam estudar o sequenciamento das aeronaves que maximizava o número de aterragens por unidade de tempo, propondo, então, um modelo baseado na não existência de espera na TMA para a aterragem. Para tal, as partidas e chegadas são modeladas como máquinas, os aviões são considerados como trabalho com data de lançamento. Cada máquina específica processa uma aeronave/trabalho e produz um custo para o ambiente. O impacto da poluição em cada elemento do mapa depende da máquina relacionada. A *Sensibilidade Verde*<sup>5</sup> de cada mapa é definida usando modelos numéricos por meio de *Elitary Genetic Algorithm*, em que o número de movimentos na unidade de tempo é otimizado para gerir o espaço aéreo de aproximação. Como caso de estudo para a sua pesquisa foi utilizada a TMA do aeroporto de Bolonha. Este trabalho centra-se na minimização de atrasos e de impacto ambiental, tendo sempre em conta as restrições de segurança no que diz respeito a lidar com o tempo de separação entre aeronaves. A Sensibilidade Verde é definida usando modelos numéricos.

Os vetores do ATC podem ser interpretados de forma que a aeronave possa evitar uma determinada área do espaço aéreo, onde o impacto ambiental, devido ao tráfego aéreo, se torna demasiado elevado. Os vetores devem ser modelados de forma semelhante a uma outra máquina que chega diretamente ao caminho de descida ILS. As suas características dependem da posição da aeronave, altitude e tipo, devendo ser avaliada por um algoritmo de otimização da trajetória específica.

A importância da abordagem proposta reside na possibilidade de fornecer uma ferramenta rápida aos controladores de tráfego aéreo que seja capaz de resolver o problema do sequenciamento de acordo com a ATC, bem como os requisitos de gestão.

---

<sup>5</sup> Sensibilidade Verde, nome dado pelos autores ao algoritmo capaz de avaliar os custos ambientais decorrentes do consumo de combustível nas manobras efetuadas no interior das TMAs.

## 1.2 Objetivos da Dissertação

Dado um dos fatores que contribuem para o congestionamento em áreas terminais de voo ser a falta de antecipação, os controladores aéreos têm a necessidade de saber o número de aeronaves que para lá se dirigem e qual o instante em que entram na TMA por eles controlada, conseguindo, desta forma, prever possíveis congestionamentos futuros. Esta dissertação, surge na continuação do trabalho iniciado por Tiago Domingues [1], que modelou e simulou o tráfego aéreo entre várias TMAs, baseando a sua pesquisa apenas no fluxo de tráfego aéreo entre essas TMAs. O presente estudo pretende modelar e simular, numa primeira abordagem, a dinâmica do voo, em termos de previsão da chegada da aeronave a um dado ponto, provando a possibilidade de prever o instante de chegada de uma aeronave a um ponto mais à frente no seu percurso, simulando, desta forma, a possibilidade da previsão do instante de entrada da aeronave num espaço aéreo restrito, como é o caso da TMA. Numa segunda abordagem, pretende-se modelar e simular uma amostra constituída por dez aeronaves, que, partindo de pontos e a instantes diferentes, têm a mesma TMA como destino. Pretende-se que os instantes de tempo em que as aeronaves chegam à TMA possam ser comuns entre algumas delas, para se conseguir uma densidade superior a uma aeronave no interior da TMA, tal como se passa na realidade. Ambiciona-se que esta segunda abordagem possa provar que é possível prever, com algum tempo de antecedência, a chegada das aeronaves que se dirigem para a TMA e, desta forma, prever a densidade de tráfego no seu interior em instantes futuros.

# Capítulo 2

## Modelação

### 2.1 Aquisição de Dados

Os dados referentes às aeronaves utilizadas nesta dissertação foram obtidos no site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com). Destes dados fazem parte o instante de tempo, a latitude, a longitude, a altitude, a velocidade instantânea e o rumo de uma aeronave em voo.

Já os dados referentes à localização da TMA foram retirados do *Google Earth*<sup>6</sup> e são referentes à TMA do aeroporto de Lisboa. Destes dados fazem parte a latitude e longitude do centro da referida TMA, que para simplificação do sistema modelado foi considerada como sendo cilíndrica, com 40 milhas náuticas de raio e 10000 metros de altitude.

A obtenção dos dados referentes às aeronaves consegue-se da seguinte forma:

Passo 1: seleciona-se a aeronave, cuja rota pretendemos estudar

Passo 2: seleciona-se a opção *rota realizada*. De seguida aparece um ficheiro contendo informações sobre a aeronave e sobre o voo que está a efetuar.

Passo 3: A informação sobre a aeronave pode então ser copiada para um ficheiro “.txt”, que pode ser lido pelo software *MATLAB*.

Passo 4: Constrói-se um *script* em *MATLAB* com a função de extrair a informação útil, que foi referida no primeiro parágrafo do presente capítulo. A partir da utilização do referido *script*, a informação útil pode ser organizada sob a forma matricial e ser processada matematicamente, desta forma, com vista à obtenção dos resultados apresentados no quinto capítulo desta dissertação.

Os dados dos voos das aeronaves que serviram para as simulações dos modelos presentes nesta dissertação encontram-se na parte dos anexos.

---

<sup>6</sup> Google Earth, programa informático disponibilizado pela Google. Inc. onde se pode visualizar, através de imagens de satélite, a superfície terrestre.

## 2.2 Navegação Aérea

A navegação aérea consiste em ir de um ponto para um outro. Restringindo esta definição a uma superfície esférica, verifica-se que existem infinitas possibilidades de ligações entre estes pontos, no entanto umas são melhores que outras.

A navegação aérea utiliza o modelo geográfico terrestre *WGS-84* (*WGS: World Geodetic System*). Neste modelo, a terra tem uma forma elipsoidal caracterizando-se pelos seguintes parâmetros:

Raio equatorial:

$$a = 6378.137\text{km}$$

Raio Polar:

$$b = 6356.7523142\text{km}$$

### 2.2.1 Loxodromia

Define-se *loxodromia* como sendo uma curva na superfície terrestre que forma o mesmo ângulo com qualquer meridiano.

Considerem-se os dois pontos A e B representados na figura 2.3.1.1:

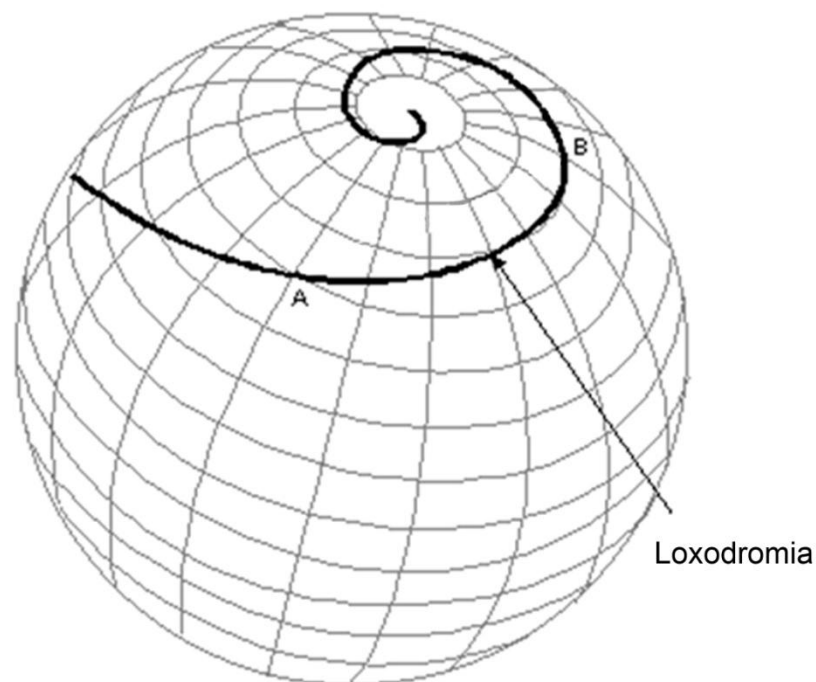


Figura 2.2.1.1: Representação de uma curva loxodrômica unindo dois pontos na superfície terrestre.

Para se determinar a distância loxodrómica entre os pontos A e B distantes, necessitamos de começar por calcular:

$$L_A^* = \frac{10800}{\pi} \ln \left[ \tan \left( \frac{L_A}{2} + 45^\circ \right) \right] \quad (2.1a)$$

$$L_B^* = \frac{10800}{\pi} \ln \left[ \tan \left( \frac{L_B}{2} + 45^\circ \right) \right] \quad (2.1b)$$

Onde  $L_A$  representa a Latitude em graus angulares do ponto A e  $L_B$  representa a Latitude em graus angulares do ponto B.  $L_A^*$  e  $L_B^*$  vêm em minutos angulares e representam as Latitudes verdadeiras.

De seguida é necessário calcular  $V$  que representa o angulo formado pela linha loxodrómica que une o ponto A ao ponto B com o meridiano em que se situa um dos pontos A ou B:

$$\tan V = \frac{(\Delta G_{AB})_{\text{minutos}}}{(\Delta L_{AB}^*)_{\text{minutos}}} = \frac{|G_A - G_B|}{|L_A^* - L_B^*|} \quad (2.2)$$

Para determinar a distância Loxodrómica é necessário calcular as Latitudes verdadeiras dos pontos A e B e o angulo formado pela linha Loxodrómica que une os pontos com os meridianos onde os pontos se inserem. Desta forma chega-se à equação 2.3, em que  $(AB)_{NM}^{\text{loxo}}$  é a distância Loxodrómica entre A e B,  $(\Delta L_{AB})$  é a distância entre os paralelos onde se situam A e B.

$$(AB)_{NM}^{\text{loxo}} = \frac{(\Delta L_{AB})_{\text{minutos}}}{\cos V} \quad (2.3)$$

Os pontos A e B são representativos de dois pontos na face da Terra.

## 2.3 Função Sigmoide

A função sigmoide foi introduzida no modelo devido à necessidade de prever a chegada da aeronave à TMA de destino, dando oportunidade de antecipação aos controladores do tráfego aéreo na tentativa de evitar uma situação de congestionamento. Uma característica inerente a este tipo de modelo é o número de aeronaves não ser um número inteiro, desde que uma aeronave seja contada no intervalo unitário  $[0,1]$ .

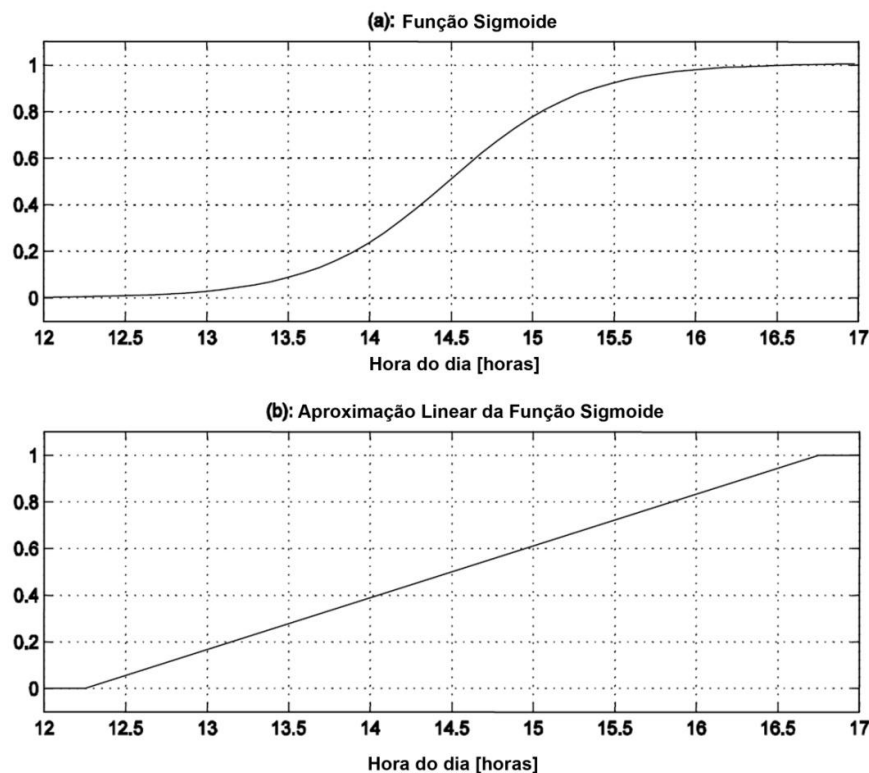


Figura 2.3.1: Cuva S representativa da função Sigmoide e aproximação linear [1].

Do estudo efetuado pelos autores do artigo [1] a figura 2.3.1 (a) e (b) mostra como uma aeronave é contabilizada desde a partida até à chegada para uma viagem de 5 horas. A figura 2.3.1 (a) descreve a correspondente função sigmoide, e a figura 2.3.1 (b) mostra a aproximação linear, por partes, da atual função sigmoide para uso prático. Com efeito, a contagem da aeronave para a TMA de chegada é praticamente definida para 0 até 15 minutos após a decolagem (que é desde as 12h às 12h:15); em seguida segue uma parte linear em que a contagem é de 0,5 a meio do caminho (às 14h:30), e, finalmente, das 16h:45 às 17h, isto é, na vizinhança da TMA, a contagem da aeronave é praticamente 1.

### 2.3.1 Aplicação da Função Sigmoide na Previsão do Instante de Chegada de uma Aeronave

A figura 2.3.1.1 representa um percurso hipotético da aeronave  $x$  que, partindo do ponto PA, tem que passar pelos *waypoints* intermédios P1, P2, P3 e P4 até chegar a PB, ou seja, o destino deste voo.

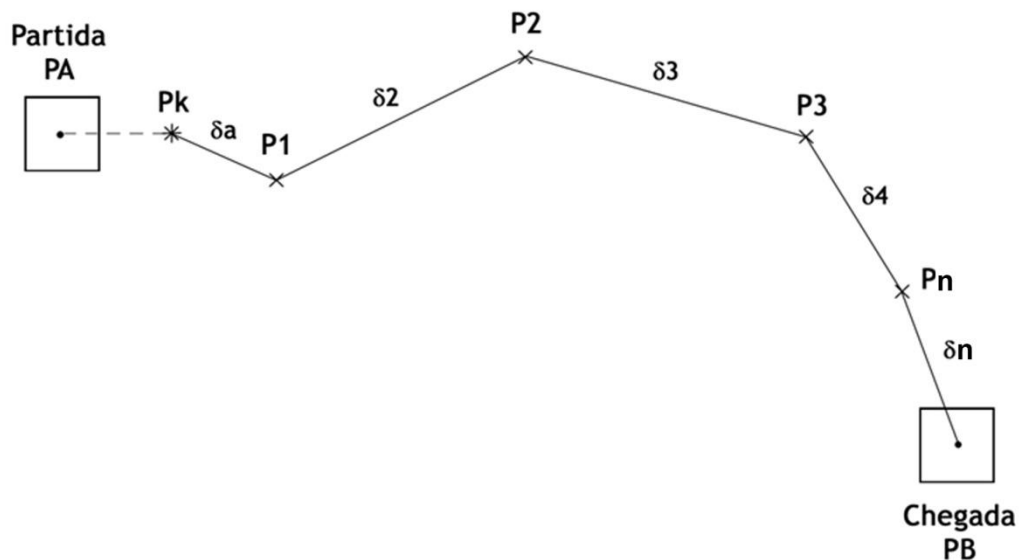


Figura 2.3.1.1: Representação do percurso a realizar pela aeronave  $x$ .

Sabemos que o instante da partida é  $t_0$

Considerando:

$t_{tp}$  - Tempo total previsto

$t_{fp}$  - Tempo final previsto

A figura 2.3.1.1. representa o percurso a ser realizado por uma aeronave entre o ponto de partida PA e o ponto de chegada PB. No instante atual, a aeronave encontra-se no ponto Pk, tendo que percorrer o caminho  $\delta a$  até ao primeiro *waypoint* P1. Para chegar a PB a aeronave terá que passar pelos *waypoints* P2, P3 e Pn, percorrendo os caminhos  $\delta 2$ ,  $\delta 3$ ,  $\delta 4$  e  $\delta n$ .

O  $n$  representa a possibilidade da viagem de uma dada aeronave poder ter que passar por  $n$  *waypoints*.

Como primeiro passo, é necessário calcular a velocidade média  $v_{k,l}$ , tendo em conta o percurso próximo já efetuado  $t_{k-l}$  a  $t_k$ , como representado na figura 2.3.1.2:

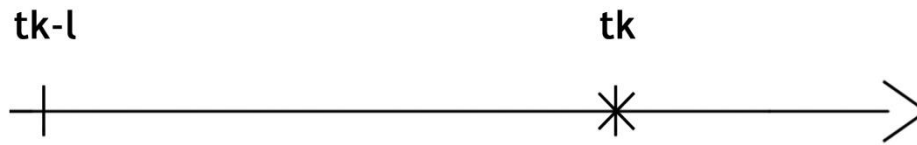


Figura 2.3.1.2: Representação do percurso próximo realizado pela aeronave x.

Da figura 2.3.1.2  $t_k$  representa no percurso da aeronave o instante de tempo atual e  $t_{k-l}$  representa o instante de tempo há  $l$  minutos atrás. Como dos dados recolhidos do site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com) apenas se obtém o valor instantâneo da velocidade da aeronave, é necessário determinar uma velocidade média, para melhor aferir o tempo que levará a aeronave a chegar ao ponto de chegada PB. Desta forma, optou-se por calcular a velocidade baseando o seu cálculo na distância percorrida durante um intervalo de tempo  $l$  qualquer. Para realizar o cálculo das velocidades médias, neste estudo, optou-se por um intervalo de tempo de 10 minutos.

$$l \in \{5 \text{ min}, 10 \text{ min}, 15 \text{ min}, \dots\} \quad (2.1)$$

A distância percorrida desde o instante  $t_{k-l}$  e o instante atual  $t_k$  pode ser obtida a partir da equação (2.2):

$$\delta_{j,k} = \|x_s - x_{s-j}\|, s = k, k-1, \dots, k-l \quad (2.2)$$

Onde  $x_s$  representa a posição da aeronave no instante atual, e  $x_{s-j}$  representa a posição da aeronave em  $l$  minutos atrás.

Desta equação, já pode ser obtida a velocidade média da aeronave para este pequeno pedaço do percurso:

$$v_{k,l} = \frac{1}{l} \sum_{j=1}^l \delta_j \quad (2.3)$$

Como segundo passo, pretende-se estimar o instante de chegada da aeronave ao ponto PB:

Para estimar a distância que ainda falta percorrer, pode recorrer-se ao cálculo da distância loxodrómica, entre o ponto atual e o *waypoint* imediatamente a seguir, e somando as distâncias entre os *waypoints* seguintes até ao ponto de chegada, resolvendo a equação 2.4:

$$Df = \delta_a + \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (2.4)$$

Como terceiro passo, pretende estimar-se o tempo restante do voo, a partir da posição atual. Tal é conseguido com a resolução da equação 2.5:

$$t_{k,r} = \frac{Df}{v_{k,l}} \quad (2.5)$$

Para um quarto passo, pretende estimar-se o tempo final  $t_f$ , isto é, o instante previsto de chegada da aeronave ao ponto PB, o que é conseguido, resolvendo a equação 2.6:

$$t_f = t_k + t_{k,r} \quad (2.6)$$

Finalmente, como quinto passo é possível quantificar a percentagem de viagem efetuada a cada instante e, deste modo, utilizando a função sigmoide, representada na equação 2.7, representar graficamente essa mesma viagem ao longo do tempo:

$$S_f(t) = \left( 1 + e^{-\sigma(t_k - t_f/2)} \right)^{-1} \quad (2.7)$$

Onde  $S_f$  representa a função característica para a viagem da aeronave do seu ponto de origem  $P_A$  ao seu ponto de chegada.  $P_B$ ,  $t_k$  representa o tempo do voo contado a partir do ponto de origem até ao ponto atual,  $\sigma$  representa o fator de escala, que é constante.  $t_f$  representa a estimativa feita no instante atual do tempo total do voo completo, pelo que esta estimativa vai sendo atualizada no decorrer do voo.

## 2.4 Densidade de Tráfego

A definição clássica de densidade  $\rho$ , pode ser interpretada como a massa em quilogramas  $m$  de determinada matéria presente num volume confinado  $V$  em metros cúbicos, representada pela equação 2.8

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.8)$$

É possível transpor esta definição para o modelo abordado nesta dissertação, mas em vez de massa por volume, pretende determinar-se o número de aeronaves por volume, representado pela equação 2.9

$$d_{TMA} = \frac{n_a}{V_{TMA}} \quad (2.9)$$

Onde

$d_{TMA}$  - Representa a densidade de ocupação

$n_a$  - Representa o número de aeronaves presentes num volume confinado

$V_{TMA}$  - Representa o volume da TMA em metros cúbicos

Como o número de aeronaves presente na TMA não é constante ao longo do tempo, também a densidade de ocupação da TMA vai variar ao longo do tempo.

A previsão da densidade de ocupação pode ser interpretada como uma ferramenta para prever o número de aeronaves presentes na TMA em instantes do futuro próximo.

Com a possibilidade de obter a localização em termos de percentagem de caminho efetuado por uma aeronave, pode-se prever, com maior ou menor rigor, o instante de chegada dessa aeronave. No entanto, a fiabilidade da previsão irá estar dependente da percentagem de caminho efetuado e da qualidade da informação recebida, se vem com intervalos de tempo constantes, mais ou menos curtos.

Para os controladores aéreos responsáveis por uma qualquer TMA, com a possibilidade de aceder a informação que lhes permita, com uma antecedência razoável, saber qual a densidade do tráfego com que irão lidar dentro de alguns minutos, permite-lhes melhorar as operações a efetuarem nesse instante futuro, diminuindo o fator surpresa, implementando, desta forma, uma melhoria significativa na gestão do fluxo aéreo e um aumento da segurança aérea no interior da TMA.

Com base nos estudos relatados neste documento, abre-se a porta a novas investigações que poderão beneficiar da informação aqui presente. Enquanto neste documento fica provado que é possível prever a densidade de aeronaves numa TMA, apenas cruzando e manipulando matematicamente a informação relativa aos planos de voo, a dados obtidos periodicamente no decorrer do voo das aeronaves e informação sobre a configuração e localização da TMA. Evidencia-se que, como em muitas atividades, sejam industriais, ou de qualquer outra área económica ou humana, a otimização do tempo e do espaço assumem-se como um parâmetro

muito importante na fomentação da competitividade, melhorando os fatores sócio económicos decorrentes dessas atividades. Tal é possível com a modelação matemática da atividade que se pretende otimizar, tendo sempre em conta a forma como interage com as atividades a montante e a jusante desta.



# Capítulo 3

## Simulação e Validação

### 3.1 Identificação das Aeronaves e da TMA

#### 3.1.1 Identificação das Aeronaves

Foram utilizados para a simulação do modelo da previsão da duração total do voo os dados referentes aos voos realizados por duas aeronaves diferentes A e B. Esses dados encontram-se presentes nas tabelas 1 e 2 apresentadas em anexo.

Os voos realizados pelas duas aeronaves não tinham a mesma origem, nem o mesmo destino, pois aqui apenas se pretendia validar a possibilidade de prever a duração total de um voo enquanto este está a decorrer.

O facto de se efetuar a simulação para as duas aeronaves teve como objetivo verificar a existência de diferenças na qualidade das previsões para os dois voos. Apurando as causas para essas diferenças, foi possível validar que a qualidade dos dados recolhidos iria influenciar a qualidade das previsões da duração total dos voos.

Os dados da aeronave A começaram a ser recolhidos quando esta se encontrava já em voo de cruzeiro, dirigindo-se para a TMA do aeroporto de Lisboa, onde o voo terminou. Os dados da aeronave B foram extraídos ao longo de uma parte de voo de cruzeiro da aeronave, onde não ocorreram grandes alterações em termos de altitude e velocidade.

Para a simulação do modelo de previsão da densidade de tráfego aéreo numa TMA foram utilizados dados dos voos de 10 aeronaves, identificadas pelos algarismos de 1 a 10. As tabelas contendo os dados dos voos destas aeronaves encontram-se em anexo.

### 3.1.2 Identificação da TMA

Atendendo a que esta dissertação pretende apenas servir de prova para a validade de um modelo de previsão da densidade de ocupação de uma TMA, optou-se por simplificar as dimensões da TMA em estudo, sendo esta resumida a um cilindro com a base a 121 metros acima do nível do mar, com diâmetro máximo de 45 milhas náuticas e o centro localizado no ponto com as coordenadas geodéticas  $38^{\circ}13'N$ ,  $9^{\circ}23'W$  e uma altura de 10000 metros acima do nível do mar.

São consideradas no interior da TMA todas as aeronaves que se encontrem a 300 metros acima da pista, altitude de decisão, no caso de irem aterrar e tenham, mesmo em pista, uma velocidade superior a 90 nós, velocidade de decisão, mesmo que a aeronave esteja ainda na pista, mas já só pode levantar voo.

Na figura 3.1.2.1 está representado modelo físico da TMA fictícia utilizada no presente estudo.

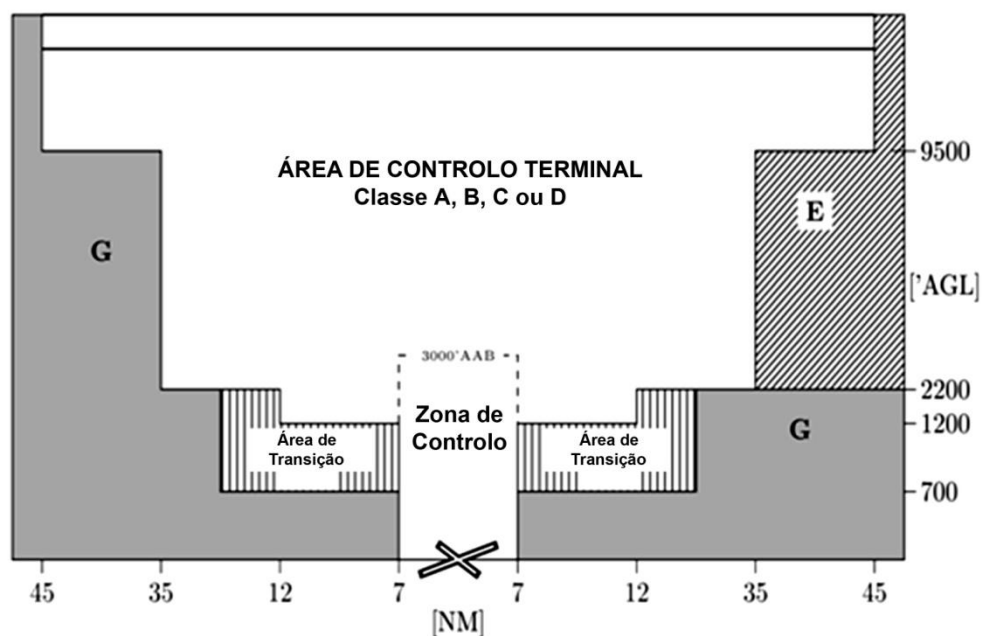


Figura 3.1.2.1: Representação do modelo físico da TMA utilizada no presente estudo.

## 3.2 Previsão do Instante de Chegada de duas aeronaves a um Ponto

### 3.2.1 Validação da Utilidade da Função Sigmoide

Depois de extrair a informação útil recolhida do voo das aeronaves A e B visualizadas no site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com) foi possível através da utilização da função sigmoide obter para cada instante dos voos das duas aeronaves a distância em percentagem para o ponto de chegada de cada aeronave, este resultado é visível nos gráficos das figuras 3.2.1.1 e 3.2.1.2. Foi também possível obter várias estimativas do tempo total desse mesmo voo, durante o seu decorrer visível nos gráficos das figuras 3.3.1.1 e 3.3.1.2.

A função sigmoide, como já referido neste documento caracteriza-se por permitir obter todos os valores de uma transição em todos os instantes até que esta esteja completa.

É uma ferramenta matemática muito versátil, que utilizada no âmbito deste trabalho permite fazer a previsão do instante de chegada de uma aeronave a um determinado ponto do seu voo.

Ao integrar num programa as previsões do instante de chegada de várias aeronaves a um espaço aéreo limitado pode obter-se uma previsão da densidade de aeronaves dentro desse espaço aéreo limitado, que nesta dissertação será um espaço aéreo representativo da TMA do aeroporto de Lisboa.

Relativamente ao modelo do voo de uma aeronave entre dois pontos distantes, passando por waypoints intermédios. Pretende-se obter para cada instante desse voo uma previsão da duração do voo até à chegada ao ponto de destino.

De uma forma mais prática pretende-se determinar o tempo que a aeronave vai levar a chegar ao ponto de destino, sabendo o tempo que demorou a voar da origem ao ponto atual e qual a velocidade média dos últimos minutos da viagem até ao instante atual.

A previsão do instante de chegada das aeronaves à TMA, permite conceber um modelo onde a densidade de aeronaves na TMA não se altera de forma brusca, antes se comporta de uma forma suave e praticamente sem alterações não previstas nos 10 ou 20 minutos seguintes, isto é, a previsão da densidade de aeronaves presentes na TMA feita para os 20 minutos seguintes tem quase 100% de probabilidades de ser essa mesma a densidade de aeronaves no interior da TMA passados os 20 minutos.

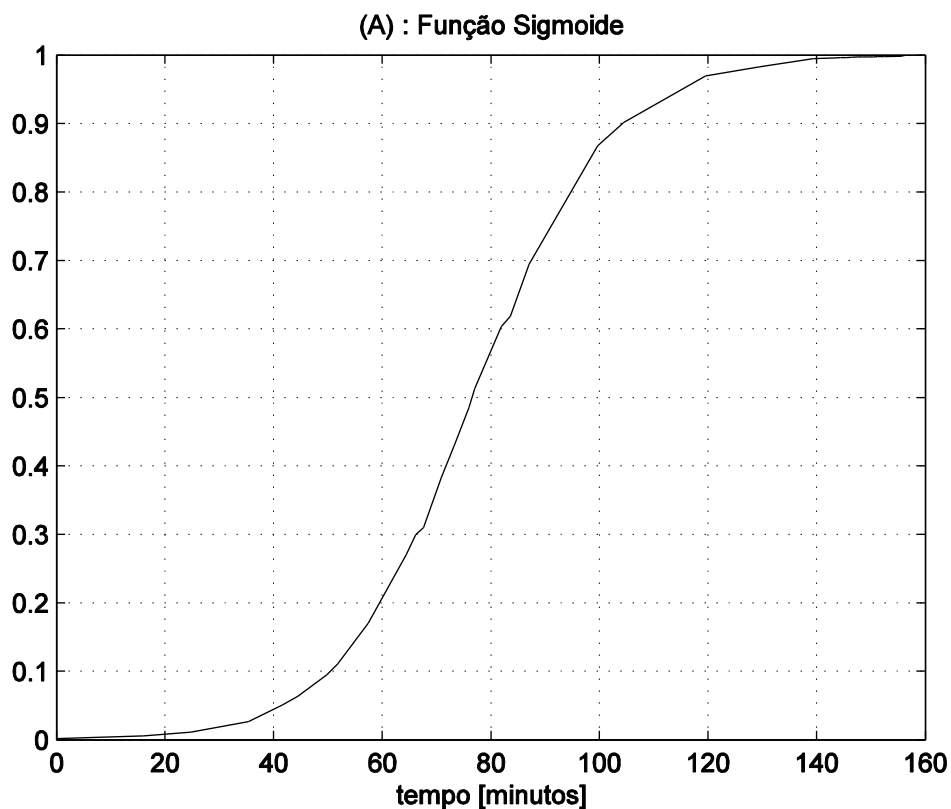


Figura 3.2.1.1: Representação gráfica da função logística referente à contagem da aeronave A na TMA de chegada durante o voo desde a origem à TMA de destino.

O gráfico representado na figura 3.2.1.1 apresenta a função sigmoide do voo realizado pela aeronave A, sendo este contado já durante o decorrer do voo até à entrada na TMA de destino. Verificou-se que esta parte do voo teve a duração de 155 minutos.

Analisando o gráfico mais em pormenor verifica-se que a aeronave começa a ser contada na TMA de chegada logo após o voo começar a ser contabilizado. No entanto, o valor que a aeronave representa para a TMA de chegada é muito pequeno até aos 40 minutos de viagem, sendo inferior a 0.1. Observa-se um crescimento aproximadamente constante durante os 60 minutos de viagem seguintes, em que aos 105 minutos de viagem apresenta-se na TMA de chegada com um valor de 0.9. Nos próximos 50 minutos a aeronave vai-se aproximando do valor da unidade, sendo esta atingida na altura em que entra na TMA de destino, aos 155 minutos.

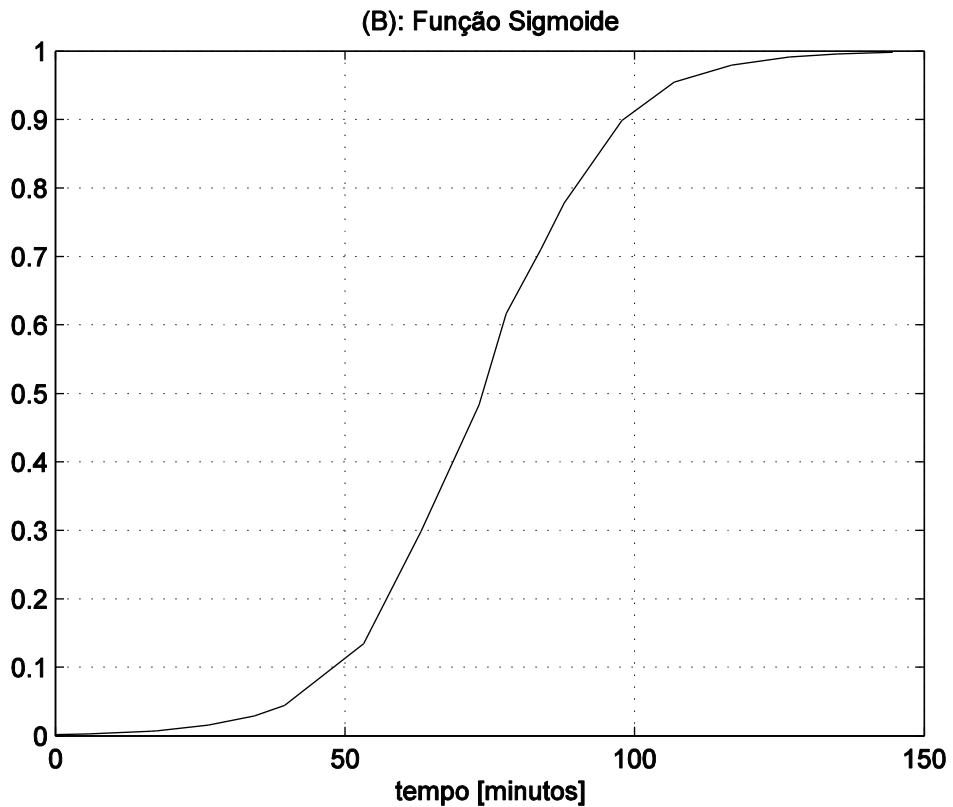


Figura 3.2.1.2: Representação gráfica da contagem da aeronave B na de chegada durante o voo desde a origem do voo ao seu destino.

O gráfico representado na figura 3.2.1.2 apresenta a função sigmoide de uma parte do voo realizado pela aeronave B, começando este a ser contabilizado já durante o voo da aeronave B e finalizando a contagem num ponto futuro do voo. Verificou-se que esta parte do voo teve a duração de aproximadamente 145 minutos.

Ao analisar mais em pormenor a função sigmoide representativa de parte do voo da aeronave B, verifica-se que só próximo dos 50 minutos de voo após o início da contagem é que o valor da aeronave para o ponto de chegada atinge os 0.1, durante os próximos 50 minutos de voo este valor cresce de forma aproximadamente constante até aos 0.9. O valor da unidade, ou seja, o atingir do ponto de chegada, é alcançado aproximadamente ao fim dos próximos 49 minutos.

### 3.2.2 Comparação das Previsões da Duração dos dois voos

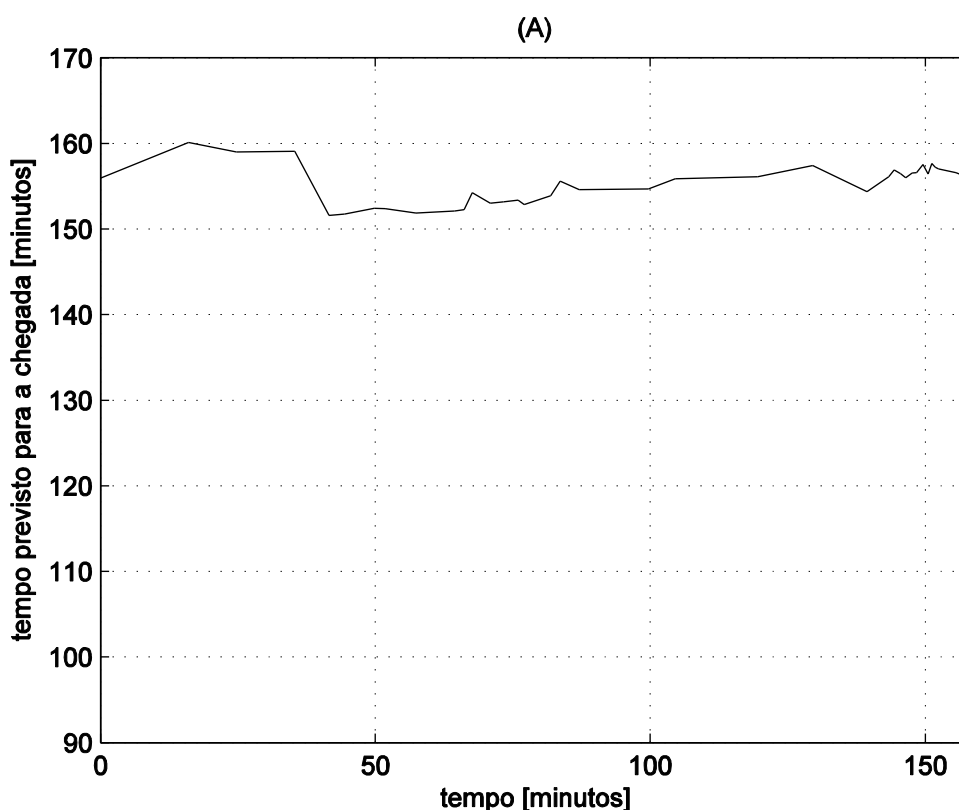


Figura 3.2.2.1: Representação gráfica da previsão da duração total do voo da aeronave A.

O gráfico da figura 3.2.2.1 representa a estimativa do tempo de entrada da aeronave A na TMA de chegada. A estimativa inicial devia ser efetuada com base numa velocidade de cruzeiro, discriminada no plano de voo da aeronave A. No entanto, optou-se, por calcular uma velocidade média do voo com os dados de que dispúnhamos, retirados do já citado site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com). É por essa razão que a primeira estimativa do tempo total da viagem aponta para um valor muito próximo do real. As estimativas seguintes são efetuadas com base no modelo explicado no subcapítulo 2.3.1

Pelo facto de os intervalos de tempo não serem constantes, o cálculo do valor da velocidade média utilizada em cada estimativa vai variando um pouco de estimativa para estimativa, levando a que os valores do tempo total da viagem oscilem um pouco à volta do valor do tempo de duração do voo real. Também pequenos incrementos ou decrementos da velocidade no decorrer do voo contribuem para as oscilações atrás referidas.

Com a aproximação da aeronave A à TMA, a velocidade do voo diminui em relação à velocidade praticada durante o voo de cruzeiro, por essa razão as oscilações tendem a ser menos intensas, aproximando-se mais do valor real do tempo de entrada da aeronave na TMA.

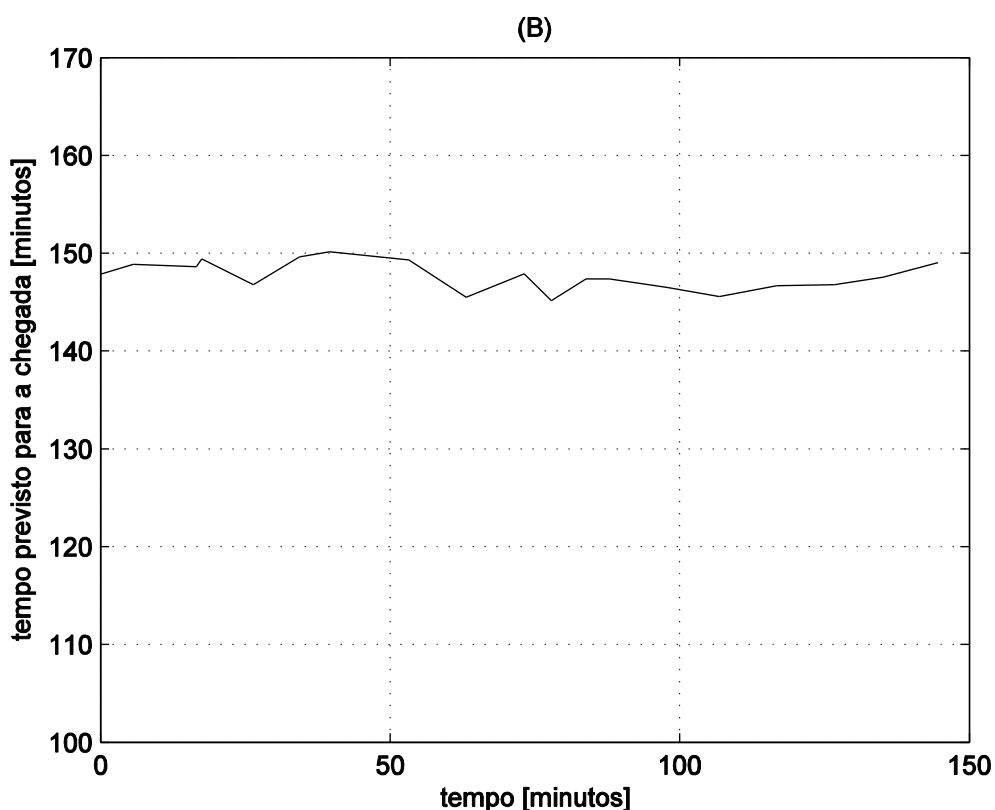


Figura 3.2.2.2: Representação gráfica da previsão da duração total do voo da aeronave B.

O gráfico representado na figura 3.2.2.2 apresenta a estimativa do tempo da aeronave B do ponto de origem ao ponto de chegada no decorrer desse voo. Também para o estudo da função sigmoide da aeronave B, o cálculo da primeira estimativa do tempo total de voo foi utilizada uma velocidade média do voo a partir dos dados retirados do já citado site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com). É também por essa razão que a primeira estimativa do tempo total do voo desta aeronave aponta para um valor muito próximo do real.

As oscilações verificadas não são tão acentuadas como as das estimativas efetuadas para a aeronave A, possivelmente pelos dados da velocidade e altitude referentes à aeronave B serem mais constantes. No entanto apresentam o mesmo padrão, isto é, tendem a ser menos significativas para a parte final e a aproximarem-se mais do valor de tempo total real.

Através da visualização dos gráficos presentes nas figuras 3.2.2.1 e 3.2.2.2 pode-se verificar que a aeronave B por ter um voo a uma velocidade mais constante que a aeronave A apresenta uma menor divergência de valores das estimativas do instante de chegada em comparação com os valores da aeronave A.

### 3.3 Resultado da Previsão da Densidade de uma TMA

A análise dos gráficos a seguir apresentados pode ser interpretada como uma viagem no tempo para o futuro, onde se verifica que a estimativa do número de aeronaves dentro da TMA aproxima-se mais do valor real à medida que esse instante real se aproxima. No entanto também se valida que, para instantes inferiores a 20 minutos, a previsão é muito próxima do valor real.

Para se conseguir prever os valores da densidade de aeronaves dentro da TMA em instantes futuros, recorreu-se ao valor da aeronave para a TMA de chegada, calculado com recurso à função sigmoide de cada aeronave, sendo estes depois adicionados se o instante previsto de entrada das aeronaves for simultâneo entre elas. Os valores da densidade não correspondem a aeronaves completas, pelo menos na previsão para instantes superiores a 40 minutos da entrada prevista da aeronave na TMA. Tal deve-se a estas ainda estarem a caminho da TMA, sendo contabilizadas como uma fração da unidade, sendo esta diretamente proporcional à percentagem do caminho efetuado até entrarem na TMA. No entanto a aproximadamente 40 minutos da entrada da aeronave na TMA, esta já é contada a valores próximos da unidade. Só quando esta entra na TMA é que passa a ser contada como uma unidade.

Para a modelação do sistema com a TMA e as aeronaves no seu interior ou a caminho dela procedeu-se da seguinte forma:

Considerando uma amostra de 10 aeronaves que vão voar para a TMA acima descrita. Chegando a esta ao longo de um intervalo de tempo de 240 minutos.

As aeronaves 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10 partiram de pontos e a instantes de tempo distintos entre si, apenas o local de chegada é comum, o instante da chegada pode também ser comum entre algumas aeronaves.

Cada aeronave é contabilizada como uma fração da unidade desde o início do voo até à entrada na TMA de chegada, em função do caminho percorrido. Uma vez no interior da TMA passa a ser contabilizada como uma unidade, até voar abaixo da altitude de decisão, o que significa que vai mesmo aterrar e deixar de ocupar a TMA.

O tempo de permanência de uma aeronave no interior da TMA depende da configuração da mesma e depende do corredor pelo qual a aeronave entrou, que pode ser mais ou menos perto da pista. Podem também ocorrer problemas na pista de aterragem o que levará as aeronaves ou a permanecerem na TMA ou a rumarem para um aeroporto alternativo.

Para este estudo o tempo médio de permanência dentro da TMA foi estimado em 20 minutos. Havendo no entanto aeronaves que lá permaneceram mais ou menos que esse intervalo de tempo.

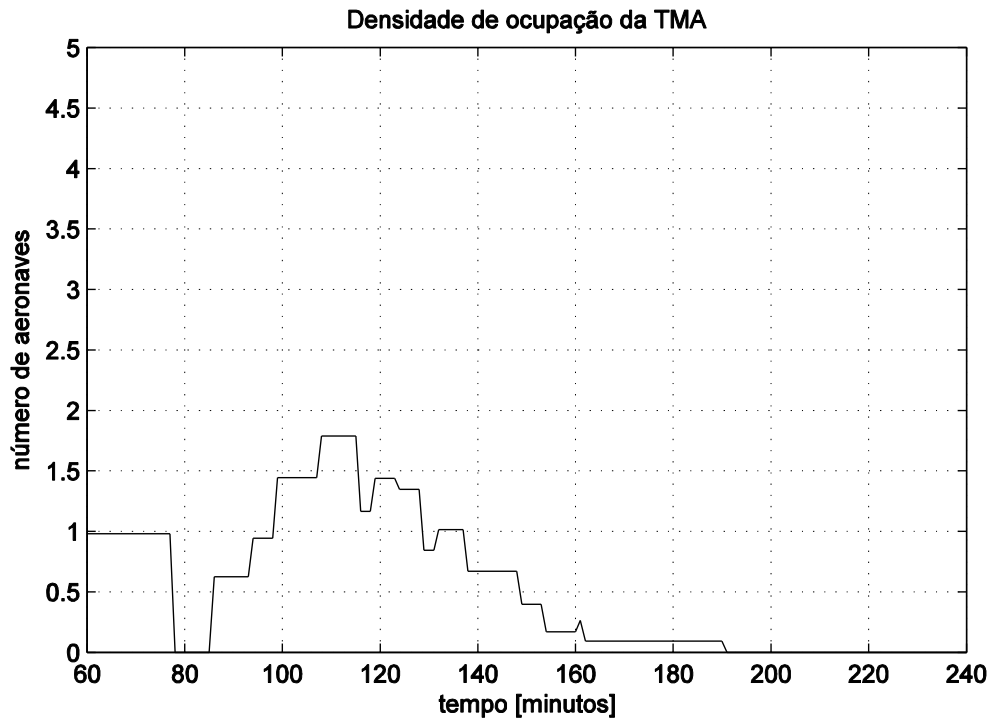


Figura 3.3.1: Representação gráfica da previsão da densidade de ocupação prevista aos 60 minutos, para os 180 minutos seguintes.

Analisando o gráfico presente na figura 3.3.1, verifica-se que no momento em que a estimativa é feita, aos 60 minutos, está uma aeronave no interior da TMA, que será designada como aeronave 2. Verifica-se também, que existe um instante entre os 78 minutos e os 86 minutos em que a TMA estará vazia, só começando a entrar mais aeronaves a partir dos 86 minutos, identificando-se o instante em que irão estar mais aeronaves no interior da TMA - entre os 108 e os 130 minutos. No entanto, ainda não é perceptível qual vai ser o número total de aeronaves no interior da TMA, porque algumas ainda vêm a meio do seu percurso ou mais atrás ainda. O gráfico mostra também, que pelo menos até aos 190 minutos a TMA terá aeronaves no seu interior.

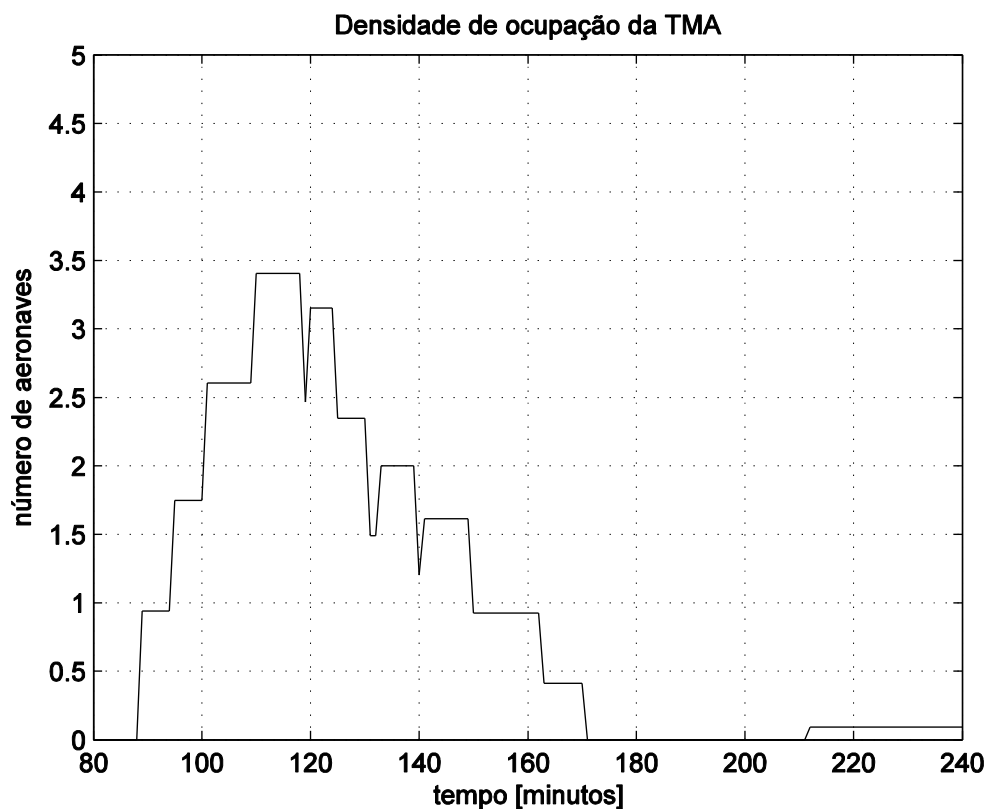


Figura 3.3.2: Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 80 minutos, para os 160 minutos seguintes.

Analisando o gráfico presente na figura 3.3.2, confirma-se que aos 80 minutos não existe qualquer aeronave no interior da TMA, situação que se irá manter até pouco para lá dos 86 minutos, instante em que entra a aeronave 3 na TMA, seguida seis minutos depois pela aeronave 4, sendo estas seguidas pela aeronave 5 oito minutos após a entrada da aeronave 4. Próximo dos 110 minutos entrará a aeronave 6. No entanto, estima-se que aos 118 minutos aterrará a aeronave 3. Aos 120 minutos prevê-se que a aeronave 7 entre na TMA. A aeronave 4 aterrará por volta dos 126 minutos. Prevê-se que a aeronave 5 aterre aos 130 minutos. Aos 132 entrará a aeronave 8. Prevê-se que aos 139 minutos aterre a aeronave 6. Aos 141 minutos deverá entrar a aeronave 9. A aeronave 7 aterrará aos 150 minutos. A aeronave 8 prevê-se que aterre aos 162 minutos e a aeronave 9 aterre aos 169 minutos. Segue-se um período compreendido entre os 169 e os 210 minutos em que a TMA estará vazia. Aos 210 minutos está prevista a entrada da aeronave 10.

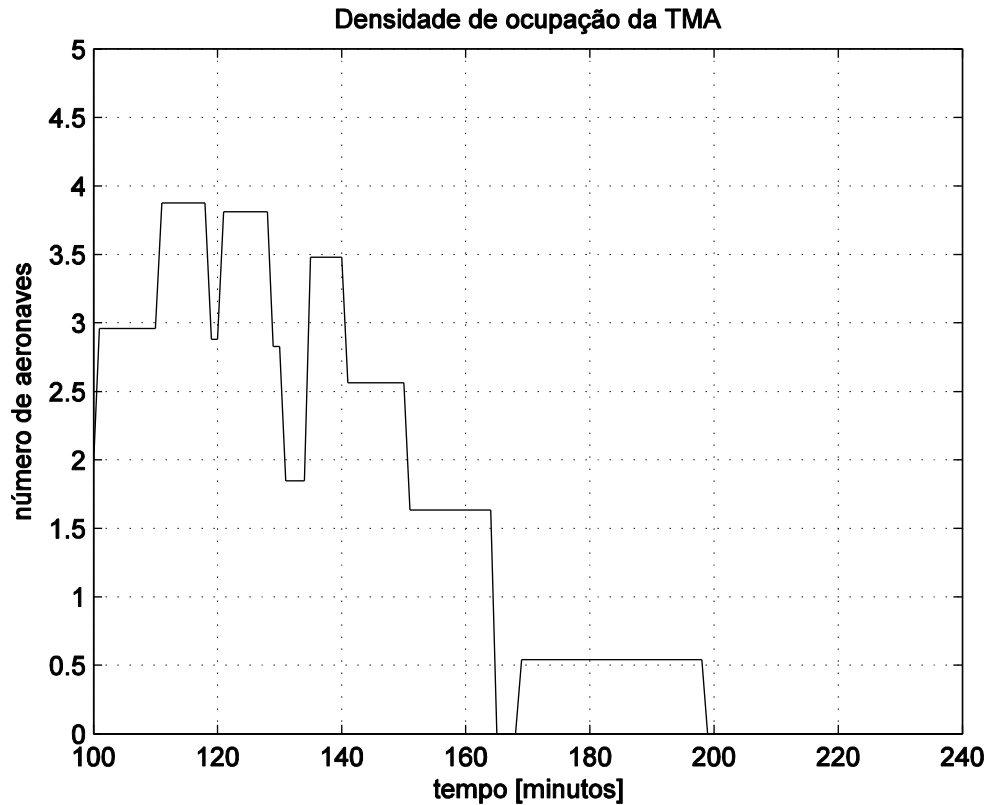


Figura 3.3.3: Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 100 minutos, para os 140 minutos seguintes.

O gráfico representado na figura 3.3.3 apresenta a previsão da densidade de aeronaves na TMA aos 100 minutos e apresenta a previsão da densidade de ocupação para o futuro.

Como havia sido previsto aos 100 minutos estão no interior da TMA 3 aeronaves, a aeronave 3, a aeronave 4 e a aeronave 5. A aeronave 6 só irá entrar onze minutos depois e desse instante até aos 118 minutos estarão 4 aeronaves na TMA. A aeronave 3 deverá aterrar então aos 118 minutos, mas aos 120 entrará a aeronave 7, voltando a estarem presentes na TMA 4 aeronaves até aos 127 minutos, instante em que a aeronave 4 aterrará e três minutos depois aterrará a aeronave 5. Quase em simultâneo entrarão as aeronaves 8 e 9, voltando a estarem presentes na TMA 4 aeronaves até aos 140 minutos, instante em que a aeronave 6 deverá aterrar e 10 minutos depois desta aterrará a aeronave 7 e entre os 12 e os 13 minutos depois desta a 8 e a 9 aterrarão também, ficando a TMA sem nenhuma aeronave até aos 169 minutos, instante em que entrará a aeronave 10, aterrando aos 190 minutos.

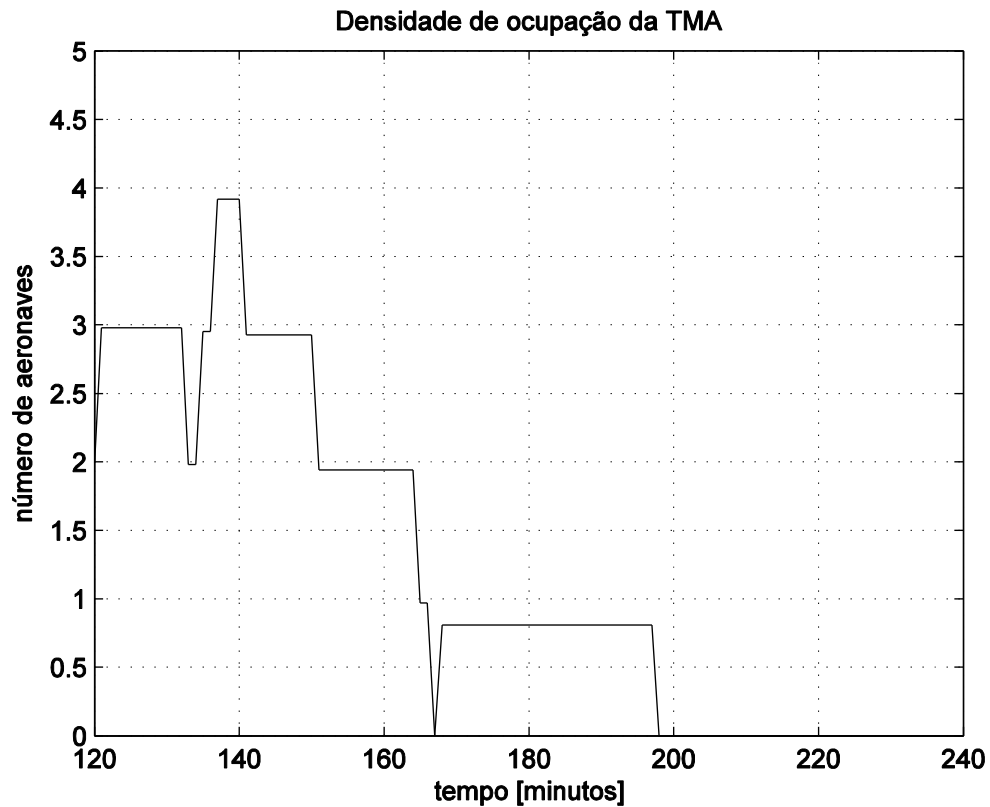


Figura 3.3.4: Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 120 minutos, para os 120 minutos seguintes.

O gráfico representado na figura 3.3.4 apresenta a densidade de aeronaves presentes na TMA aos 120 minutos e a previsão para os minutos seguintes.

Verifica-se que aos 120 minutos apenas estão presentes na TMA 3 aeronaves, pois a aeronave 3 aterrou aos 118 minutos. Aos 133 minutos aterrará a aeronave 4, mas aos 135 entrará a aeronave 8 e aos 136 a aeronave 9. A aeronave 4 aterrará aos 140 minutos. Aos 150 minutos aterrará a aeronave 6 e 7. Entre os 163 e os 165 aterrarão as aeronaves 8 e 9. A aeronave 10 entrará aos 167 e vai aterrar aos 198 minutos.

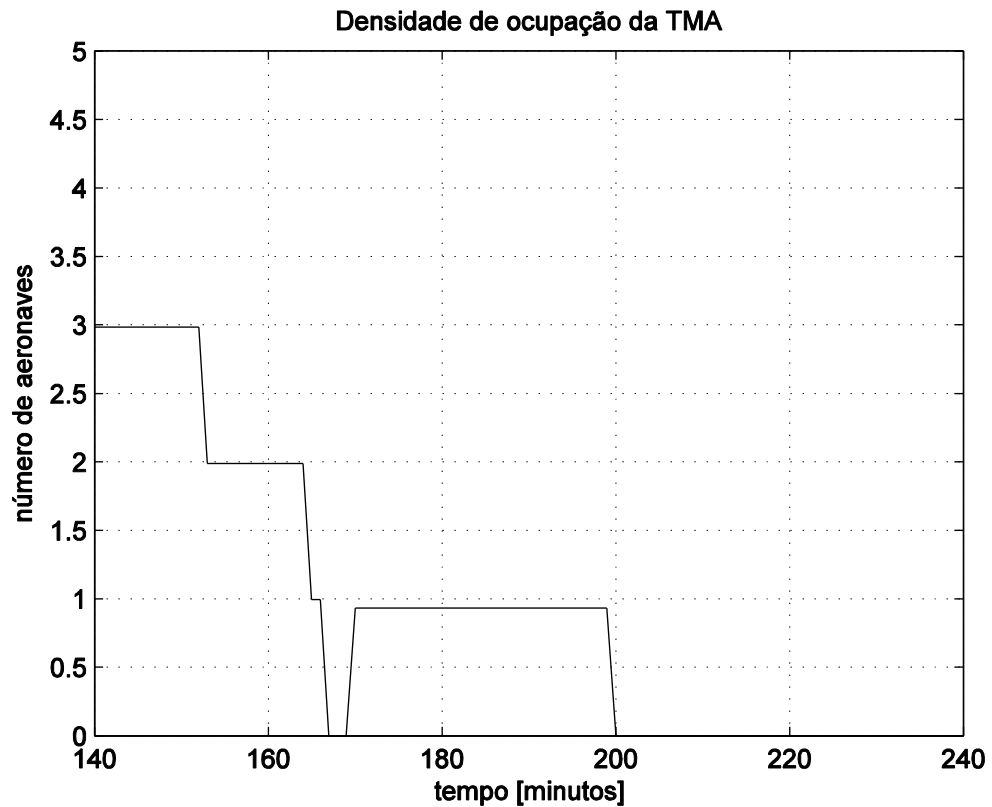


Figura 3.3.5: Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 140 minutos, para os 100 minutos seguintes.

O gráfico representado pela figura 3.3.5 apresenta a densidade de aeronaves presentes na TMA aos 140 minutos e a previsão para os minutos seguintes.

Aos 140 minutos apenas estão presentes na TMA as aeronaves 7, 8 e 9, significando que as aeronaves 5 e 6 aterraram antes deste instante de tempo. Aos 152 minutos a aeronave 7 deverá de aterrar. A aeronave 8 irá aterrar aos 165 minutos e 2 minutos após esta aterrará a aeronave 9. Aos 170 minutos entrará na TMA a aeronave 10 que deverá de aterrar aos 199 minutos.

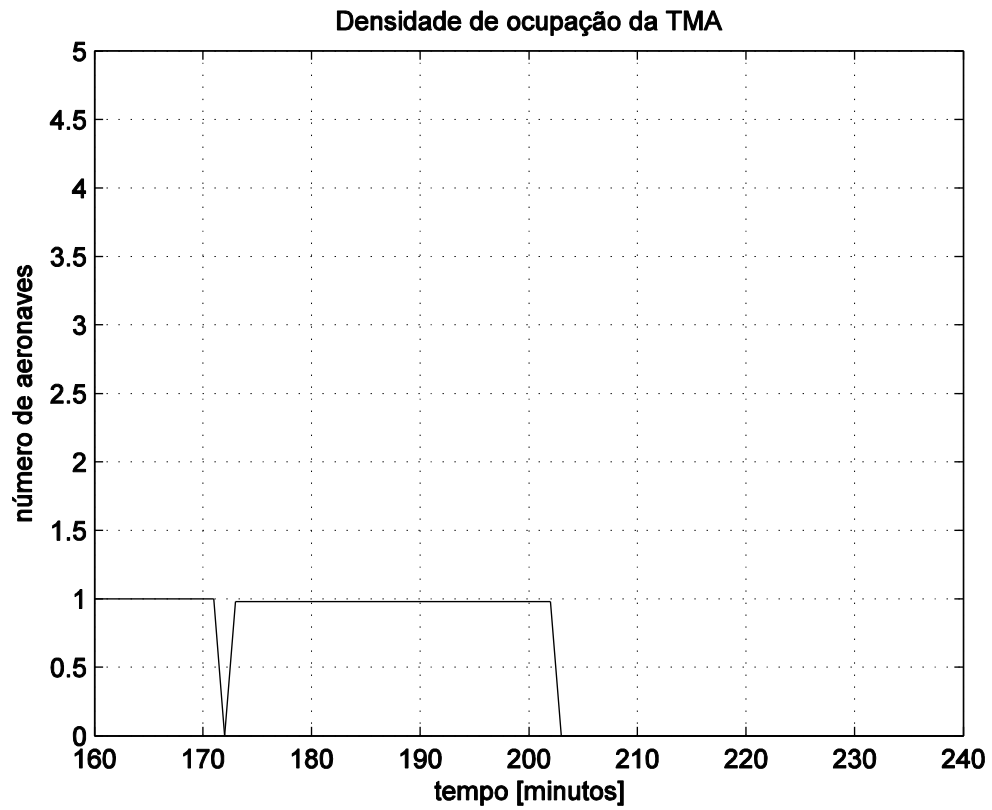


Figura 3.3.6: Representação gráfica da densidade de ocupação da TMA prevista aos 160 minutos, para os 80 minutos seguintes.

O gráfico representado na figura 3.3.6 apresenta a densidade de aeronaves presentes na TMA aos 160 minutos e a previsão para os minutos seguintes.

Verifica-se que aos 160 minutos apenas a aeronave 9 está presente na TMA, indo aterrizar aos 171 minutos. Aos 173 minutos entra a aeronave 10, estando a sua aterragem prevista para os 202 minutos.

# Capítulo 4

## Conclusões

### 4.1 Conclusões da Aplicação Desta Dissertação

Como referido nos objetivos desta dissertação, pretendia-se, em primeiro lugar, perceber e modelar, o voo de uma aeronave, de um ponto de partida a um de destino. Pela construção do modelo preditivo desse voo, que consistiu na previsão da duração total do mesmo, feita por estimativas, pôde criar-se um modelo que pôde prever o instante em que a aeronave entrou na TMA de destino. O modelo preditivo do voo, ao ser utilizado na previsão de chegada de várias aeronaves a uma mesma TMA, possibilitou a previsão da densidade de tráfego aéreo no interior dessa TMA.

Em segundo lugar, pretendia-se prever a densidade de tráfego aéreo numa TMA, através das previsões dos instantes de chegada de várias aeronaves a uma TMA.

Recorrendo ao site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com) conseguiu-se ter acesso aos dados dos voos das aeronaves utilizadas nas simulações presentes nesta dissertação. Registou-se o instante de tempo em que os dados do voo foram recolhidos. Estes dados são a Latitude, a Longitude, a Altitude, a Velocidade instantânea e o Rumo da aeronave.

Analisando o trabalho desenvolvido nesta dissertação, verifica-se que é possível prever com valores próximos dos reais, não só o instante de chegada de uma aeronave ao seu destino, como também a taxa de ocupação de uma determinada TMA para instantes futuros. Ou até mesmo, onde se poderá encontrar a aeronave alguns minutos ou horas mais à frente no seu percurso.

Verificou-se que pelo facto de os valores dos voos retirados do site [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com) não se encontrarem separados por intervalos de tempo regulares, isto é, em alguns instantes do voo, a informação sobre o mesmo foi extraída de minuto a minuto, ou até entre intervalos de tempo menores, e, para outras etapas do voo, a informação sobre o mesmo só estava disponível de 10 em 10 minutos, ou entre intervalos de tempo ainda maiores. No entanto os resultados das simulações foram satisfatórios.

Relativamente à simulação do modelo de previsão do instante de chegada de uma aeronave a um ponto mais adiante na sua rota, verificou-se que quanto mais constantes fossem os parâmetros do voo, melhor era a qualidade dessa previsão, como verificado no caso da aeronave B. No entanto, caso existissem algumas variações nos parâmetros do voo a qualidade da previsão diminuía numa primeira fase, para apresentar valores muito próximos dos reais (de melhor qualidade). Mais perto do final do voo, esta situação foi verificada na simulação da aeronave A, onde a recolha dos dados foi efetuada desde uma fase de voo de cruzeiro até esta se encontrar já próxima do aeroporto de destino.

Relativamente à simulação do modelo de previsão da densidade de tráfego aéreo no interior de uma TMA, verificou-se que ao longo do tempo a maior parte das previsões acertaram no valor da densidade no interior da TMA.

A abordagem utilizada neste trabalho poderia ser aplicada numa ferramenta de previsão dinâmica da densidade de tráfego aéreo, no interior de uma TMA, o que facilitaria grandemente o trabalho dos controladores aéreos, promovendo a segurança aérea no interior das TMAs, e tornando os voos nestas áreas mais eficientes em termos ambientais e económicos, através de voos mais diretos aos aeroportos, menos tempos de espera para utilizar a pista, levando a menos atrasos nos voos.

De uma forma geral, conclui-se que os objetivos inicialmente propostos nesta dissertação foram atingidos e validados, provando, que é possível criar uma ferramenta que permita aos controladores aéreos prevenir com antecedência congestionamentos no interior das TMAs.

## **4.2 Trabalhos Futuros**

O resultado prático deste trabalho mostra a possibilidade de efetuar a previsão do instante de chegada de uma aeronave a uma TMA. Assim, através da soma de previsões efetuadas para outras aeronaves que tenham o mesmo destino, é, até, possível prever a densidade de aeronaves em instantes futuros nessa TMA. No entanto, foram utilizados dados de voos em que os instantes de recolha dessa informação não eram constantes durante o voo. Não obstante, estas podem ser colmatadas, ou até eliminadas, recorrendo-se a outra fonte de dados, onde a informação seja recolhida a intervalos de tempo constantes.

## Bibliografia

- [1] K. Bousson, Tiago M. Domingues, Air Traffic Flow Modelling and Simulations Based on Dynamic Networks, *International Review on Modelling and Simulations (I.R.E.Mo.S.)*, Vol. 4, n. 6, (December 2011), p.p. 3418-3424.
- [2] P.K. Menon, G.D. Sweriduk, T. Lam, D. M. Diaz, and K.D. Balimoria, Computer-Aided Eulerian Air Traffic Flow Modeling and Predictive Control, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 29. n. 1 (2006), p.p. 12-19.
- [3] A. M. Bayen, R. L. Rafferd, and C. J. Tomlin, Adjoint-based Constrained Control of Eulerian Transportation Networks: Application to Air Traffic Control. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Vol. 6 (2004), p.p. 5539-5545.
- [4] G. Bastin and V. Guffens, Congestion Control in Compartmental Network Systems, *Systems and Control Letters*, Vol. 55. N 8 (2006), p.p. 689-696.
- [5] M. Gugat, M. Herty, A. Klar, and G. Leurering, Optimal Control for Traffic Flow Networks, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 126. N. 3 (200), p.p. 589-616.
- [6] Website: [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com). (Accessed on March 10, 2012).
- [7] Website: [www.eurocontrol.int/content/](http://www.eurocontrol.int/content/) sesar-and-research. (accessed on December 5, 2011).
- [8] SESAR Definition Phase - Deliverable D3. The ATM target concept. [www.sesar-consortium.aero](http://www.sesar-consortium.aero). (Accessed on December 12, 2011).
- [9] J. H. Lv, X. H. Yu, G.R. Chen, D. Z. Chen, Characterizing the synchronizability of small-world dynamical networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I: Regular Papers*. Vol. 51, n. 4 (2004), 787-796.
- [10] Designation of Airspace Classes, E.S. Department Of Transportation Federal Aviation Administration. Section 1. Chapter 14, (February 2012), 1-10.
- [11] Sara Bagassi, Daniela Francia, Carlo Alfredo Persiani, Terminal Area “Green” Optimization Using Job-shop Scheduling Techniques, *27<sup>th</sup> International Congress of the Aeronautical Sciences (ICAS 2010)*, Vol. 1, n. 6, (September 2010), p.p. 5135-5144.



# Anexos

Tabela 1: Dados do voo da aeronave A.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000000	53.225	7.08100	10370	421	223
16.066333	52.201	4.55379	10668	425	189
24.733000	51.208	4.16720	10668	420	202
35.349667	50.124	3.21130	10668	424	217
41.583000	49.583	2.36580	10675	442	233
44.449667	49.373	1.93090	10668	438	233
49.766333	49.011	1.10490	10668	444	234
51.783000	48.867	0.79640	10668	445	235
57.416333	48.413	0.00210	10668	441	219
64.416333	47.742	-0.80410	10675	435	219
66.149667	47.576	-0.99870	10668	438	218
67.633000	47.439	-1.15860	10668	439	218
70.916333	47.119	-1.52640	10668	429	218
73.283000	46.894	-1.78299	10668	436	217
75.983000	46.635	-2.07430	10668	430	218
77.049667	46.531	-2.19050	10668	428	218
81.883000	46.071	-2.69660	10675	434	217
83.583000	45.923	-2.85720	10668	431	216
87.049667	45.579	-3.22560	10668	428	216
99.649667	44.374	-4.46830	10668	415	212
104.499667	43.891	-4.87739	10668	412	211
119.566333	42.409	-6.10519	10668	420	208
129.533000	41.498	-6.85020	10668	422	216
139.433000	40.470	-7.85630	10668	420	216
143.349667	40.104	-8.20500	9920	437	225
144.366333	40.001	-8.29770	9173	423	219
145.549667	39.898	-8.36079	8526	405	210
146.449667	39.782	-8.42689	7620	382	203
147.616333	39.685	-8.48220	7253	350	210
148.449667	39.609	-8.54800	6629	343	216
150.499667	39.460	-8.69330	5615	323	225
151.183000	39.413	-8.73820	5264	323	225
151.849667	39.362	-8.78739	5104	300	225
152.449667	39.321	-8.82719	4998	274	216
155.566333	39.149	-8.99319	4007	246	225
156.349667	39.097	-9.04199	3680	247	216
160.316333	38.853	-9.20560	3984	233	213
160.666333	38.846	-9.20969	2857	232	213
162.349667	38.743	-9.27599	2286	228	206

Tabela 2: Dados do voo da aeronave B.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000000	50.96390	-3.28469	10668	435	186
5.650000	50.29090	-3.41970	10675	432	187
16.550000	48.99249	-3.89710	10660	438	197
17.500000	48.88439	-3.94980	10668	438	197
26.416667	47.84590	-4.44289	10675	440	197
34.366667	46.94230	-4.85520	10683	447	197
39.616667	46.34740	-5.11859	10660	438	197
53.250000	44.69550	-5.80170	10668	446	191
63.166667	43.49530	-6.12349	10668	427	190
73.166667	42.31660	-6.42689	10660	428	190
77.866667	41.74479	-6.59039	10668	435	204
83.850000	41.10439	-7.03789	10660	432	205
87.883333	40.62369	-7.15329	10675	439	187
97.816667	39.41440	-7.35189	10659	436	190
106.850000	38.29220	-7.53010	10675	452	187
116.766667	37.09369	-7.71480	10683	437	187
126.700000	35.89710	-7.88680	10660	438	182
135.100000	34.91879	-8.01619	10675	401	193
144.616667	33.94970	-8.29540	10682	410	197
148.016667	33.50249	-8.42200	10675	400	193

Tabela 3: Dados do voo da aeronave 1.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000000	43.555	-6.00180	472	140	105
1.000000	43.54039	-5.93770	1013	202	105
2.000000	43.49869	-5.89489	2004	226	203
3.100000	43.43610	-5.96039	2979	289	217
4.500000	43.33749	-6.06770	4130	354	218
5.400000	43.26370	-6.14869	4579	388	218
6.000000	43.21300	-6.20439	4983	395	218
7.583333	43.07650	-6.34079	6545	385	208
8.650000	42.98830	-6.40289	7200	403	207
9.683333	42.88439	-6.47630	7947	401	207
11.066667	42.74380	-6.57460	8785	415	207
12.566667	42.58700	-6.68189	9738	417	206
19.533333	41.86469	-7.15960	10668	406	205
29.450000	40.86860	-7.77880	10668	408	212
37.566667	39.99289	-8.30659	9707	427	212
38.683333	39.89699	-8.36100	8907	400	210
39.750000	39.80299	-8.41409	8251	388	210
40.783333	39.69389	-8.47620	7680	374	210
41.000000	39.67609	-8.48780	7451	379	214
42.350000	39.54950	-8.60490	6583	368	217
43.166667	39.49830	-8.65470	6232	366	224
44.233333	39.41519	-8.73520	5653	360	224
45.166667	39.33650	-8.81160	5143	347	224
45.700000	39.30460	-8.84229	4937	340	224
46.950000	39.20329	-8.93970	4175	340	224
47.850000	39.13060	-9.00970	3695	324	224
48.600000	39.06750	-9.06639	3321	300	216
49.500000	39.02479	-9.09420	3146	298	214
50.750000	38.95510	-9.13899	2628	233	213
51.433333	38.92810	-9.15639	2376	240	213
55.900000	38.92810	-9.15639	2376	164	213
56.266667	38.65939	-9.25919	1096	164	201

Tabela 4: Dados do voo da aeronave 2.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000333	41.14209	1.79620	3284	323	249
5.017000	40.9776	1.15399	6957	402	251
12.983667	40.87279	-0.07310	10759	441	270
17.767000	40.86699	-0.76200	11887	432	256
27.717000	40.44149	-2.30799	11894	433	249
37.267000	40.1064	-3.74379	11887	428	253
47.200333	39.7882	-5.21720	11894	432	254
51.450333	39.65359	-5.84729	10850	436	254
54.767000	39.5369	-6.31599	10058	415	246
59.683667	39.31099	-6.98430	10050	435	252
63.367000	39.1296	-7.50699	9494	443	251
64.067000	39.0917	-7.61489	8884	436	251
65.133667	39.03889	-7.76419	8084	424	251
65.817000	39.0061	-7.85730	7543	408	251
66.350333	38.98559	-7.91509	7185	402	251
66.700333	38.98559	-7.91509	7100	442	251
67.050333	38.93959	-8.04449	6821	442	251
67.267000	38.93959	-8.04449	6506	400	251
68.167000	38.89959	-8.15649	5996	390	251
68.533667	38.8851	-8.19740	5752	390	251
69.267000	38.8851	-8.19740	5752	442	251
71.250333	38.7637	-8.53420	4129	381	251
71.433667	38.7543	-8.56020	4000	374	251
73.600333	38.65489	-8.83329	2750	354	245
74.183667	38.6364	-8.88320	2544	348	250
74.633667	38.61209	-8.94890	2209	333	245

Tabela 5: Dados do voo da aeronave 3.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000000	43.47619	5.15179	922	187	253
1.050000	43.43169	5.09799	1653	213	200
5.050000	43.16360	4.86530	3909	350	214
14.566667	42.28490	4.06780	8633	423	212
16.566667	42.11780	3.86419	9547	405	251
28.100000	41.43809	2.31119	10942	430	64
28.333333	41.42060	2.28149	10942	430	64
29.333333	41.35419	2.16179	10942	428	238
30.850000	41.28909	1.93710	10942	425	251
32.616667	41.25710	1.66790	10660	422	260
37.600000	41.16329	0.90780	10668	424	260
47.450000	40.93280	-0.56670	10660	418	250
57.050000	40.53629	-1.98320	10660	422	249
66.933333	40.19429	-3.40269	10660	413	254
76.750000	39.88700	-4.80879	10660	412	255
83.983333	39.66660	-5.84649	10584	418	254
84.366667	39.66660	-5.84649	11879	418	254
89.666667	39.46159	-6.63130	10057	411	249
91.166667	39.40100	-6.78770	10057	412	249
97.550000	39.05570	-7.66669	9440	411	249
99.616667	38.95199	-7.92440	8945	407	249
100.300000	38.92179	-7.99850	7520	358	249
103.733333	38.75319	-8.38059	5273	327	240
104.816667	38.70499	-8.48809	4648	314	240
108.816667	38.60179	-8.84839	3177	233	249
109.733333	38.58469	-8.93050	2811	231	255
110.866667	38.56869	-9.01750	2483	226	260
111.200000	38.56380	-9.04359	2361	225	260
111.566667	38.55870	-9.07130	2201	228	260
111.733333	38.55799	-9.07590	2125	231	262

Tabela 6: Dados do voo da aeronave 4.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000000	48.71309	2.29729	777	167	242
1.000000	48.68469	2.23079	1318	220	235
2.850000	48.63770	2.03920	2667	284	286
7.783333	48.74199	1.38589	3657	347	266
9.033333	48.71620	1.22399	4442	363	245
13.033333	48.51899	0.59530	6972	431	244
14.583333	48.43019	0.32560	7741	447	244
17.900000	48.29319	-0.05640	9144	475	228
20.116667	47.97220	-0.45400	10210	462	219
24.133333	47.58389	-0.93060	11269	447	220
32.133333	46.82739	-1.86140	11887	437	220
36.100000	46.46079	-2.31090	11887	429	221
40.700000	46.05709	-2.80940	11879	436	220
44.750000	45.68449	-3.26359	11887	433	220
50.383333	45.13210	-3.81400	11887	432	211
60.366667	44.10699	-4.69580	11887	419	211
70.116667	43.12780	-5.52590	11887	419	212
80.066667	42.13110	-6.31139	11887	425	208
85.083333	41.66320	-6.74329	11887	423	216
85.866667	41.55550	-6.84750	11887	423	215
95.650000	40.71410	-7.64520	11879	418	216
100.566667	40.26769	-8.05889	11346	431	215
101.983333	39.98980	-8.30630	9608	426	215
103.133333	39.89820	-8.37579	9067	389	221
105.933333	39.66960	-8.56869	8259	370	221
106.516667	39.60739	-8.62069	7733	365	221
107.250000	39.53070	-8.68490	7246	364	221
108.916667	39.39439	-8.79850	6156	346	221
110.583333	39.27000	-8.90189	5181	333	220
111.983333	39.15429	-8.99750	4487	314	220
112.166667	39.15240	-8.99910	4419	314	220
118.483333	38.68809	-9.31429	875	277	211

Tabela 7: Dados do voo da aeronave 5.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000333	50.09140	3.52660	8450	402	204
10.933667	49.20040	2.14860	10896	444	226
13.667000	48.93509	1.72090	11529	444	229
20.767000	48.33200	0.70530	11879	453	227
26.783667	47.82710	-0.11320	11894	460	227
29.717000	47.57829	-0.50760	11879	456	226
32.783667	47.30190	-0.93900	11894	452	226
38.667000	46.79529	-1.71170	11887	442	226
42.767000	46.44650	-2.23059	11887	436	225
45.667000	46.19939	-2.59310	11887	439	225
51.367000	45.72579	-3.27289	11887	437	224
58.800333	45.06860	-4.18799	11894	428	224
67.150333	44.34640	-5.12849	11887	417	219
77.100333	43.41760	-6.10480	11887	419	208
86.950333	42.39260	-6.81470	11887	419	207
96.767000	41.36509	-7.57899	11886	421	217
106.683667	40.34199	-8.30669	11109	424	211
108.000333	40.19149	-8.39719	10141	411	212
109.100333	40.08250	-8.46269	9417	389	212
110.400333	39.95289	-8.54269	8343	394	212
111.133667	39.89269	-8.58009	7695	389	212
112.067000	39.78960	-8.64349	6941	388	212
113.883667	39.62619	-8.74390	5866	360	212
114.450333	39.58429	-8.76970	5569	355	212
115.933667	39.43769	-8.85979	4762	337	212
116.867000	39.36220	-8.90579	4175	323	212
117.950333	39.28560	-8.95219	3641	322	212
118.667000	39.23629	-8.98199	3367	301	212
119.233667	39.17280	-9.02059	2978	300	212
120.333667	39.09920	-9.06489	2696	287	212
121.650333	39.00150	-9.12390	2186	270	212
122.550333	38.93500	-9.16399	1874	266	205
123.517000	38.87239	-9.20170	1592	243	205
124.683667	38.99660	-9.12679	1304	216	212
125.083667	38.79140	-9.24830	1416	215	206
126.017000	38.73720	-9.27389	1241	210	206
127.133667	38.73720	-9.27389	1186	210	206

Tabela 8: Dados do voo da aeronave 6.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000333	47.66279	10.2085	11574	449	255
7.150333	47.41590	8.92929	11780	449	255
15.583667	47.11350	7.43719	11887	454	252
19.067000	46.90440	6.87460	11887	454	233
22.017000	46.68359	6.44970	11871	439	233
25.067000	46.45570	6.01869	11887	445	232
34.833667	45.89090	4.92860	11887	446	232
41.017000	45.28849	3.74860	11902	447	234
43.150333	45.24210	3.65830	11887	443	234
46.783667	44.87270	2.94490	11887	441	233
57.433667	44.10079	1.50849	11887	431	233
61.683667	43.78580	0.94240	11894	441	232
67.300333	43.37429	0.21910	11879	442	231
68.467000	43.30180	0.05140	11879	434	246
78.350333	42.82549	-1.42599	11879	424	245
88.317000	42.44050	-2.91800	11894	424	245
89.083667	42.40279	-3.02839	11879	423	245
107.617000	41.50600	-5.71089	11879	417	245
114.167000	41.20750	-6.54300	11879	417	239
115.283667	41.08370	-6.72799	11879	417	237
127.917000	40.10569	-8.15450	11162	428	236
129.350333	40.00300	-8.27849	10461	427	225
130.283667	39.86140	-8.37819	9775	438	210
131.000333	39.79809	-8.41629	9372	445	212
131.733667	39.71320	-8.46570	8648	440	211
132.700333	39.61480	-8.54020	7939	427	222
133.617000	39.52120	-8.63230	7063	411	217
134.750333	39.44480	-8.70720	6468	404	225
135.467000	39.36160	-8.78739	5729	401	225
136.150333	39.31349	-8.83380	5379	389	225
136.617000	39.25480	-8.89049	4785	383	216
137.800333	39.14770	-8.99370	4030	365	225
138.550333	39.10150	-9.03810	3497	357	225
139.517000	39.01409	-9.10139	3162	341	206
142.533667	38.93390	-9.15310	2247	333	207
144.933667	39.09159	-9.04749	3443	345	225
145.833667	38.59250	-9.37529	1179	230	214

Tabela 9: Dados do voo da aeronave 7.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
25.583333	4.845.920	0.85240	9197	382	224
28.733333	4.821.750	0.50290	10035	402	223
30.233333	4.809.290	0.32470	10599	392	223
34.633333	4.773.879	-0.17410	10668	395	223
36.716667	4.765.939	-0.28440	10668	393	223
40.350000	4.728.280	-0.80460	10668	385	223
50.516667	4.648.839	-1.87670	10668	382	221
58.916667	4.581.620	-2.73430	10660	378	221
63.483333	4.545.920	-3.17819	10668	380	220
68.500000	4.505.960	-3.66610	10675	385	220
78.416667	4.423.989	-4.58370	10675	377	212
88.200000	4.335.940	-5.32530	10668	368	213
98.300000	4.251.069	-6.03000	10675	384	209
108.216667	4.162.570	-6.72339	10652	350	217
117.783333	4.081.490	-7.52310	10668	351	216
123.200000	4.038.770	-7.93499	10668	349	216
127.216667	4.007.280	-8.23429	9944	358	215
129.716667	3.984.170	-8.39199	9448	369	203
143.950000	3.929.679	-8.85510	4091	261	216
148.900000	3.901.339	-9.11839	3383	230	214
151.916667	3.885.620	-9.25839	2895	230	214
152.916667	3.880.270	-9.30620	2446	235	216
155.900000	3.863.419	-9.41760	1584	250	171
156.883333	3.856.869	-9.40879	1333	224	174

Tabela 10: Dados do voo da aeronave 8.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
0.000000	53.225	7.08100	10370	421	223
16.066333	52.201	4.55379	10668	425	189
24.733000	51.208	4.16720	10668	420	202
35.349667	50.124	3.21130	10668	424	217
41.583000	49.583	2.36580	10675	442	233
44.449667	49.373	1.93090	10668	438	233
49.766333	49.011	1.10490	10668	444	234
51.783000	48.867	0.79640	10668	445	235
57.416333	48.413	0.00210	10668	441	219
64.416333	47.742	-0.80410	10675	435	219
66.149667	47.576	-0.99870	10668	438	218
67.633000	47.439	-1.15860	10668	439	218
70.916333	47.119	-1.52640	10668	429	218
73.283000	46.894	-1.78299	10668	436	217
75.983000	46.635	-2.07430	10668	430	218
77.049667	46.531	-2.19050	10668	428	218
81.883000	46.071	-2.69660	10675	434	217
83.583000	45.923	-2.85720	10668	431	216
87.049667	45.579	-3.22560	10668	428	216
99.649667	44.374	-4.46830	10668	415	212
104.499667	43.891	-4.87739	10668	412	211
119.566333	42.409	-6.10519	10668	420	208
129.533000	41.498	-6.85020	10668	422	216
139.433000	40.470	-7.85630	10668	420	216
143.349667	40.104	-8.20500	9920	437	225
144.366333	40.001	-8.29770	9173	423	219
145.549667	39.898	-8.36079	8526	405	210
146.449667	39.782	-8.42689	7620	382	203
147.616333	39.685	-8.48220	7253	350	210
148.449667	39.609	-8.54800	6629	343	216
150.499667	39.460	-8.69330	5615	323	225
151.183000	39.413	-8.73820	5264	323	225
151.849667	39.362	-8.78739	5104	300	225
152.449667	39.321	-8.82719	4998	274	216
155.566333	39.149	-8.99319	4007	246	225
156.349667	39.097	-9.04199	3680	247	216
160.316333	38.853	-9.20560	3984	233	213
160.666333	38.846	-9.20969	2857	232	213
162.349667	38.743	-9.27599	2286	228	206

Tabela 11: Dados do voo da aeronave 9.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
42.333333	4.840.500	0.43970	9243	405	237
48.633333	4.800.130	-0.14979	11193	389	221
54.050000	4.745.609	-0.85140	11277	397	220
58.150000	4.712.570	-1.26689	11269	392	220
60.916667	4.695.139	-1.48370	11292	391	220
64.366667	4.659.100	-1.92540	11285	383	220
72.616667	4.597.650	-2.83910	11269	383	220
76.050000	4.578.849	-3.24549	11285	385	236
82.700000	4.519.299	-3.85130	11277	385	236
91.016667	4.440.250	-4.44470	11277	391	210
101.016667	4.347.840	-5.22039	11269	380	211
101.783333	4.341.080	-5.28030	11269	379	212
118.250000	4.192.980	-6.45920	11277	380	208
121.216667	4.164.940	-6.69930	11277	372	217
127.216667	4.115.740	-7.18829	11269	360	216
129.200000	4.099.819	-7.34510	11285	365	216
135.733333	4.046.900	-7.85759	10477	356	216
139.900000	4.013.850	-8.17270	9601	362	216
143.200000	3.985.130	-8.38770	8625	388	204
143.950000	3.978.150	-8.42730	8282	376	203
148.066667	3.945.519	-8.69769	6431	320	217
152.133333	3.919.740	-8.94410	4907	264	215
153.116667	3.913.750	-8.99840	4632	248	215
154.900000	3.904.749	-9.08019	4198	208	215
155.900000	3.900.059	-9.12270	3901	207	215
156.900000	3.895.459	-9.16450	3627	208	215
159.916667	3.881.219	-9.29320	2895	207	215
160.900000	3.876.550	-9.33520	2659	209	214
161.850000	3.871.790	-9.37800	2407	211	215
164.883333	3.857.050	-9.47799	1600	237	145
166.933333	3.852.609	-9.34500	1203	221	53
172.950000	3.877.320	-9.14029	1203	120	22
176.866667	3.877.289	-9.13809	1203	120	202
177.900000	3.876.870	-9.13899	1203	120	258
178.433333	3.876.870	-9.13959	1203	120	250

Tabela 12: Dados do voo da aeronave 10.

tempo [min]	Latitude	Longitude	h [m]	v [kt]	Rumo [°]
42.483333	4.756.360	9.03589	10668	418	248
46.466667	4.739.529	8.39910	10675	420	248
49.583333	4.726.789	7.92820	10668	416	249
51.383333	4.718.099	7.61280	10660	415	249
58.616667	4.675.690	6.58870	10668	417	233
65.233333	4.629.710	5.71309	10660	401	233
67.350000	4.617.830	5.48120	10660	403	233
71.866667	4.585.940	4.86960	10668	400	232
75.050000	4.590.129	4.94979	10668	400	233
80.866667	4.529.879	3.68940	10652	385	245
82.850000	4.518.869	3.42689	10660	386	237
85.216667	4.504.630	3.13569	10683	396	235
89.166667	4.479.840	2.61850	10660	388	239
96.716667	4.436.149	1.64789	10675	401	238
100.433333	4.413.430	1.15690	10660	399	237
104.666667	4.387.870	-0.63580	10660	392	237
114.616667	4.327.219	-0.63580	10668	383	235
124.433333	4.281.119	-1.89009	10675	384	244
134.433333	4.236.079	-3.15269	10668	367	245
140.433333	4.210.600	-3.88689	10675	359	244
151.150000	4.168.670	-5.16830	10668	355	246
154.116667	4.156.710	-5.53010	10660	353	246
162.100000	4.119.780	-6.43789	10660	350	230
165.200000	4.100.869	-6.74080	10668	348	230
171.200000	4.063.490	-7.32990	10660	344	230
174.100000	4.045.120	-7.61540	10675	349	229
180.150000	4.007.339	-8.19420	9852	356	229
184.150000	3.973.290	-8.45490	7734	356	203
185.233333	3.963.759	-8.52020	7117	332	216
187.133333	3.950.130	-8.65320	6111	321	217
189.100000	3.936.410	-8.78589	5097	308	216
198.883333	3.880.040	-9.23980	1485	237	206
202.883333	3.863.329	-9.22889	937	209	56
208.933333	3.877.850	-9.13359	937	140	165
210.916667	3.877.199	-9.13199	937	140	106

# Air Traffic Flow Modeling for Terminal Area Occupancy Rate Forecasting

K. Bousson, N. Coelho, Andreia Silva

**Abstract**— Congestion in the Terminal Maneuvering Areas (TMAs) of larger airports impacts all aspects of air traffic flow, not only at national level, but may also induce arrival delays at international level. Hence, there is a need to forecast the air traffic flow density in TMAs so that appropriate decisions may be taken to optimize their occupancy rates. The approach taken in the present paper relies on dynamic network concepts for air traffic flow modelling and simulation. Indeed, the focus has been on the predictive estimation of the number of aircraft in specified TMAs across-time. The simulation of the described models has been performed to validate successfully the air traffic flow dynamics from actual and realistic data of a network of three TMAs in the Iberian Peninsula. The modeling concepts in the present research work may help stakeholders for TMA capacity management and optimization and subsequent airport socio-economic policies. Copyright © 2011 Praise Worthy Prize S.r.l. - All rights reserved.

**Keywords**— Air Traffic Flow, Modelling and Simulation, Predictive Estimation, Terminal Maneuvering Area (TMA).

## INTRODUCTION

In recent decades, many research activities [1-5] have focused an effort towards dealing with air traffic congestion in the various areas of controlled airspaces. It is encouraging that advanced air traffic management systems based on the Secondary Surveillance Radar (SSR) and the Automatic Dependent Surveillance-Broadcast (ADS-B) are enabling more efficient use of existing air traffic flow network systems, resulting in reduced traffic congestion, delays, energy consumption and improved air safety. Furthermore, the SESAR Program [6,7] that is underway will combine technological, economic and regulatory aspects and will use the Single European Sky (SES) legislation to synchronize the plans and actions of the different stakeholders and federate resources for the development and implementation of the required improvements throughout Europe, in both airborne and ground systems.

The fundamental question is “how to model efficiently air traffic flow?” In order to answer that question, the approach in use in the present

paper relies on dynamic network concepts, focusing on the modeling, simulation, analysis and prediction of dynamic relations among entities composed of actors, events and resources, and also the impact of such dynamics on its environment [8,9].

## Region of controlled airspace

Controlled airspace is the airspace within which air traffic control service is provided. Some or all aircraft may be subject to air traffic control. Types of controlled airspace are the **High Level Airspace** and the **Low Level Airspace**. Within Low Level Airspace, we can find the **TMAs** among other controlled areas.

The Control Zone (CTR) is an airspace that encompasses the airport and is dedicated to deal exclusively with the aircraft that are expected to land on that airport, and also the aircraft during the departure phase.

## Air traffic flow modelling

### Topology of TMA Networks

To represent the possible connection between TMAs we can define the following:

$$N(k) = \sum_{i=1}^n x_i(k) = \sum_{i=1}^n x_i(k+1) \quad (1)$$

$$n(k) = \sum_{i=1}^n i = n \quad (2)$$

$$x_i(k) = d_{ii}(k) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \alpha_{ji}(k) + \sum_{i=1}^n d_{ij}(k) \quad (3)$$

Equations (3) means that the number of aircrafts in a TMA  $i$  includes those from other TMAs  $j$   $\alpha_{ji}(k)$  ( $i \neq j$ ), those that have already landed  $d_{ii}(k)$ , and those that have took-off but are still in the TMA  $d_{ij}(k)$  ( $i \neq j$ ). The  $\alpha_{ii}$  number is given as:

$$\alpha_{ii}(k) = d_{ii}(k-1) + \sum_{\substack{j=1 \\ i \neq j}}^n \alpha_{ji}(k-1) \quad (4)$$

Therefore:

$$x_i(k) = \alpha_{ii}(k) + \sum_{i \neq j}^n \alpha_{ji}(k) \quad (5)$$

Since all the departures normally have a delayed arrival at the destination TMA, there exists  $h > 0$  so that:

$$d_{ij}(k) = \alpha_{ij}(k+h), (i \neq j) \quad (6)$$

Finally, the analysis above leads to the following state space equation, where  $x_i$  are the state variables and  $d_{ij}$  (and  $d_{ji}$ ) are the control variables:

$$x_i(k) = x_i(k-1) + \sum_{i \neq j}^n (d_{ji}(k-1) - d_{ij}(k-1)) \quad (7)$$

## Traffic Flow Modelling Between TMAs

Fig.1 shows the flight of an aircraft from TMA1 to TMA2 crossing controlled regions I, II, III, IV and V, where region I and V are the CTR of TMA1 and CTR of TMA2, respectively. TMA 1 is composed of regions I and II, and TMA2 is composed of regions IV and V, region III being an intermediary flight zone these two TMAs.

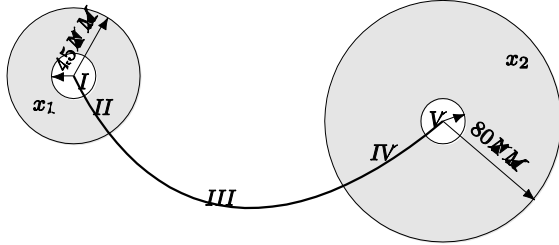


Fig. 1 trajectory of an aircraft from one TMA to another.

Let us call  $T_i$  a given TMA and  $C_i$  the corresponding CTR, and  $a_c$  an aircraft. Then, let us define  $T(i, a_c)$  and  $C(i, a_c)$  as:

$$T(i, a_c) = \begin{cases} 1, & \text{if } a_c \in T_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8a)$$

$$C(i, a_c) = \begin{cases} 1, & \text{if } a_c \in C_i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8b)$$

The number of aircrafts in the departure lane of TMA  $T_i$  at time  $k$ ,  $P_{ij}(k)$  may be obtained in real-time from the TMA control tower traffic management data through a data link system. Then:

$$x_i(k) = x_i(k-1) + \sum_{i \neq j}^n \alpha_{ji}(k) + \sum_{i \neq j}^n P_{ij}(k) \quad (9)$$

## Simulations

### Data acquisition and preliminary results

The data that were used for the simulations were obtained from the website [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com). A menu provided on this website allows the visitor to export data regarding one or several flights to a *.kml* file. Making use of a bash script, the useful information can be distilled and be converted into a format that is now readable by Octave<sup>TM</sup>. Three TMAs, like the ones described in Fig.1, are, in fact, the TMAs of Oporto in Portugal, Madrid in Spain and a third TMA in the Balears Island in Spain. Even though there are many other airports in that area, our objective was not to deal with all the air traffic flow in the area, but rather to validate the traffic flow model between these three airports. The model was tested based on the air traffic flow to and from these TMAs leaving aside all the flights going through that area that were not heading towards nor coming from these three TMAs.

It leaves us with a set of routes made by ten different aircrafts from 3h p.m. up until 9h p.m. A set of three additional aircrafts per TMA were added on the early simulations.

Taking advantage of equation (9) and of the data formerly acquired from the website mentioned above, we got, amongst other things, the charts of Fig.2, that allows us to realize the relative scale between each element.

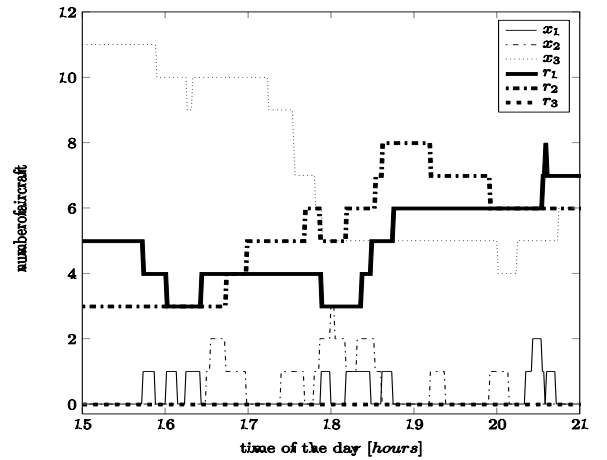


Fig. 2 Number of aircrafts in each TMA and CTR. (of Oporto, Madrid, and Balears Islands).

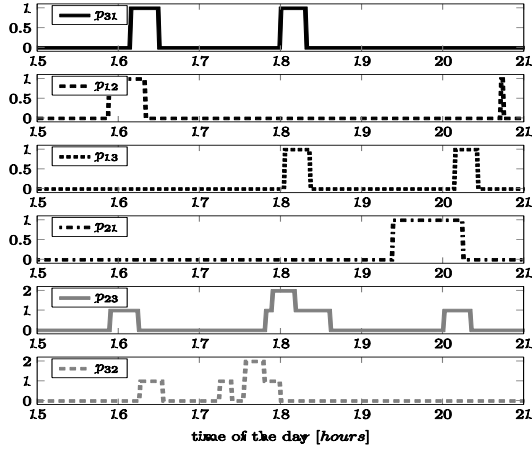


Fig. 3 number of aircraft in TMA  $T_i$  heading for TMA  $T_j$ .

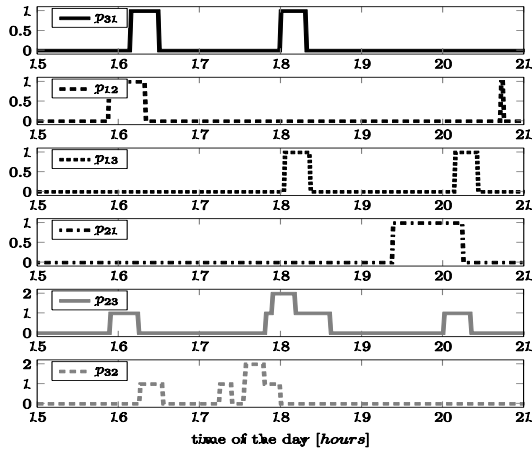


Fig. 4 Number of aircraft in each TMA (of Oporto, Madrid, and Balears Islands).

Fig.3 displays all the information related to variable  $P_{ij}(k)$ . An aircraft is either on a path (see  $P_{ij}(k)$  in Fig.3); inside a TMA (see  $x_i(k)$  in Fig. 2 and Fig.4); or already at the runway (see variable  $r_i(k)$  in Fig.2). For all the figures presented above, the vertical axis shows the number of aircraft corresponding to the described variables. Fig.4 is explained through equation (10) below:

$$N(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n P_{ij}(k) + \sum_{i=1}^n r_i(k) \quad (10)$$

As can be seen on Fig.3, this system follows a mass conservation law in its conception.  $N(k)$  maintains the same value whatever the location of an aircraft: (in a TMA, CTR, runway or path). This pattern will not be observed for the model in Fig.5 as it will be described in section 4.2 where, for commodity, the conservation law has been weakened on purpose.

Here, it has been proven that the air traffic flow model described above can identify the places where the aircrafts are, and when they are there, based on the information of the

departures. The control theory approach to this problem opens many doors and enables to see it from this new perspective, where the state vector composed of the departures across time can be acted upon, in order to regulate the state vector, which is the number of aircrafts in individual TMAs.

## Simulation Model Using Functions

The idea is to have a model where there are no sudden changes in the number of aircrafts in TMAs when counting the number of aircrafts in TMA. Hence, we resort to a predictive estimation [10, 11] of the number of aircrafts in specified TMAs. For that reason, we use the following sigmoid function:

$$S_{ijl}(t) = \left(1 + e^{-\sigma(t-\tau_{ijl}/2)}\right)^{-1} \quad (11)$$

Where  $t$  is the flight time counted from the departure, and  $\sigma$  is the scaling factor. The value of  $\tau_{ij}$  is known from the flight plan. However, it may be updated during the trip whenever the actual total flight time happens to be different from the estimated one.

Sigmoid functions are used here to help predict the number of aircrafts in individual TMAs.

Very good results were obtained experimentally with values of the scaling factor in the following bounds:

$$12/\tau_{ijl} < \sigma < 15/\tau_{ijl} \quad (12)$$

The inequality (16) may be proven mathematically by the fact that with values of the scaling factor in that interval, the value of  $S_{ijl}(t)$  is practically equal to zero for small values of  $t$ , and it is practically equal to 1 for small values of  $t$  close to the total estimated flight time  $\tau_{ij}$ .

With the use of the sigmoid function, defined above,  $\chi_i$  can be improved as follows:

$$\chi_j(k) = x_j(k) + \sum_{i=1}^n P_{ijl}(k) \sum_{l=1}^{N_a} S_{ijl}(k) \quad (13)$$

Where  $N_a$  is the number of aircrafts that are outside any TMA.

## Simulation Results Based on the Sigmoid Function

The sigmoid function was introduced in the model because there was a need to remove abrupt changes inherent to the model, in a way that an aircraft would gradually become present on the arriving TMA from the moment it lifted

off from the departing TMA, instead of just appearing on the arriving TMA and, thus, giving no anticipation opportunity to the air traffic controllers. A feature inherent to such a model is that the number of aircrafts will not be necessarily a whole number since an aircraft is counted in the unit interval  $[0, 1]$ .

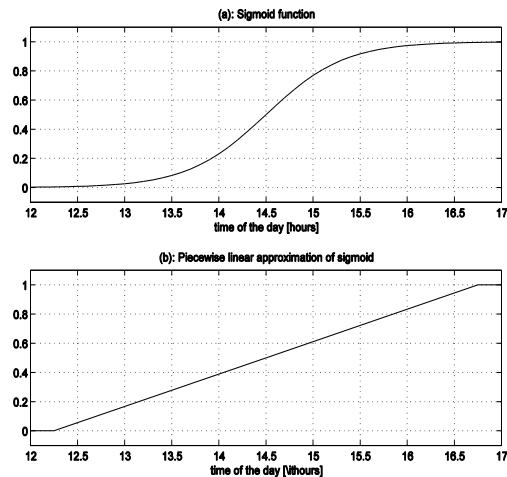


Fig. 5 Counting an individual aircraft from departure to arrival for a 5 hour-trip starting at 12h .m.; (a): logistic sigmoid function, (b): piecewise linear approximation of the sigmoid function (for practical use).

Fig.5a and Fig.5b illustrate how an individual aircraft is counted from departure to arrival for a total trip time of 5h (for instance). Fig.5a depicts the corresponding sigmoid function, and Fig.5b shows the piecewise linear approximation of the actual sigmoid function for practical use. Indeed, the counting of that aircraft for the arrival TMA is practically set to 0 up to 15 minutes after liftoff (that is from 12h to 12h15); then follows a linear part on which the counting is 0.5 at halfway (at 14h30), and finally from 16h45 at 17h (that is, in the neighborhood of the TMA), the counting of the aircraft is set practically to 1.

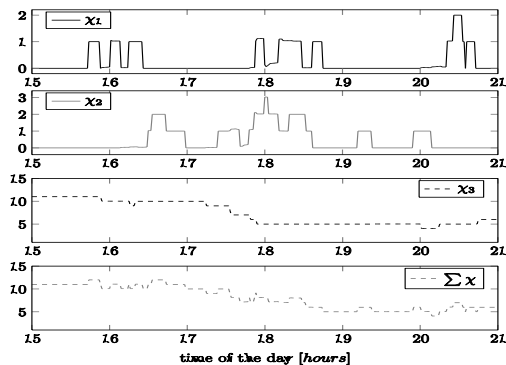


Fig. 6 Total number of aircraft in the three TMAs.

Fig.6 shows the simulation of the air traffic flow quantification in the three TMAs already mentioned In former sections. Fig.6, based on the logistic function, is more accurate than fig. 4, in which individual aircraft counts take on values in the set  $\{0,1\}$ . One may notice that the total number of aircrafts in Fig.6 varies according to whether aircraft are closer of farther from the arrival TMA, whereas it appears to be constant in Fig. 4.

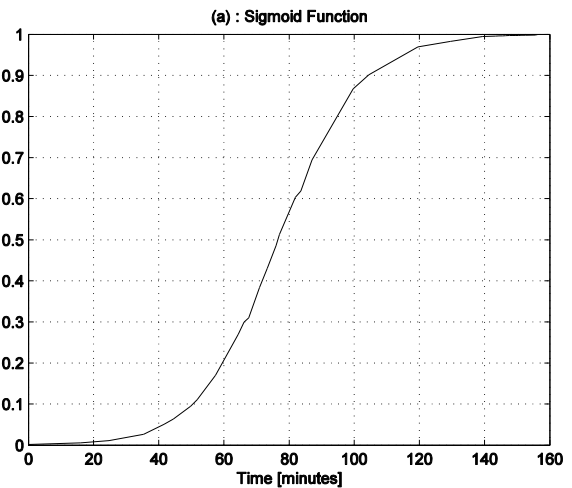
### Simulation Results Based on the Sigmoid Function to Predict the Arrival Time of an Aircraft

At the beginning of the trip of an aircraft, the only data available are those relating to the flight plan, that are based on forecasts of future events on that trip, such as the expected time of arrival.

The Sigmoid Function starts by being based on these preliminary data and subsequently updated with data from the course of the trip, achieving with these, along the trip, to improve prediction of the arrival of the aircraft.

Two figures will be presented containing the Sigmoid Function and Predicting Flight Duration of two different aircrafts. The predictive value of the flight duration will be represented by yy axis of Figs. 7 (b) and 8 (b).

This improvement in prediction can be seen in Figure 7 (a) which represents an aircrafts trip Sigmoid Function. Figure 7 (b) represents the estimated arrival time according to the actual arrival time.



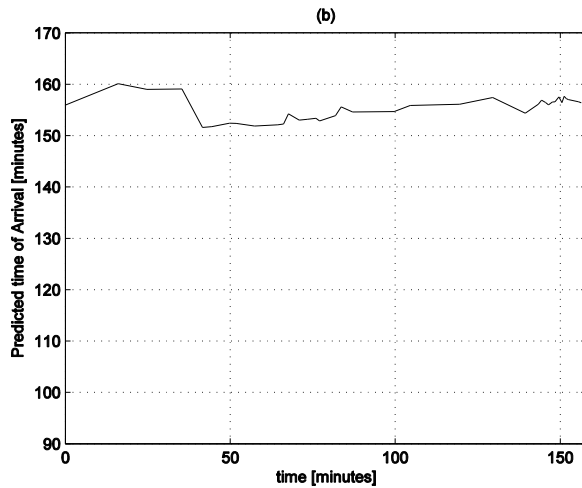


Fig. 7 Count an aircraft along a trip of 155 minutes. (a): Logistic Sigmoid Function, (b): estimated arrival time according to the actual arrival time.

From the analysis of Figure 7 (a) it appears that, up to the middle of the duration of the trip, the curve of the Sigmoid Function, has a regular appearance. From that instant until near the end of the trip, some oscillations occur in this curve.

Such events are due to the fact that the speed in the first half of the voyage is almost constant. That phenomenon does not occur during the second half, where the speed decreases gradually.

In the analysis of Figure 7 (b) we identify the existence of fluctuations, even slightly (not exceeding 10 minutes), in the arrival forecast of the aircraft to its destination.

This occurs because it is a prediction that, although being based on the initial flight plan, itself a prediction, and the already made course. This prediction still depends on the future events that may influence the duration of the rest of the trip.

Therefore, being the initial arrival forecast 112 minutes, the voyage really took 120 minutes getting to the arrival point.

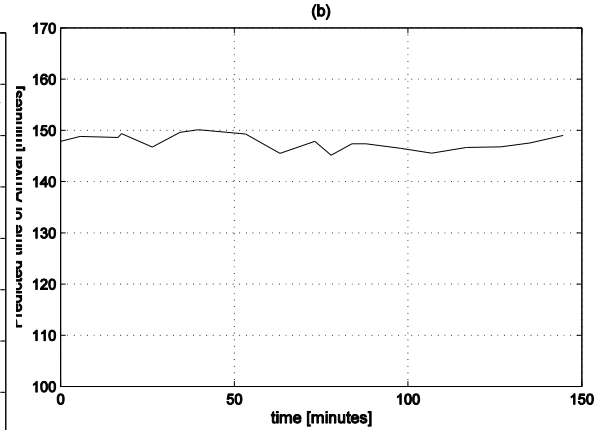
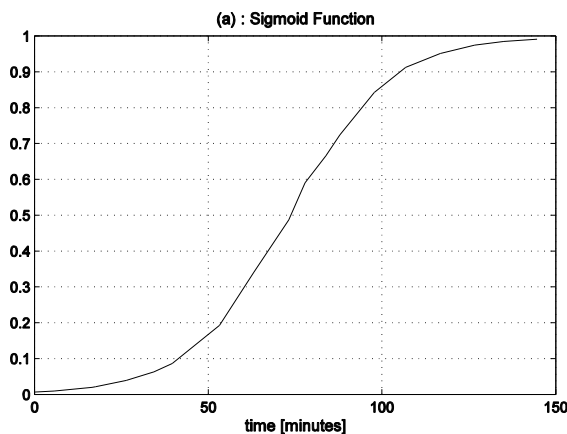


Fig. 8 Count an aircraft along a trip of 149 minutes. (a): Logistic Sigmoid Function, (b): estimated arrival time according to the actual arrival time.

The Fig. 8 (a) represents the Sigmoid Function of the trip of an aircraft during 149 minutes. The algorithm used for the simulation was the same, however the data shows is that the trip was different, hence the curve more regular.

The Fig. 8 (b) shows that the expected flight duration is within a smaller range (approximately 5 minutes) of the prediction of the first aircraft represented by the Fig. 7 (b) (approximately 19 minutes). This is the speed of the second aircraft is smoother than the first.

## Conclusion

This paper has established foundations for air traffic flow modeling based on dynamic traffic flow modeling based on dynamic networks. The main objective was to provide means to quantify the occupancy rate of Terminal Maneuvering Areas (TMAs) in terms of number of aircrafts at any given time. A first model was suggested in which only actual occurrences of aircraft in TMAs are counted. However, to account for the progressive change in the number of aircrafts in TMAs, a second model based on the sigmoid function was used to deal with the dynamics of the traffic flow in regards to the number of aircrafts in the TMAs. The simulation results of the models corroborate the efficacy of the suggested models.

Future research activities may be conducted to cope with air traffic flow estimation and forecasting in stochastic environment and TMA capacity optimization on the basis of an eventual use of the Kalman filtering approach [16] and particle swarm optimization [17]. The modelling concepts in the present research work may help stakeholders in Terminal Maneuvering Area capacity management and optimization and subsequent airport socio-economic policies.

## ACKNOWLEDGMENT

This research was conducted in the Aeronautics and Astronautics Research Group (AeroG) of the Associated Laboratory for Energy, Transports and Aeronautics (LAETA), and supported by the Portuguese Foundation for Sciences and Technology (FCT).

## REFERENCES

- [1] P.K. Menon, G.D. Sweriduk, T. Lam, D.M. Diaz, and K.D. Bilimoria, Computer-aided Eulerian Air Traffic Flow Modeling and Predictive Control, *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 29. n. 1 (2006), 12-19.
- [2] A.M. Bayen, R. L. Raffard, and C. J. Tomlin, Adjoint-based Constrained Control of Eulerian Transportation Networks: Application to Air Traffic Control. *Proceedings of the 2004 American Control Conference*, Vol. 6 (2004), 5539 – 5545.
- [3] G. Bastin and V. Guffens, Congestion Control in Compartmental Network Systems, *Systems and Control Letters*, Vol. 55. n. 8 (2006), 689 – 696.
- [4] M. Gugat, M. Herty, A. Klar, and G. Leugering, Optimal Control for Traffic Flow Networks, *Journal of Optimization Theory and Applications*, Vol. 126. n.3 (2005), 589–616.
- [5] Website: [www.localizatodo.com](http://www.localizatodo.com). (Accessed on October 20, 2010).
- [6] Website: [www.eurocontrol.int/content/sesar-and-research](http://www.eurocontrol.int/content/sesar-and-research). (Accessed on September 22, 2010).
- [7] SESAR Definition Phase – Deliverable D3. *The ATM target concept*. [www.sesar-consortium.aero](http://www.sesar-consortium.aero). (Accessed on October 20, 2010).
- [8] J.H. Lv, X.H. Yu, G.R. Chen, D.Z. Chen, Characterizing the synchronizability of small-world dynamical networks. *IEEE Transactions on Circuits and Systems Part I: Regular Papers*, Vol. 51, n. 4 (2004), 787-796.
- [9] S.H. Strogatz, Exploring complex networks. *Nature*, Vol. 410. n. 6825 (2001), 268-276.
- [10] K. Bousson, Time-varying Parameter Estimation with Application to Trajectory Tracking, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology* Vol. 79. n.4 (2007), 406-413.
- [11] K. Bousson, Model Predictive Control Approach to Global Air Collision Avoidance, *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, Vol. 80. n.6 (2008), 605-612.
- [12] S. Haykin, *Neural Networks: A Comprehensive Foundation*. (Prentice-Hall, 1998).
- [13] S. Jazebi, H. R. Baghaee, and G. B. Gharehpetian, Optimal Variable-gain Neural Network-Based UPFC Controller by Means of Differential Evolution Algorithm, *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 5. n. 3 (2010), 1069-1077.
- [14] M. R. Mosavi, and M. Saraf, Precise Modeling of GPS GDOP using Neural Network, *International Review on Modelling and Simulations*, Vol. 3. n. 4 (2010), 665-671.
- [15] A. Reza zadeh, A. Askarzadeh, M. Sedighzadeh, ANN-Based PEMFC Modeling by a New Learning Algorithm, *International Review on Modelling and Simulations*, Vol. 3. n. 2 (2010), 187-193.
- [16] M.S. Grewal, and A.P. Andrews, *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB - 3<sup>rd</sup> Edition* (Wiley-IEEE Press, 2008).
- [17] Tsao-Tsung Ma, Design of Fuzzy Based UPFC Damping Controllers Using Particle Swarm Optimization Algorithm, *International Review of Electrical Engineering*, Vol. 5. n. 3 (2010), 1087-1094.

**K. Bousson** received an MEng Degree in aeronautical engineering from the Ecole Nationale de l'Aviation Civile (ENAC) in 1988, an MSc degree in computer science (with emphasis on artificial intelligence) from Paul Sabatier University in 1989, and a PhD degree in control & computer engineering from the Institute National des Sciences Appliquées (INSA) in 1993, all in Toulouse, France.

He was a researcher at the LAAS Laboratory of the French National Council for Scientific Research (CNRS) in Toulouse, from 1993 to 1995, and has been a professor in the Department of Aerospace Sciences at the University of Beira Interior, Covilhã, Portugal, since 1995. His current research activities include trajectory optimization & guidance, optimal flight control systems, analysis and control of uncertain dynamical systems.

Dr K. Bousson is a Member of the Portuguese Association for Automatic Control (APCA) and a Senior Member of the American Institute of Aeronautics and Astronautics (AIAA).