

Análise e Regulação da Capacidade de uma Área Terminal de Voo

Adriana Isabel Freitas Oliveira

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

Orientador: Prof. Doutor Kouamana Bousson

julho de 2021

Para a minha avó.
Dedicado às mulheres da minha vida,
que me ensinam a ser uma força da natureza
todos os dias.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, gostaria de agradecer ao meu orientador, o Professor Kouamana Bousson - por toda a paciência, apoio e orientação que me mostrou ao longo deste último ano e meio, por me fazer sentir confortável com as minhas inseguranças e por todos os ensinamentos. Obrigada, professor.

Quero agradecer aos meus pais. Pela confiança, pela segurança que me transmitem e por todo o amor. Sem vocês, esta vida não seria possível. O meu eterno amor. Obrigada.

À Sofia, por viver a vida comigo.

Um agradecimento especial para os meus parceiros de laboratório e amigos, o Lias e o Carlinhos - pela amizade e parceria, por todas as conversas e toda a ajuda e disponibilidade durante todo este processo.

Por fim, quero agradecer aos meus amigos. A todos, mas em especial aos que encontrei na Covilhã, nesta terra de fantasia. Obrigada por partilharem comigo os últimos 6 anos. Por me fazerem crescer, me abraçarem quando não achei possível e me darem uma casa longe de casa. A vocês, o meu amor mais sincero e uma saudade que ficará para sempre. Um brinde a nós. E um brinde à Covilhã, que brindou a nós.

Resumo

Nos últimos anos, a procura por serviços de aviação aumentou significativamente. Tal procura veio evidenciar o estado de saturação com que está a funcionar o Sistema de Gestão do Tráfego Aéreo português e europeu. Há uma capacidade inadequada, tanto do setor de Controlo de Tráfego Aéreo, como da infraestrutura do aeroporto em si, mas há principalmente uma má gestão dos recursos disponíveis, nomeadamente do espaço aéreo. É amplamente reconhecido que, de modo a acomodar o aumento de tráfego, um nível avançado de automação é necessário.

O presente trabalho interpreta o problema de gestão como um problema de regulação de capacidade. O nosso objetivo é desenvolver um método de controlo de fluxo de tráfego aéreo, capaz de regular a capacidade ao nível das secções do espaço e evitar assim a saturação da TMA (e conseqüente saturação do aeroporto). Neste contexto, TMA - Área Terminal, diz respeito ao espaço aéreo circundante de um aeroporto, com limites verticais e horizontais bem definidos.

Estudamos um caso real. Utilizando uma abordagem Euleriana, modelamos o ambiente de tráfego aéreo entre Madrid e Lisboa. A abordagem Euleriana permite agregar espacialmente grupos de aeronaves com dinâmicas de voo idênticas, através da divisão do espaço aéreo em secções, ao invés de estudar a trajetória individual de cada aeronave presente no espaço. A solução apresentada para o problema de saturação vem sob a forma de fluxos de tráfego desejados, de saída e de entrada, das secções do espaço. Sabemos que todos os aeroportos têm uma taxa de aterragem máxima que deve ser respeitada, se queremos evitar saturação. Assim, desenvolvemos uma estratégia de controlo de fluxo com base na teoria de controlo robusto de H_∞ . A capacidade da TMA, modelada como sendo a saída controlada do nosso sistema, deverá ser igual a uma referência teórica de capacidade imposta, durante todo o período de simulação. Isto garante que, caso existam restrições de capacidade no aeroporto de destino, estas serão cumpridas.

Os resultados obtidos mostram um controlo capaz de acomodar distúrbios e eficaz a garantir que o sistema cumpre com as restrições de capacidade impostas. Um sobre-esforço inicial do controlador força a saída a ser superior à referência teórica, mas rapidamente o sistema volta à referência desejada, seguindo-a. Apesar da estabilização em circuito fechado não ter sido atingida totalmente no caso prático, o sistema tem um comportamento satisfatório e de acordo com os objetivos propostos. Mesmo num caso extremo, em que o sistema tem que seguir a referência teórica imposta, o controlo foi eficiente.

Os resultados sugerem que o método de controlo desenvolvido é eficaz na regulação do fluxo de tráfego aéreo. Neste contexto, o método proposto poderá ser uma mais valia num ambiente de gestão de fluxo - quer seja utilizado de uma forma automática, ou como auxiliar de decisão dos controladores aéreos durante as suas operações e procedimentos diários de

gestão de fluxos de tráfego. Uma aplicação direta do método desenvolvido é a sua utilização na previsão de saturação das zonas do espaço aéreo. Em 2007 foi lançado o Projeto SESAR, o qual visa tornar o espaço aéreo e a sua gestão mais flexíveis e eficientes, por meio de novas tecnologias e um nível elevado de automatização. Neste âmbito, o método desenvolvido seria uma mais valia, uma vez que está intimamente ligado a uma redução de congestionamento do espaço aéreo, através de um controlo mais intuitivo e eficaz na previsão de saturação.

Palavras-chave

Capacidade do espaço aéreo; área terminal; congestionamento; teoria de controlo; regulação; fluxo de tráfego aéreo; H_∞

Abstract

In recent years, the demand for aviation services has increased significantly. Such demand came to show the level of saturation which the portuguese and european Air Traffic Management Systems are currently operating in. There's an inadequate capacity overall, both in the Air Traffic Control sector and in the infrastructure of the airport itself, but mostly there's a poor management of the available resources, namely airspace. It is recognized that, in order to accomodate the increase in traffic, a high level of automation is required.

The present work interprets the management problem as a capacity regulation problem. Our aim is to develop an air traffic flow control method capable of regulating capacity at a sector level and thus avoid TMA overload. In this context, TMA - Terminal Manoeuvring Area, refers to the airspace surrounding an airport, with well-defined vertical and horizontal boundaries.

We studied a real case. Using an Eulerian approach, we modeled the air traffic environment between Madrid and Lisbon. The Eulerian approach allows for spatially aggregating groups of aircraft with identical flight dynamics, by dividing the airspace into sections, instead of studying the individual trajectory of each aircraft present in the airspace. The presented solution for the saturation problem comes in the form of desired traffic inflow and outflow in each individual airspace sector. We know that all airports have a maximum landing rate capacity that must be respected if we are to avoid saturation. Therefore, we developed a flow control strategy based on the H_∞ robust control theory. The TMA capacity, modeled as the controlled output of our system, should be equal to a theoretical capacity reference, during the entire simulation period. This ensures that if there are any capacity restrictions at the destination airport, they will be met.

The simulation results show a control capable of accommodating disturbances and effective in ensuring that the system complies with the imposed capacity constraints. An initial overshoot of the controller forces the output to be higher than the theoretical reference, but the system quickly returns to the desired reference, following it. Despite the closed-loop stability not being fully achieved in the practical case, the system has a satisfactory behavior and in accordance with the proposed objectives. Even in the extreme case example, where the system has to follow an imposed theoretical reference, the control was efficient.

The results suggest that the developed control method is effective in regulating air traffic flow. In this context, the proposed method could be of added value in an air traffic flow management environment, either when used automatically, or as a daily decision aid for air traffic controllers during traffic flow management operations. A direct application of the developed method is its use in predicting the saturation of airspace sectors. In 2007 the SESAR Project was launched, which aims to make airspace and its management more flexible and efficient, through new technologies and a high level of automation. In this context, the developed

method would be an asset, since it is closely linked to a reduction in airspace congestion, through a more intuitive and effective control in predicting saturation.

Keywords

Airspace capacity; Terminal Manoeuvring Area; congestion; control theory; regulation; air traffic flow; H_∞

Índice

1	Introdução	1
1.1	Panorama Atual do Setor Aeronáutico	1
1.2	Estado Atual do Sistema de Gestão do Tráfego Aéreo	2
1.3	Descrição do Problema de Gestão	5
1.4	Projeto SESAR como Pilar Tecnológico	7
1.4.1	Conceito de Operações (ConOps)	7
1.4.2	Arquitetura do Projeto SESAR	11
1.4.3	Portugal e o Projeto SESAR	13
1.5	Objetivos da Dissertação	14
1.6	Visão Geral da Dissertação	15
2	Espaços Aéreos e Fluxos de Tráfego	17
2.1	Espaço Aéreo Português	17
2.2	Espaço Aéreo Espanhol	25
2.3	Céu Único Europeu - SES (<i>Single European Sky</i>)	29
2.3.1	Blocos de Espaço Aéreo Funcionais - FAB (<i>Functional Airspace Blocks</i>)	29
2.3.2	<i>Free Route Airspace</i> - RIV de Lisboa	30
3	Modelação do Fluxo de Tráfego Aéreo	33
3.1	Modelos Eulerianos	33
3.2	Modelo das Secções Individuais	34
3.3	Restrições do Modelo	36
3.4	Estrutura da Rede de Secções	36
3.4.1	Cumprimento das Restrições pelo Modelo	37
3.4.2	Limites de Controlo	38
3.5	Modelo do Sistema	40
4	Sistemas Dinâmicos: Estabilidade e Controlabilidade	43
4.1	Conceitos sobre Sistemas Dinâmicos	43
4.2	Estabilidade e Controlabilidade	45
4.3	Análise da Estabilidade e Controlabilidade	47
4.3.1	Estabilidade	47
4.3.2	Controlabilidade	51
5	Regulação da Capacidade de Fluxo pelo Controlo H_∞	53
5.1	Introdução	53
5.2	Definição do Problema de Controlo Robusto	54
5.3	Design de um Controlador Robusto H_∞	55
5.4	Simulação do Controlador com MATLAB	60
5.5	Exemplo de Aplicação: Resultados Gráficos	62

5.5.1	Aplicação teórica: modelo de 4 secções	63
5.5.2	Aplicação prática: modelo de 9 secções entre Madrid e Lisboa	64
6	Conclusão	69
	Bibliografia	71
A	Anexos	77

Lista de Figuras

1.1	Futura arquitetura do Sistema ATM europeu [1]	12
2.1	RIV de Lisboa (à direita) e RIV de Santa Maria (à esquerda) [2]	18
2.2	TMA de Lisboa [2]	21
2.3	CTR do Porto (à esquerda) e CTR da Madeira (à direita) [2]	21
2.4	CTR de Lisboa [2]	22
2.5	Zonas do espaço aéreo de Lisboa [3]	23
2.6	ATZ de Bragança (à esquerda) e ATZ do Corvo (à direita) [2]	23
2.7	LPP2 - Pinhal do Arneiro [2]	24
2.8	Áreas restritas, perigosas, temporariamente reservadas e área perigosa de Portugal Continental - 11 de março de 2021 [3]	25
2.9	Regiões de Informação de Voo de Espanha [4]	26
2.10	Rotas e aerovias do espaço aéreo peninsular Espanhol [5]	27
2.11	Zonas do espaço aéreo de Espanha continental [6]	28
2.12	Divisão do Espaço Aéreo Europeu em 9 FAB [7]	30
2.13	Representação e classificação do espaço aéreo sobre Lisboa [8]	31
3.1	Conceito de volume de controlo no contexto de tráfego aéreo [9]	34
3.2	Exemplo de uma rede de secções do espaço aéreo	37
3.3	Estrutura do espaço aéreo entre os aeroportos A e B	41
5.1	Variação da capacidade de um sistema com 4 secções ao longo de 5 horas . . .	63
5.2	Variação da capacidade da TMA do aeroporto de Lisboa, com $\gamma = 0.1$, durante 5 horas	65
5.3	Variação da capacidade da TMA de Lisboa com controlo sem limitação	66
5.4	Caso extremo da variação da capacidade da TMA de Lisboa	67
A.1	Divisões da TMA de Madrid [10]	77

Lista de Tabelas

2.1	Limites inferior e superior da RIV de Lisboa [2]	19
2.2	Limites inferior e superior da RIV de Santa Maria [2]	19
2.3	Limites inferior e superior das cinco TMA [2]	20
2.4	Subdivisões da TMA de Lisboa [2]	20

Lista de Siglas e Acrónimos

ATM	<i>Air Traffic Management</i> - Gestão do Tráfego Aéreo
TMA	<i>Terminal Manoeuvring Area</i> - Área Terminal
ATC	<i>Air Traffic Control</i> - Controlo de Tráfego Aéreo
ATFM	<i>Air Traffic Flow Management</i> - Gestão do Fluxo de Tráfego Aéreo
ASM	<i>Airspace Management</i> - Gestão do Espaço Aéreo
TWR	<i>Aerodrome Control Tower</i> - Controlo de Torre
APP	<i>Approach Control</i> - Controlo de Aproximação Convencional
ACC	<i>Area Control Centre</i> - Centro de Controlo de Área
ANSP	<i>Air Navigation Services Provider</i> - Prestador de Serviços de Navegação Aérea
FIR/RIV	<i>Flight Information Region</i> - Região de Informação de Voo
CNS	<i>Communication, Navigation and Surveillance</i> - Comunicação, Navegação e Vigilância
ICAO	<i>International Civil Aviation Organization</i> - Organização da Aviação Civil Internacional
SESAR	<i>Single European Sky ATM Research</i>
SES	<i>Single European Sky</i> - Céu Único Europeu
ConOps	<i>Concept of Operations</i>
ANS	<i>Air Navigation Services</i> - Serviços de Navegação Aérea
BT	<i>Business Trajectory</i>
SBT	<i>Shared Business Trajectory</i>
CDM	<i>Collaborative Decision Making</i>
SWIM	<i>System Wide Information Manager</i>
NOP	<i>Network Operations Plan</i>
FUA	<i>Flexible Use of Airspace</i> - Uso Flexível de Espaço Aéreo
ASAS	<i>Airborne Separation Assistance System</i>
FAB	<i>Functional Airspace Block</i> - Bloco Funcional de Espaço Aéreo
STAM	<i>Short Term ATFM Measures</i>
PMS	<i>Point Merge System</i>
COOPANS	Cooperação entre Prestadores de Serviços de Navegação Aérea
UIR	<i>Upper Flight Information Region</i> - Região de Informação de Voo Superior
FL	<i>Flight Level</i> - Nível de Voo
IFR	<i>Instrument Flight Rules</i> - Regras de Voo por Instrumentos
VFR	<i>Visual Flight Rules</i> - Regras de Voo Visual
SFC	<i>Surface</i> - Superfície
UNL	<i>Unlimited</i> - Sem Limite
MSL	<i>Mean Sea Level</i> - Nível Médio das Águas do Mar
AGL	<i>Above Ground Level</i> - Acima do Nível do Solo
AMSL	<i>Above Mean Sea Level</i> - Acima do Nível Médio das Águas do Mar

CTR	<i>Control Zone - Zona de Controlo de Tráfego Aéreo</i>
ATZ	<i>Aerodrome Traffic Zone - Zona de Tráfego do Aeródromo</i>
AFIS	<i>Aerodrome Flight Information Service - Serviço de Informação de Voo do Aeródromo</i>
TMZ	<i>Transponder Mandatory Zone - Zona de Equipamento Transponder Obrigatório</i>
RMZ	<i>Radio Mandatory Zone - Zona de Equipamento Rádio Obrigatório</i>
SSR	<i>Secondary Surveillance RADAR - Radar de Vigilância Secundário</i>
AIP	<i>Aeronautical Information Publication - Publicação de Informação Aeronáutica</i>
ANAC	<i>Autoridade Nacional de Aviação Civil</i>
EAD	<i>Espaço Aéreo Delegado</i>
AWY	<i>Airway - Corredor de Tráfego Aéreo</i>
CTA	<i>Control Area - Área de Controlo de Tráfego</i>
FRA	<i>Free Route Airspace</i>
ARE	<i>Algebraic Riccati Equation</i>
LQR	<i>Linear-quadratic Regulator</i>
SISO	<i>Single Input Single Output</i>
SIMO	<i>Single Input Multiple Output</i>
MISO	<i>Multiple Input Single Output</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
PI	<i>Proportional Plus Integral</i>
PID	<i>Proportional Plus Integral Plus Derivative</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Panorama Atual do Setor Aeronáutico

O crescimento do setor aeronáutico é uma realidade. A aviação tornou-se uma parte integral das sociedades atuais, da qual dependemos, quer para fazer deslocações de forma rápida e confortável, quer para defender a soberania do nosso estado.

A procura por tal serviço tem vindo a aumentar nos últimos anos,

- A 28 de Junho de 2019 atingiu-se um novo recorde para o número de voos realizados na Europa – 37228 voos num só dia, superando o recorde anterior de 37101 voos atingido apenas um ano antes, a 7 de setembro de 2018; [11]
- Em Portugal, a abril de 2019, registou-se um aumento de mais 67 voos por dia, comparativamente a abril de 2018; [12]
- A NAV Portugal, E.P.E. – entidade responsável pela gestão e controlo do tráfego aéreo em Portugal – geriu mais de 2300 voos por dia em 2019, mais cerca de 60 que a média diária registada em 2018. O número de voos geridos em 2019 aumentou 2,7% perfazendo um total de 855944 voos, mais 22512 que em 2018, atingindo um novo recorde em termos de tráfego controlado. [13] [14]

Com a chegada da pandemia de Covid-19 o setor da aviação foi um dos mais afetados. [15][16] Contudo, é esperado que num futuro não muito distante o tráfego aéreo em Portugal volte a atingir números de uma realidade pré-Covid. [17] Posto isto, consideramos válidas e pertinentes todas as referências aqui feitas.

Nos últimos anos, com o crescimento do número de turistas que visitam Portugal, mais concretamente Lisboa, e com a crescente eleição deste meio de transporte para as deslocações dos cidadãos portugueses, o aeroporto de Lisboa foi conduzido a um estado de **saturação**. [18][19] A crescente procura por este serviço veio evidenciar a falta de **capacidade** do Sistema ATM (*Air Traffic Management* - Gestão do Tráfego Aéreo).

A capacidade nos aeroportos, seja da infraestrutura em si ou motivada por restrições políticas e/ou ambientais, juntamente com a capacidade do espaço aéreo terminal, ou **Área Terminal (TMA - Terminal Manoeuvring Area)**, são o principal fator limitante da capacidade geral do Sistema ATM. [20]

Em 2040 é esperado que os aeroportos não sejam capazes de acomodar aproximadamente 1.5 milhões de voos - o que é equivalente a 160 milhões de passageiros sem poderem voar. [21] O problema advém principalmente da falta de capacidade em certos locais ou em determinados períodos de tempo, o que pode ser agravado por uma falta de potencial para crescimento (por exemplo, na construção de pistas adicionais e infraestruturas terminais).

Esta potencial falta de capacidade aeroportuária afeta indiretamente outros ambientes operacionais (como, por exemplo, o setor ATC - *Air Traffic Control*, Controlo de Tráfego Aéreo - o qual está inserido no Sistema ATM), que terão por isso também que ser geridos de melhor forma. Um uso exaustivo de aeroportos saturados afetará negativamente a previsibilidade e a pontualidade, tornando as ambições de um melhor desempenho no futuro ainda mais desafiadoras.

Antes de propor qualquer tipo de abordagem numa tentativa de contribuir para a solução do problema de saturação, é necessário primeiro perceber como funciona atualmente o sistema de gestão e controlo de tráfego aéreo em Portugal, assim como em que consiste verdadeiramente o problema de falta de capacidade dos aeroportos europeus.

1.2 Estado Atual do Sistema de Gestão do Tráfego Aéreo

O Sistema ATM representa uma agregação de funções necessárias para garantir um movimento seguro e eficiente de aeronaves durante todas as fases de operações. Engloba todas as atividades e serviços prestados no âmbito de uma gestão dinâmica e integrada, tanto do tráfego aéreo como do espaço aéreo em si. Um resumo breve acerca desta gestão é apresentado a seguir, tal como em [22][23][24][25][1].

O Sistema ATM abrange três principais prestadores de serviços:

- ATC (*Air Traffic Control*, Controlo de Tráfego Aéreo) - responsável por rastrear/guiar o voo de aeronaves através do seu percurso no espaço aéreo, com o objetivo de promover um fluxo seguro, ordenado e expedito do tráfego aéreo;
- ATFM (*Air Traffic Flow Managemnet*, Gestão do Fluxo de Tráfego Aéreo) - o principal objetivo é regular o fluxo de aeronaves da maneira mais eficiente possível e evitar que haja congestionamento/saturação de certos setores de controlo;
- ASM (*Airspace Management*, Gestão do Espaço Aéreo) - como o próprio nome indica, trata da gestão do espaço aéreo, já que este é um recurso escasso, de modo a satisfazer todos os utilizadores, sejam eles civis ou militares.

A **ASM** é responsável pela forma como o espaço aéreo é atribuído aos seus vários utilizadores (por meio de rotas, zonas de voo, níveis de voo, etc.) e pelo modo como este está estruturado de modo a providenciar serviços de tráfego aéreo.

Por sua vez, processo de **ATC** é da responsabilidade de controladores de tráfego aéreo. Os controladores são responsáveis por guiar e rastrear o movimento de aeronaves individuais através do seu trajeto, garantindo que uma taxa desejada de fluxo de tráfego aéreo é alcançada.

Este processo de controlo de tráfego é feito seguindo regras e padrões definidos e aprovados pelas entidades aeronáuticas nacionais e internacionais que regulamentam a circulação do tráfego aéreo. Passa por diversos intervenientes e divide-se em três principais centros, cada um responsável por uma área bem definida:

- **Controlo de Torre** (TWR – do inglês, *tower*) - controla o tráfego nas aterragens e descolagens, assim como o tráfego das aeronaves no solo;
- **Controlo de Aproximação** (APP – do inglês, *approach*) - controla o tráfego das aeronaves em processo de subida ou descida, até ao momento que entram em fase de voo de cruzeiro, ou que deste saiam, respetivamente;
- **Centro de Controlo de Área**, ou, Centro de Controlo Regional (ACC – do inglês, *Area Control Centre*) - controla o tráfego aéreo em fase de voo cruzeiro.

Os prestadores de serviços de navegação aérea (ANSP - *Air Navigation Services Provider*) são responsáveis pelo controlo do espaço aéreo - o qual é maioritariamente baseado nas fronteiras nacionais. O espaço aéreo de cada Estado está organizado em uma ou mais Regiões de Informação de Voo - RIV (ou em inglês, FIR - *Flight Information Region*), cada uma com um centro de controlo de área (ACC) atribuído. Cada um destes centros efetua o controlo dos voos em rota na respetiva RIV. Existem dois Centros de Controlo de Área em Portugal - Lisboa e Santa Maria, nos Açores. No caso do ACC de Lisboa, este é ainda responsável pelo controlo de aproximação ao aeroporto de Lisboa. [26]

A responsabilidade dos ACC está posteriormente dividida em **setores** do espaço aéreo adjacentes e grupos de setores. Por exemplo, na região do espaço aéreo português que engloba todo o território de Portugal continental, em conjunto com o arquipélago da Madeira, existem cinco setores: o Setor Norte, Setor Centro e Setor Sul (Portugal continental); Setor Oeste (setor mar) e Setor Madeira. Cada setor está posteriormente dividido em "camadas", também elas outros setores, separadas por diferentes níveis de voo. Estes setores podem ser agrupados ou operados individualmente conforme a demanda de tráfego. Os controladores aéreos são tipicamente treinados e certificados para um conjunto limitado de setores dentro de um ACC. Cada controlador é responsável pelo controlo de apenas um setor, com a configuração mais comum sendo um planeador e um controlador executivo assumindo total responsabilidade por esse setor. Cada setor tem as suas especificidades em termos de forma, rotas disponíveis, pontos de saída e entrada para o espaço aéreo inferior, padrões de tráfego, etc. Para que um controlador possa atuar num determinado setor ele precisa não só de uma licença de controlador genérico, como também de ser treinado e certificado para entender e

lidar com as especificidades desse setor.

Cada ACC tem um sistema de processamento de dados de voo integrado que providencia informações de voo local processadas, informações de meteorologia e vigilância, e informações aeronáuticas, como suporte à posição de trabalho de controlador no planeamento de tráfego, separação de aeronaves, deteção de conflitos e criação de redes de segurança. Estes sistemas possuem tipicamente um nível baixo de automatização. O controlador humano desempenha um papel importante no planeamento e execução de tarefas de deteção e resolução de conflitos.

Cada ACC opera na sua instalação física que inclui sensores de meteorologia e CNS (*Communication, Navigation and Surveillance* - Comunicação, Navegação e Vigilância) e comunicações solo-solo para comunicar com ACC vizinhos e com o aeroporto. Contudo, esta comunicação e partilha de informação é limitada - o que faz com que qualquer interveniente operacional fora do ACC tenha uma consciência situacional limitada, referente a quaisquer mudanças ao nível da trajetória impostas pelo controlo de tráfego aéreo desse mesmo ACC.

A demanda mencionada anteriormente leva-nos ao prestador de serviços seguinte - a **ATFM**. A ATFM é a área responsável pela **regulação do tráfego aéreo**, a um nível mais elevado. Encarrega-se de garantir que há um equilíbrio entre a demanda de tráfego e a capacidade do espaço aéreo - com o objetivo de obter um uso ótimo e eficiente desse espaço. Mais concretamente, a ATFM encarrega-se de garantir que o volume de tráfego seja compatível com as máximas capacidades declaradas - de modo a nunca ser atingida a saturação.

Os dois principais objetivos da ATFM, segundo a EUROCONTROL, são: proteger o setor ATC de uma entrega excessiva ou de uma sobrecarga - ou seja, proteger os controladores aéreos de uma carga de trabalho excessiva que possa levar à saturação do setor; e otimizar a capacidade disponível.

O conceito de **capacidade** pode ser definido como número de voos que podem ser geridos de forma segura e eficiente, num setor do espaço, durante um dado período de tempo. É por esta razão que a capacidade é expressa em operações (chegadas, partidas) por unidade de tempo, frequentemente operações por hora ou **movimentos por hora**. Esta capacidade é influenciada por diversos fatores, entre eles: as condições meteorológicas (nuvens e vento), configuração da pista e estratégias operacionais de uso da mesma, rácios de chegada e partida de aeronaves, sequenciamento das respetivas partidas e chegadas (devido à necessidade de separação mínima das aeronaves) e tempos de ocupação da pista, derivados das características de desempenho das aeronaves. [27]

A unidade de ATC local tem o poder de definir a sua capacidade - isto é, quantos voos podem ser guiados de forma segura dentro de um determinado setor do espaço por um controlador. A ATC toma esta decisão baseada na quantidade de staff que tem, na sua infraestrutura e nas ferramentas que possui ao seu dispor. A capacidade do ATC reflete a habilidade do Sistema

ATM de providenciar serviço.

A demanda, por sua vez, pode ser entendida como o número de voos que pretendem voar num determinado setor, num determinado intervalo de tempo. Esta demanda é calculada com base no **plano de voo** - o qual é o resultado da preparação dos operadores/utilizadores aéreos (que no caso de voos civis comerciais são as companhias aéreas) para garantir, da melhor forma possível, o perfil de voo mais eficiente e económico para o voo em questão.

Ao nível da ATFM, todas as manhãs é definido um **plano de fluxo de tráfego** para todo o país. Este plano é o resultado do estudo prévio feito ao longo de vários dias, ou até meses, antes do dia da operação. Os planos de voo são estudados, juntamente com valores históricos de capacidade e fatores que a possam afetar - de modo a criar e estudar cenários de tráfego possíveis e, posteriormente, organizar de forma eficiente os recursos necessários, assim como medidas de regulação (caso sejam necessárias) para o dia da operação. Também é feita uma previsão da demanda. O principal objetivo deste planeamento prévio é otimizar a eficiência do sistema e equilibrar a demanda e capacidade.

A ATFM suporta a ATC no cumprimento dos seus principais objetivos, assim como numa utilização mais eficiente do espaço aéreo e da capacidade do aeroporto. Para ser eficaz, necessita de cooperação e coordenação com unidades ATC e utilizadores do espaço. Um ótimo fluxo de tráfego aéreo nem sempre é possível devido a vários constrangimentos - como por exemplo, requisitos de diferentes utilizadores que entram em conflito, limitações dos sistemas de navegação aérea e condições meteorológicas inesperadas - para nomear alguns. Tais constrangimentos podem levar a que a demanda de tráfego seja maior que a capacidade disponível. É nestes casos que medidas de regulação estudadas previamente, tais como o **controlo de fluxo de tráfego**, precisam de ser consideradas - principalmente quando o sistema de ATC já não conseguir lidar totalmente com o volume de tráfego.

1.3 Descrição do Problema de Gestão

O atual Sistema ATM tem sido levado ao seu limite de capacidade. Um dos principais fatores limitantes é o número de aeronaves que cada controlador consegue gerir de forma segura. Com a tecnologia atual, cada controlador gere uma quantidade finita de aeronaves. Além disto, há também um número limitado de controladores.

Na arquitetura atual do sistema, as operações das aeronaves estão frequentemente restrin- gidas por limites do espaço aéreo não operacionais, levando a trajetórias de voo sub-ótimas. Devido a limitações de flexibilidade nas rotas definidas e na alocação de controladores - e à fragmentação da infraestrutura ATM subjacente - o Sistema ATM como um todo possui uma pobre escalabilidade e é limitado na sua capacidade em providenciar serviços de tráfego aéreo no tempo (incluindo horários de pico) e local certos.

Isto leva a uma **oferta e demanda incompatíveis** que trazem consequências nefastas:

em 2018, 60% dos atrasos em voo foram devidos à falta de capacidade do setor ATC. [28] Na maioria dos casos, esta falta de capacidade está intimamente ligada à falta de staff, mas pode também ser motivada por procedimentos ineficientes incapazes de lidar com o crescente aumento de tráfego - como por exemplo, processos inadequados para a transferência de controlo, equipamento inadequado (falta/insuficiência dos equipamentos de vigilância ou sistemas de processamento de dados obsoletos), etc. [29] Como resultado, a disponibilidade de capacidade ATC em toda a rede tende a ser rígida, enquanto que a demanda de tráfego é variável, tanto de forma previsível quanto imprevisível. Isto resulta numa capacidade sobressalente e num excesso de carga ao mesmo tempo.

Por sua vez, as instruções de um controlador aéreo a um piloto são dadas a partir de comunicações de voz e estão limitadas à fraseologia padrão da ICAO - Organização da Aviação Civil Internacional (*International Civil Aviation Organization*). Estas limitações estão a impedir uma evolução em direção a interações mais sofisticadas entre controladores e pilotos, que reduziriam a carga de trabalho dos controladores, aumentariam a capacidade e permitiriam trajetórias de voo otimizadas do ponto de vista do utilizador do espaço. As tarefas de comunicação de voz representam entre 35% e 50% da carga de trabalho geral de um controlador aéreo. A congestão nas frequências de cada setor é uma restrição já conhecida - de tal modo que o processo de comunicações de voz intensivas leva a uma saturação elevada de frequências de rádio e é um fator limitante na determinação de capacidade dos setores.

O que nos leva ao ponto seguinte - nos sistemas atuais, o suporte de automatização para os controladores é limitado. A disponibilidade de informação que potencialmente poderia influenciar a trajetória de um voo é igualmente limitada. Vigilância de tráfego, deteção de conflitos e resolução dos mesmos, são tudo processos que são feitos "de cabeça" pelo controlador, através da criação de uma imagem ilustrativa da intenção dos voos. Controladores humanos diferentes, criam imagens diferentes face à experiência e habilidades que possuem. Algum apoio automático existe e está disponível para um controlador poder avaliar as intenções detalhadas de um voo e para avaliar o impacto de instruções de ATC antes de emitilas para o piloto. Uma instrução de ATC deve resolver um conflito sem criar outro. Contudo, estas limitações na automatização implicam que um esforço humano significativo ainda é necessário para gerir o tráfego.

Adicionalmente, muitos fatores que influenciam a trajetória de um voo não são conhecidos antes da descolagem - isto limita a previsibilidade das trajetórias e por isso tem um impacto negativo na capacidade do ATC. Por sua vez, esta incerteza leva também ela a perfis de voo não ideais e a uma resolução de conflitos defeituosa na rede ATM, a qual é pré-taticamente otimizada sem saber como a trajetória será realmente influenciada durante o voo.

Por fim, as infraestruturas nacionais possuem ainda baixos níveis de interoperabilidade - a troca de dados/informação é limitada e por isso há pouco planeamento cooperativo na maneira como os ativos das diferentes partes são geridos. Muitos dados e informação são captados, mas não são utilizados de forma coerente, nem partilhados, de forma a gerir o

sistema em modo de circuito fechado. Com o sistema atual, a possibilidade de reduzir esta falta de partilha de informações é limitada.

Neste âmbito, iniciativas de R&D como o **Projeto SESAR** estão atualmente a ser implementadas, de modo a desenvolver ferramentas e procedimentos novos que levarão a uma melhor gestão dos recursos disponíveis e a um Sistema ATM mais competente e eficiente no geral.

1.4 Projeto SESAR como Pilar Tecnológico

Em 2004, o Projeto SESAR foi criado pela União Europeia em parceria com a EUROCONTROL - organização responsável pela gestão do tráfego aéreo europeu - no âmbito do SES - *Single European Sky*, Céu Único Europeu.

Em "*The ATM Target Concept*" [30], lançado em 2007 pelo Consórcio do Projeto SESAR, um plano para um novo sistema ATM é estabelecido. O Projeto SESAR coordena e concentra os vários esforços e iniciativas de pesquisa e desenvolvimento na área de gestão do tráfego aéreo da União Europeia - une cerca de 3000 especialistas e conta com 19 membros da comunidade da aviação, tendo a participação da 100 empresas, entre subsidiárias e subcontratadas. A NAV Portugal faz parte do Consórcio do Projeto SESAR. [31][32]

O objetivo do SESAR é criar um **sistema verdadeiramente uniforme** de controlo de voos sobre a Europa, orientado para uma prestação de serviço mais eficiente e resiliente, independente de fronteiras terrestres - fazendo uso de novas tecnologias que permitam a prestação de serviços independentemente da localização do prestador.

Para tal, foi definido um conceito de operações que será discutido no seguimento deste trabalho.

1.4.1 Conceito de Operações (ConOps)

A visão do SESAR para a rede ATM da Europa tem dois princípios chave: **mínimo de restrições e máxima flexibilidade**. Esta visão recai na noção de **operações baseadas em trajetórias** - garantindo que cada voo é executado da forma mais fiel possível à intenção original do seu dono (ao invés de se basearem no espaço aéreo em si e nas suas restrições) e depende do fornecimento de Serviços de Navegação Aérea (ANS - *Air Navigation Services*) como suporte da trajetória em causa.

O ConOps foi construído seguindo uma **abordagem baseada no desempenho e orientada para o serviço**. Significa que os acionistas¹ acreditam que as necessidades dos utilizadores do espaço aéreo, sejam eles civis ou militares, necessitam de ser melhor acomodadas - para isso, cada voo deverá ser executado de forma o mais fiel possível à intenção

¹Inclui Aviação Civil (tanto comercial como *General Aviation*), Aviação Militar, ANSP, Aeroportos, indústrias de abastecimento e parceiros sociais.

original do seu dono. Este é identificado como sendo o princípio motivador do conceito alvo do SESAR para o novo sistema ATM.

Nesse sentido, o conceito de operações do SESAR está centrado na nova ***Business Trajectory (BT)***. Toda e qualquer operação de voo tem um propósito específico, seja um objetivo de negócio ou missão - o qual é expresso sob a forma de uma *Business* (no caso de negócio, ou *mission* - missão, no caso dos voos militares) *Trajectory* (trajetória). Ambas expressam o objetivo do utilizador do espaço (e detentor da trajetória) para o voo em questão. O novo Sistema ATM será centrado à volta da característica da *Business Trajectory* representar a intenção original do utilizador do espaço em relação a um determinado voo. Isto significa que as aeronaves podem voar segundo as suas trajetórias preferidas, sem serem limitadas por configurações do espaço aéreo. [33]

O ciclo de vida da *Business Trajectory* começa com o desenvolvimento do plano de voo pelo utilizador do espaço e termina com atividades pós-voo, após a aeronave ter chegado ao seu destino final. A intenção do futuro Sistema ATM é permitir que isto aconteça com o mínimo de restrições - impõe uma mudança de uma trajetória parcial, produzida e utilizada de forma independente, para uma trajetória partilhada - a SBT (*Shared Business Trajectory*), onde esta será gerida e partilhada, tanto na fase de planeamento, como na fase de execução. Além disto, as trajetórias serão expressas em 4 dimensões (4D) e voadas com elevada precisão.

Por sua vez, as mudanças nas trajetórias serão mínimas. Estas só deverão acontecer no caso de necessidade de separação de aeronaves e/ou por questões de segurança, ou no caso dos objetivos do utilizador do espaço serem melhor atendidos com a manutenção da capacidade e taxa de transferência de aeronaves atuais - ao invés da otimização de voos individuais. No caso de perturbações inesperadas, os objetivos da rede ATM global terão precedência sobre a otimização de uma trajetória de voo individual.

No caso de mudanças efetivamente serem necessárias, estas serão levadas a cabo através do mecanismo **CDM - Collaborative Decision Making**, sem interferir com a tomada de decisão tática dos pilotos e controladores (a qual deverá ser feita a curto prazo). Através de CDM, a toma de decisão é apoiada por processos melhorados, com base na consciência situacional comum. Isto melhora a qualidade geral das decisões, permitindo assim alcançar com maior precisão os resultados desejados.

Isto leva-nos ao ponto seguinte - a **partilha de informação**. A partilha de informações com a qualidade e pontualidade exigidas, num ambiente seguro, é uma das chaves deste conceito alvo de ATM proposto pelo Projeto SESAR. O alcance deste conceito estende-se a toda a informação de potencial interesse para a rede ATM, incluindo trajetórias, dados de vigilância, informação aeronáutica de todo o tipo, dados de meteorologia, etc. Em particular, todos os parceiros da rede ATM irão partilhar informação acerca de trajetórias em tempo real, na medida necessária, desde a fase de desenvolvimento da trajetória até às atividades pós-voo. Planeamento de ATM, processos de CDM e operações táticas serão sempre baseados

nos dados de trajetória mais recentes e mais precisos.

Sustentando esta partilha, assim como todo o Sistema ATM, e essencial para a sua operação eficiente, estará o **SWIM - System Wide Information Manager**. Este sistema irá apoiar os processos de CDM, explorando o poder da informação partilhada, com recurso a aplicações a serem usadas pelo utilizador final. Uma operação centrada na rede (*network*) é proposta - a rede ATM é considerada como um conjunto de nós, incluindo a aeronave, providenciando ou consumindo informação. Os operadores de aeronaves com instalações de centro de controlo operacional irão partilhar informação através das suas aplicações, enquanto o utilizador individual terá a capacidade de fazer o mesmo através de aplicações disponíveis em qualquer dispositivo pessoal adequado. O suporte fornecido pela rede ATM será, em todos os casos, adaptado às necessidades do utilizador em questão. A partilha de informação permite uma maior fluidez de todos os serviços prestados, culminando numa maior capacidade e eficiência geral do Sistema ATM.

O design do espaço aéreo é um fator importante na garantia de que o Sistema ATM é capaz de providenciar os serviços certos, no momento e local certos. A abordagem de operações baseadas em trajetórias proposta pelo SESAR implica necessariamente uma nova abordagem ao design do espaço e à sua gestão - de modo a evitar, sempre que possível, que o espaço aéreo se torne um constrangimento para as trajetórias. Assim sendo, surge a nova **Gestão de Trajetórias**. O foco desta gestão, segundo o conceito alvo do SESAR, estende-se para incluir os aeroportos de modo a chamar a atenção para o problema de capacidade aeroportuária. Isto requer um espectro alargado de medidas - desde desenvolvimento de infraestruturas a longo prazo, até um agendamento realista, equilíbrio entre capacidade e demanda, gestão de filas e melhorias ao nível da taxa de transferência de aeronaves na pista. Operações integradas nos aeroportos irão permitir que haja um aumento de capacidade - com melhores processos de planeamento de recursos do aeroporto irá haver uma maior coordenação entre os acionistas, o que irá possibilitar um melhor uso da capacidade existente. Contudo, é expectável pelo SESAR que, mesmo com todas estas medidas postas em prática no âmbito do projeto, a maior parte do aumento necessário de capacidade aeroportuária surja de um maior uso de aeroportos secundários.

Adicionalmente, e ainda no âmbito do design do espaço aéreo, apenas duas categorias do espaço serão definidas e organizadas: **espaço aéreo controlado e não controlado**, numa tentativa de simplificação e de-fragmentação - tanto do espaço, como dos órgãos de controlo de voo inseridos no Sistema ATM. A divisão do espaço aéreo em várias zonas distintas, sujeitas a diferentes legislações, leva a uma complexidade acrescida que dificulta a harmonização de todos os processos envolvidos na gestão do tráfego aéreo.

Numa tentativa de equilibrar a capacidade e a demanda haverá um **planeamento colaborativo em camadas**, ao nível local, sub-regional e europeu, levando em conta restrições e outros eventos. Uma eficiente gestão de padrões de espera, ou filas, irá permitir um acesso otimizado a recursos constrangidos, maioritariamente aeroportos. Os resultados destes pro-

cessos melhorados serão permanentemente refletidos no *Network Operations Plan* - NOP, o qual será continuamente atualizado. O objetivo do NOP é facilitar os processos necessários para se chegar a um acordo no que diz respeito ao equilíbrio entre a demanda e capacidade. Funciona com um conjunto de aplicações colaborativas que providenciam acesso à demanda de tráfego, capacidade de espaço aéreo e aeroporto, e restrições e cenários que permitam ser mais fácil lidar com/gerir diversos eventos.

A **integração das necessidades da Aviação Militar** (operadores e prestadores de serviços), em conjunto com os acionistas civis, irá garantir a eficiência geral do Sistema ATM, uma vez que a cooperação e entendimento entre ambas as partes é fundamental para um sistema fluido. Estas necessidades militares passam pelo acesso ao espaço aéreo e a flexível utilização do mesmo², incluindo provisão de volume de espaço suficiente para suprir os requisitos operacionais e de treino - as quais serão abarcadas pelo Projeto SESAR.

A carga de trabalho por voo de um controlador aéreo é um fator fulcral na capacidade geral do Sistema ATM. O SESAR pretende conseguir aumentar esta capacidade através da diminuição de tarefas de rotina e necessidade de intervenções táticas por parte dos controladores. Para tal, **novos modos de separação** de aeronaves serão gradualmente implementados, suportados por ferramentas de controlo. Estes irão utilizar o controlo de trajetórias, assim como sistemas de separação da aeronave, para minimizar potenciais conflitos e assim diminuir a necessidade de intervenção por parte do controlador. Além disto, linhas de ação propostas pelo SESAR sugerem a **automatização** como o principal aliado - tanto no auxílio das tarefas de rotina dos controladores - as quais serão apoiadas por melhores métodos de introdução de dados e gestão dos mesmos - como na deteção e resolução de conflitos e monitoramento de situações.

Os **humanos**, devidamente autorizados, competentes e com habilidades adequadas, irão constituir o **núcleo das operações do futuro Sistema ATM europeu**. Contudo, é amplamente reconhecido que, de modo a acomodar o expectável aumento de tráfego, um nível avançado de automatização será necessário como suporte à atividade humana. Assim, a natureza do papel humano e das suas tarefas no sistema irá naturalmente mudar.

Por fim, o conceito alvo de ATM do Projeto SESAR reconhece as diferentes naturezas dos utilizadores europeus, do seu espaço aéreo e aeroportos. O conceito oferece diferentes soluções para áreas com densidade de tráfego mais elevada - onde, por exemplo, a implementação de estruturas de rota irá permitir alcançar a capacidade necessária global às custas de algumas restrições nas trajetórias ótimas individuais - e para áreas de densidade de tráfego médio/baixo, onde as trajetórias serão ótimas, permitindo operações mais eficientes em todos os sentidos.

²O conceito de FUA (*Flexible Use of Airspace* - Espaço Aéreo Flexível), implementado em 1996, também visa aumentar a coexistência eficiente entre tráfego aéreo civil e militar. Este dita que áreas restritas militares poderão ser utilizadas por tráfego civil, consoante necessidade.

A arquitetura do Projeto SESAR, com vista a servir o conceito de operações desenvolvido nesta secção, será apresentada a seguir.

1.4.2 Arquitetura do Projeto SESAR

A arquitetura do Sistema ATM foi definida de modo a apoiar o ConOps - permitindo às aeronaves a flexibilidade e adaptabilidade necessárias para se ajustarem aos fluxos de tráfego em mudança, requisitos de desempenho e condições locais distintas - enquanto capitaliza com os desenvolvimentos atuais.

As quatro principais mudanças propostas pelo SESAR, que impactam a arquitetura do sistema europeu de ATM a longo prazo, podem ser resumidas da seguinte forma:

- **SWIM:** o ConOps, apresentado anteriormente, requer uma partilha de informação sob medida, ao invés de mensagens passadas ponto a ponto, em particular para servir os processos de CDM;
- **Business Trajectory:** impõe a mudança de trajetórias parciais - produzidas e utilizadas de forma independente - para uma trajetória partilhada, incluindo a parte da superfície da trajetória. Além do mais, a trajetória deverá ser gerida e partilhada tanto durante a fase de planeamento, como na fase de execução;
- **Gestão de Rede - Network Management:** a interação necessária entre os níveis regional, sub-regional e local, implica que as funcionalidades da Gestão de Rede sejam parte dos sistemas dos acionistas e poderão necessitar de serviços sob medida, de acordo com papéis específicos;
- **ASAS - Airborne Separation Assistance System:** isto tem que ver com os novos modos de separação. O conceito de ATM a ser desenvolvido pede um número de aplicações de ASAS, as quais conferem mais capacidades de ATM ao "lado" aéreo. A aeronave deixa de estar apenas preocupada com a gestão da sua própria trajetória mas, além disso, deverá considerar trajetórias de outras aeronaves. No "lado" terrestre, o impacto está simplesmente ligado às interfaces e gestão de manobras ASAS.

A tecnologia do SWIM é um pilar do futuro Sistema ATM. O ambiente do SWIM irá mudar o paradigma da arquitetura da ATM - de uma troca de mensagens para a publicação/uso/contribuição de informação, onde a definição de dados e serviços associados serão cruciais. A tecnologia do SWIM é suportada por uma série de elementos arquitetónicos (arquitetura do SWIM) que permitem a troca da informação e serviços ATM através de todo sistema ATM europeu. O SWIM é baseado na interconexão de vários sistemas automáticos.

A figura 1.1 ilustra de forma clara e sucinta a visão do SESAR para o futuro da arquitetura do Sistema ATM europeu.

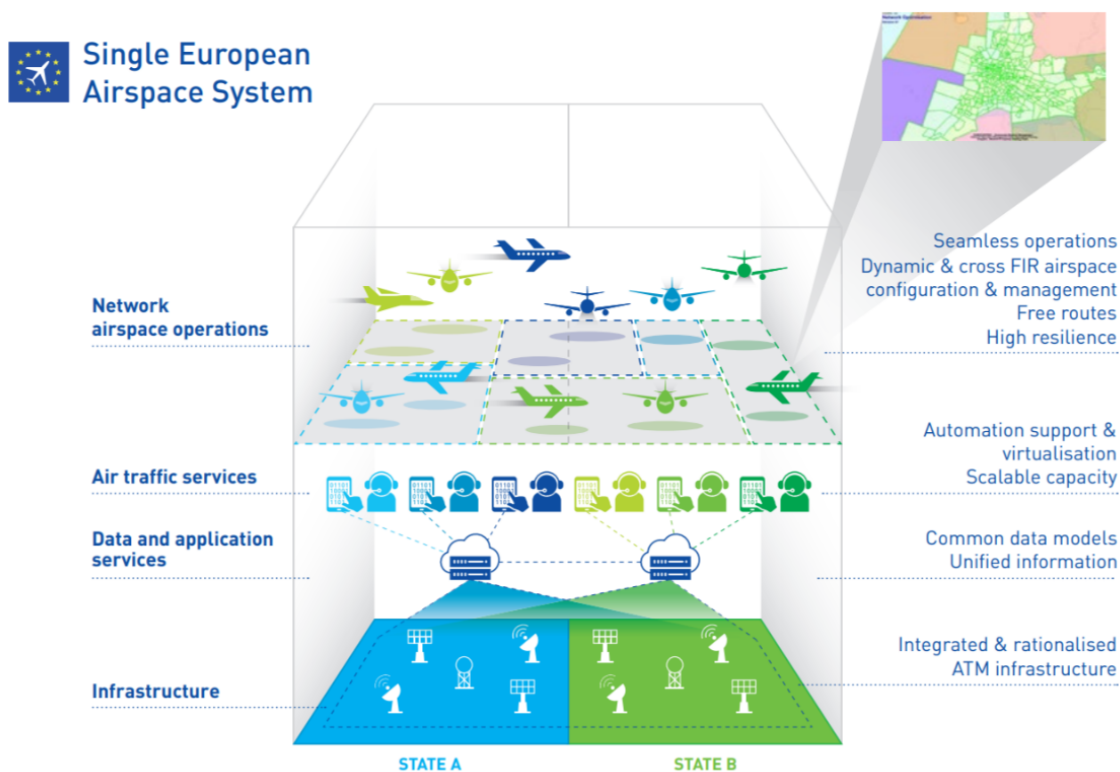


Figura 1.1: Futura arquitetura do Sistema ATM europeu [1]

Na visão proposta [1], a organização do espaço aéreo em conjunto com inovações tecnológicas e operacionais permitirá que as aeronaves voem num ambiente de rota livre, otimizando assim as suas trajetórias independentemente de RIV ou fronteiras nacionais.

Os Estados serão responsáveis pelo controlo dos voos no seu território - contudo, será possível que controladores de um determinado ACC sejam atribuídos a setores de outro ACC, permitindo uma maior flexibilidade. Em todos os Estados, operações nos setores de elevada capacidade serão harmonizadas com base em práticas compartilhadas e altamente interoperáveis. Setores e grupos de setores serão reconfigurados tendo como base e suporte máximo os fluxos de tráfego existentes, otimizando assim a taxa de transferência de aeronaves independentemente de fronteiras nacionais, e garantindo uma conectividade entre o espaço aéreo em rota, áreas terminais e os seus correspondentes aeroportos. O espaço aéreo será gerido de um modo flexível e contínuo, garantindo uma coordenação civil/militar, minimizando o impacto das atividades militares na rede ao mesmo tempo que atende plenamente às necessidades dos utilizadores militares.

Um aumento progressivo da automatização, assim como um maior uso da comunicação de dados para a emissão de instruções de tempo e segurança, fará com que a intervenção manual seja reduzida - permitindo aos controladores gerir mais tráfego em qualquer instante. Isto inclui um apoio aos controladores para lidar com especificidades dos setores, permitindo-lhes controlar tráfego aéreo num número substancialmente maior de setores. Os controladores serão progressivamente treinados e certificados ao nível do sistema, com uma necessidade

cada vez menor de treino ao nível do espaço aéreo e dos seus setores. Consequentemente, a cooperação entre diferentes RIV, ou ANSP, ou Estados, trará uma capacidade adicional onde e quando for necessário, para garantir uma resiliência e escalabilidade adicionais às operações de ATM.

Os ACC estarão conectados através de uma "camada" de serviço de dados ATM virtual comum. Cada Estado poderá ainda providenciar o seu serviço de dados de ATM, através do ANSP, mas os serviços de dados de outros provedores também poderão ser perfeitamente utilizados. Os serviços de dados de ATM irão integrar informações de voo, tempo, vigilância e informação aeronáutica de vários Estados, permitindo então que o serviço de dados de ATM operacional num Estado possa perfeitamente servir de *backup* para outro Estado. A "camada" física será racionalizada sempre que possível, sem perder a cobertura de nenhuma área. Será operada separadamente dos ACC e servirá todos os provedores de serviços de dados ATM.

Devido à maior flexibilidade das rotas, atribuição de controladores e escolha do prestador de serviços de ATM, o Sistema ATM no geral será mais resiliente e escalável. Perturbações ao nível do sistema terão um impacto limitado sobre utilizadores do espaço e a capacidade será mais facilmente adaptada à demanda dos utilizadores.

Em tom de resumo, a arquitetura futura do Sistema ATM europeu será distribuída, ao invés de ser uma agregação de sistemas locais como ainda é hoje. Sistemas aéreos e de solo terão que ser considerados como um só sistema integrado. Mais automatização será necessária de modo a acomodar, tanto o aumento de tráfego esperado, como requisitos futuros de *safety* e ambientais.

1.4.3 Portugal e o Projeto SESAR

Portugal, como país acionista do Projeto SESAR, tem contribuído com inúmeras iniciativas que visam modernizar o seu próprio sistema ATM, assim como reconfigurar seu espaço aéreo. Desde medidas como a criação do *South West FAB*, com Espanha (o qual será falado no capítulo seguinte), à melhoria de procedimentos de ATFM, como o STAM (*Short Term ATFM Measures*) - abordagem para aliviar as cargas de trabalho em cada setor de controlo através da redução de picos de tráfego, por meio da aplicação de variadas medidas, ao nível do ATFM - são muitas e inúmeras as iniciativas levadas a cabo por Portugal. Em particular, o objetivo do STAM é que a carga de trabalho de pico do setor ATC seja ajustada dinamicamente, conforme necessidade - ou seja, que seja redistribuída por setores que estejam mais aptos para acomodar esse tráfego adicional com segurança. Isto permitirá um trabalho mais fluido e consequentemente uma capacidade acrescida.

Além da RIV de Lisboa ter sido pioneira na implementação do *Free Route Airspace* (o qual será igualmente apresentado no capítulo seguinte), a cedência prevista do espaço aéreo de Sintra e a cedência parcial do espaço aéreo de Monte Real (ambos espaços militares), per-

mitirá uma reorganização do espaço aéreo da área terminal de Lisboa. Isto possibilitará o gradual aumento da capacidade do aeroporto de Lisboa desde os atuais 44 movimentos/hora até aos desejados 72 movimentos/hora. Esta reorganização espacial permitirá não só um aumento considerável da capacidade, como também uma estrutura de espaço mais eficiente - que consequentemente possibilitará uma melhor gestão do tráfego aéreo. A cedência do espaço de Sintra tem como objetivo a viabilização do *Point Merge System* - "um novo sistema de encaminhamento de tráfego que irá substituir as esperas em círculo por esperas lineares associadas à extensão da rota a percorrer. O PMS vai permitir reestruturar o espaço aéreo e reduzir atrasos através de uma gestão de tráfego de maior antecedência e precisão." [34]

Em 2018, a NAV integrou o grupo da Aliança COOPANS. COOPANS (Cooperação entre prestadores de serviço de navegação aérea) é uma parceria internacional entre os prestadores de serviço de navegação aérea da Áustria (*Austro Control*), Croácia (*Croatia Control*), Dinamarca (*Naviair*), Irlanda (*Irish Aviation Authority*) e Suécia (*LFV*), com o intuito de operar e desenvolver um sistema comum de gestão do tráfego aéreo. Esta iniciativa tem como pressuposto estratégico proporcionar à NAV Portugal um "melhor posicionamento para fazer face aos desafios tecnológicos e de procedimentos colocados aos Prestadores de Serviços de Navegação Aérea pelas diretivas, requisitos e definições do Céu Único Europeu, bem como para fazer face ao forte e imprevisível aumento do tráfego registado ao longo dos últimos anos na Região de Informação de Voo de Lisboa", segundo afirmou o então presidente da NAV, Jorge Ponce de Leão. [35]

1.5 Objetivos da Dissertação

Nesta dissertação interpretamos o problema de gestão do tráfego aéreo como um problema de **regulação de capacidade**, ao abrigo das ferramentas de teoria de controlo. Presumimos que os aeroportos têm todos uma capacidade de taxa de aterragem máxima, entendida como a capacidade da sua área terminal, que não deve ser excedida - se queremos evitar saturação.

Neste contexto, um método para regular os fluxos de tráfego ao nível das secções do espaço aéreo é apresentado. Adotamos uma solução para o problema de saturação sob a forma de fluxos de tráfego desejados, de entrada e de saída, de cada setor/secção do espaço aéreo. Modelamos o ambiente de fluxo de tráfego aéreo no espaço compreendido entre Madrid e Lisboa, seguindo uma abordagem Euleriana - a qual nos permite agregar espacialmente grupos de aeronaves com dinâmicas idênticas, através da divisão do espaço em secções. A saída (*output*) do nosso sistema dinâmico representa o número de aeronaves na área terminal do aeroporto de Lisboa - escalar representativo do valor da taxa de aterragem do aeroporto - a qual nós pretendemos regular. O nosso objetivo de controlo é que a capacidade da área terminal, representada por movimentos/hora, corresponda a um valor de referência imposto ao longo do tempo, sem o ultrapassar, em circuito fechado.

O método de controlo proposto neste trabalho poderia ser utilizado de forma automática, ou

como auxílio dos controladores aéreos responsáveis pelo serviço de ATFM - no âmbito das suas atividades de planeamento e gestão de fluxos de tráfego - e posteriormente utilizado como diretiva para os controladores aéreos responsáveis pelo ATC.

Uma aplicação direta do método proposto é a previsão de saturação das secções do espaço aéreo - com o objetivo de evitar o seu congestionamento e possíveis estrangimentos de capacidade ao nível dos aeroportos. Os conceitos estudados e desenvolvidos neste trabalho poderiam ser uma mais valia ao nível do Projeto SESAR - nomeadamente no que diz respeito à deteção de conflitos e no monitoramento de situações, tais como o congestionamento de áreas específicas do espaço aéreo. Esta autonomia do sistema automático reduziria a carga de trabalho do controlador humano - o que se traduziria num aumento da capacidade do setor ATC e conseqüente aumento de capacidade e eficiência geral do Sistema ATM.

1.6 Visão Geral da Dissertação

No capítulo 2 apresentamos o espaço aéreo português e espanhol - como este está dividido, os seus limites e as restrições de voo aplicadas às diferentes zonas, com especial atenção à área terminal de Lisboa. Neste capítulo é também apresentado o futuro Céu Único Europeu, assim como algumas iniciativas levadas a cabo em Portugal que vão ao encontro da realidade do mesmo.

O modelo Euleriano do ambiente de fluxo de tráfego aéreo a ser estudado e utilizado por nós ao longo desta dissertação é definido no capítulo 3. Este modelo é baseado no apresentado em [36] e [9].

No capítulo 4 são apresentados conceitos acerca de sistemas dinâmicos, com especial ênfase na estabilidade e controlabilidade de sistemas. O modelo desenvolvido no capítulo 3 é alvo de análise de estabilidade e controlabilidade e resultados numéricos são apresentados.

No capítulo 5 apresentamos o nosso problema de gestão sob a ótica de um problema de controlo, utilizando para isso as ferramentas de teoria de controlo de H_∞ . Um controlador robusto é projetado e simulado. Exemplos de aplicação e resultados gráficos são apresentados no final do capítulo.

Por fim, no capítulo 6, é feita uma apreciação geral do trabalho desenvolvido, com ênfase nos resultados gráficos obtidos. Recomendações para possíveis trabalhos futuros são feitas.

Capítulo 2

Espaços Aéreos e Fluxos de Tráfego

O espaço aéreo é um recurso valioso e escasso. A forma como este recurso é gerido tem uma enorme influência na capacidade do Sistema ATM.

De modo a fazer-se uma análise/otimização da gestão do fluxo de tráfego aéreo de qualquer tipo, é necessário primeiro ter em conta a divisão do espaço - as suas diferentes zonas, limites e a quem é atribuída a responsabilização de controlo - pois só assim é possível fazer uma avaliação correta da sua capacidade. O principal objetivo da atual divisão do espaço aéreo é a responsabilização, em zonas específicas do espaço, da gestão e monitorização de voo - de modo a permitir que estas sejam o mais eficiente possível.

Nos próximos sub-capítulos iremos ver como está dividido o espaço aéreo em território português, de acordo com [2] e, de um modo mais geral, em território espanhol.

2.1 Espaço Aéreo Português

Em Portugal, o espaço aéreo é primordialmente dividido em duas grandes áreas bem definidas, as **Regiões de Informação de Voo (RIV)** ou FIR (*Flight Information Region*), em inglês. Existem duas – a RIV de Lisboa (LPPC) e a RIV de Santa Maria, nos Açores. Ambas representam espaços de dimensões bem definidas onde são prestados serviços de informação de voo e de alerta, com o objetivo de fornecer informações úteis e recomendações, de modo a que os voos que atrevessem o espaço aéreo sob jurisdição de Portugal sejam conduzidos de forma segura e ordenada. O espaço aéreo nas RIV é controlado a partir do respetivo ACC. Estas zonas encontram-se representadas na figura 2.1.

As RIV portuguesas estão posteriormente divididas em **espaço aéreo controlado e espaço aéreo não controlado**. Neste contexto, interessa-nos definir o que é um espaço aéreo controlado – espaço de dimensões finitas no qual todos os voos dispõem de **serviços de controlo de tráfego aéreo**. Tais serviços são providenciados pela NAV Portugal, E.P.E.. Aeronaves a voar num espaço aéreo não controlado não estão sujeitas a serviços de controlo de tráfego aéreo, no entanto, podem estabelecer contacto quando necessário (pedir informações de voo, informações meteorológicas, pedidos de socorro, etc.). Aqui, cabe ao operador aéreo ceder passagem quando necessário de modo a evitar acidentes e incidentes.

Em alguns casos, como é o caso de Portugal e Espanha, as RIV são separadas verticalmente em secções superiores e inferiores (em inglês, *upper* e *lower*, respetivamente). A secção

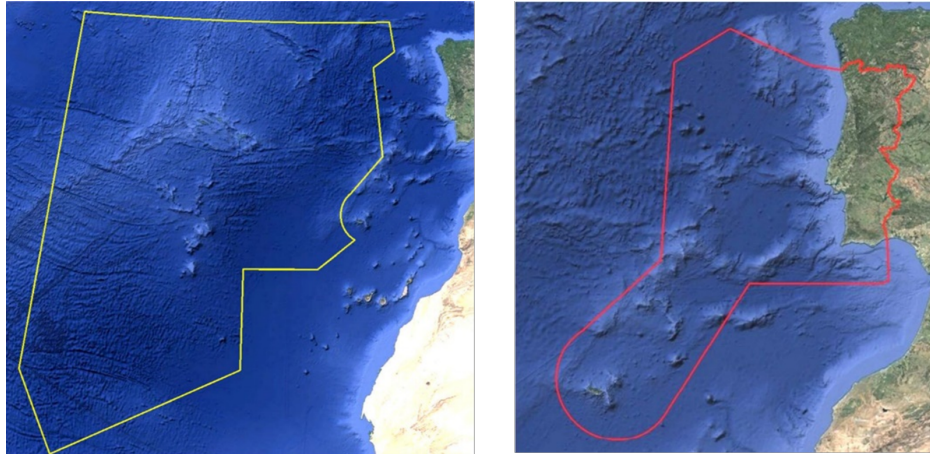


Figura 2.1: RIV de Lisboa (à direita) e RIV de Santa Maria (à esquerda) [2]

inferior continua a ser chamada de RIV/FIR, mas a secção superior é denominada de *Upper Flight Information Region* - UIR, Região de Informação de Voo Superior. [37] Em Portugal, o nível de voo (FL - *Flight Level*) que separa estas duas secções é o FL195. [8]

Em termos de navegação aérea, o espaço aéreo pode ser classificado de “A” a “G” – 7 classes. Em Portugal, o espaço aéreo está dividido nas classes A, C, D e G. Algumas notas breves acerca das mesmas:

- A classe G corresponde a espaços aéreos não controlados, ou seja, onde não há serviços de controlo de tráfego aéreo, apenas são fornecidos serviços de informação de voo (mediante pedido);
- Em todas as classes são permitidos voos IFR¹ (*Instrument Flight Rules*) e VFR² (*Visual Flight Rules*), exceto na classe A, onde apenas são permitidos voos IFR;
- A principal diferença da classe C para a D é que, na classe D, os voos IFR não são separados de voos VFR (isto é, mantidos a uma distância segura) e, por essa razão, os voos VFR recebem informações de tráfego relativas a todos os outros voos, enquanto que na classe C apenas recebem informações de voo de outros voos VFR;
- Nas classes A, C e D, que correspondem a classes de espaços aéreos controlados, é obrigatório manter comunicações de voz ar-solo contínuas, para todos os voos. Já na classe G, apenas os voos IFR devem ter a capacidade para estabelecer estas mesmas comunicações. Contudo, não há uma obrigatoriedade imposta para o fazerem;
- A classe D está associada a áreas militares restritas, as quais serão abordadas mais à frente.

¹IFR diz respeito a Regras de Voo por Instrumentos.

²VFR diz respeito a Regras de Voo Visual.

Agora que entendemos o significado das diferentes classes de voo, as tabelas 2.1 e 2.2 mostram-nos como estão limitadas a RIV de Lisboa e a RIV de Santa Maria, respetivamente.

Tabela 2.1: Limites inferior e superior da RIV de Lisboa [2]

	Limite Inferior	Limite Superior	Classe do Espaço Aéreo
LPPC	SFC	UNL	
LPPC (território nacional)	SFC	FL095	G
	FL095	FL660	C
	FL660	UNL	G
LPPC (alto mar)	MSL	FL055	G
	FL055	UNL	C

Tabela 2.2: Limites inferior e superior da RIV de Santa Maria [2]

	Limite Inferior	Limite Superior	Classe do Espaço Aéreo
LPAZ	SFC	UNL	
	FL055	UNL	A

Onde: SFC significa *Surface* - superfície; UNL significa *Unlimited* - sem limite; MSL significa *Mean Sea Level* - nível médio das águas do mar.

Na RIV de Lisboa, na porção do território nacional que vai desde a superfície até ao FL095, a classe do espaço aéreo é G, com exclusão das porções do espaço aéreo controlado, como por exemplo as áreas terminais de Lisboa, Porto, Faro e Madeira e as zonas de controlo de tráfego aéreo - as quais serão estudadas posteriormente.

Por sua vez, na RIV de Santa Maria, na porção do espaço que vai desde o FL055 e segue sem limite, a classe do espaço aéreo é A, excluindo a porção do espaço da área terminal de Santa Maria.

Além desta divisão primordial em duas RIV distintas, e a posterior divisão em espaço aéreo controlado e não controlado, o espaço aéreo português está ainda subdividido em várias áreas e zonas de controlo. Iremos explorar algumas delas, começando pelas Áreas Terminais.

Áreas Terminais (TMA - *Terminal Manoeuvring Area*) definem-se como áreas em que “as aeronaves a chegar fazem a transição de uma estrutura de rota para uma estrutura terminal, com vista à aproximação e à aterragem”. [2] Ou seja, a área terminal representa a primeira área do espaço aéreo em que a aeronave que está a descolar de um determinado aeroporto entra, e a última área que atravessa uma aeronave que está a aterrar num determinado aeroporto. Mais concretamente, diz respeito ao espaço aéreo circundante de um aeroporto.

Existem cinco áreas terminais em Portugal – quatro na RIV de Lisboa: TMA de Lisboa, TMA do Porto, TMA de Faro e TMA da Madeira; e uma na RIV de Santa Maria: TMA de Santa Maria.

Inserida na área terminal de Santa Maria está toda a estrutura de rotas que serve todos os aeroportos e aeródromos dos Açores. Estas áreas, tal como todas as divisões do espaço aéreo português, possuem limites bem definidos. Na tabela 2.3 estão representados os limites inferior e superior das cinco TMA portuguesas.

Tabela 2.3: Limites inferior e superior das cinco TMA [2]

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

Onde AGL significa *Above Ground Level* - acima do nível do solo.

De referir que a área terminal de Lisboa está ainda subdividida como nos mostra a tabela 2.4.

Tabela 2.4: Subdivisões da TMA de Lisboa [2]

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

Onde: ft significa *foot* - unidade de medida norte-americana (1ft \simeq 0.3048m); AMSL significa *above mean sea level* - acima do nível médio das águas do mar.

Inerente a cada uma das TMA estão outras zonas e espaços aéreos - podemos destacar as Zonas de Controlo de Tráfego Aéreo (CTR), Zonas de Tráfego do Aeródromo (ATZ), Zona de equipamento rádio e *transponder* e outras áreas – proibidas, restritas, perigosas e temporariamente reservadas.

Inseridos na **TMA de Lisboa** estão o Setor do Órgão de Controlo de Aproximação (ou simplesmente Setor APP de Lisboa - Setor de Aproximação a Lisboa, dividido em setor 1 e setor 2 do APP), o Órgão de Controlo de Tráfego Aéreo (Unidade ATC) - que controla o tráfego dos aeródromos localizados na sua área de responsabilidade - as zonas de controlo de tráfego aéreo (CTR), de Lisboa e de Cascais, e vários outros espaços militares. Na figura 2.2 podemos ver a representação gráfica da TMA de Lisboa.

As **Zonas de Controlo de Tráfego Aéreo (CTR)** têm como objetivo principal proteger as aeronaves nas duas fases mais críticas de voo: a descolagem e a aterragem. São espaços

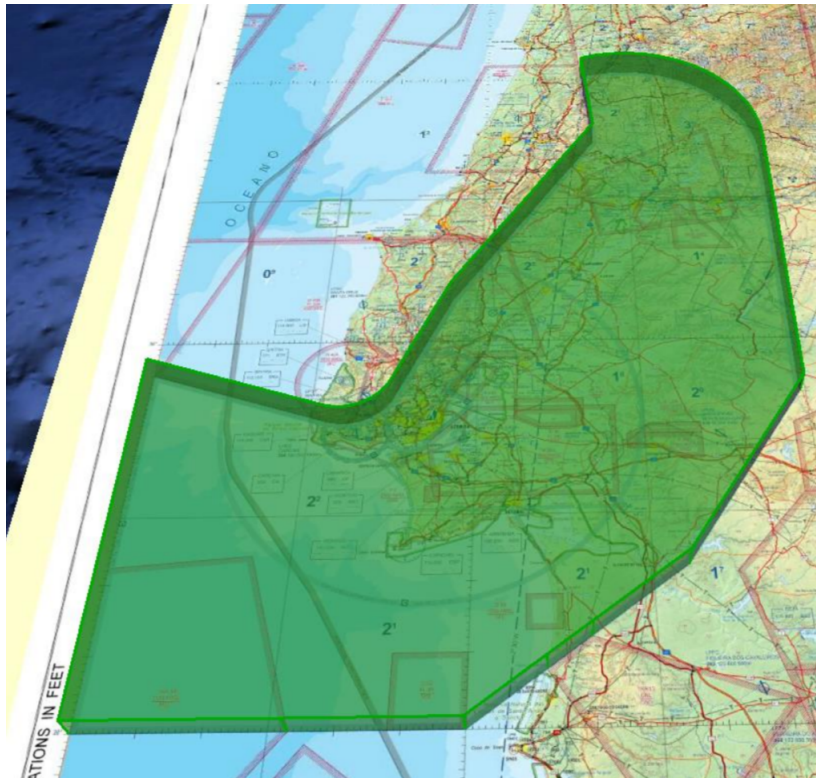


Figura 2.2: TMA de Lisboa [2]

aéreos controlados e são limitados inferiormente pelo nível do solo ou pelo nível médio das águas do mar.

Existem onze CTR ao todo em Portugal: seis na RIV de Lisboa – CTR do Porto, Lisboa, Cascais, Faro, Madeira e Porto Santo; e cinco na RIV de Santa Maria – CTR de Ponta Delgada, Santa Maria, Lajes (militar), Horta e Flores. Todas as CTR representam espaços aéreos de classe C. Exemplos destas estão representados na figura 2.3.

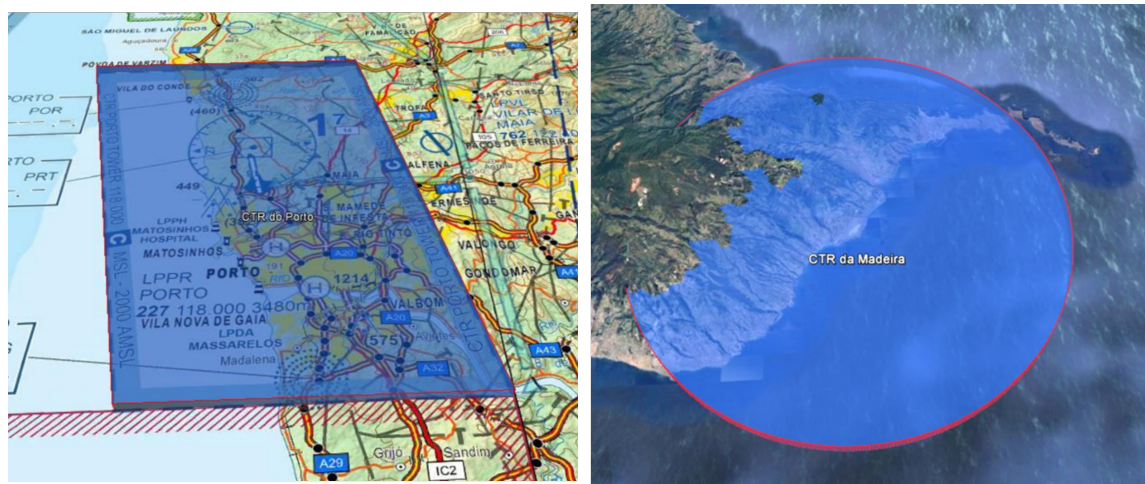


Figura 2.3: CTR do Porto (à esquerda) e CTR da Madeira (à direita) [2]

Tal como acontece com as áreas terminais, também nas CTR existem espaços/infraestruturas

aeronáuticas que estão localizadas na área de ação das CTR e por isso fazem parte das mesmas.

A CTR de Lisboa serve o Aeroporto Humberto Delgado e é limitada inferiormente pelo solo e superiormente por uma altura de 600 metros. Os Heliportos hospitalares de Loures, Santa Maria, Amadora-Sintra, Carnaxide, São Francisco Xavier e Garcia de Orta (Almada), assim como os Heliportos de Alfragide, Algés e Salemas, estão inseridos no seu espaço. Na figura 2.4 está representada graficamente a CTR de Lisboa.

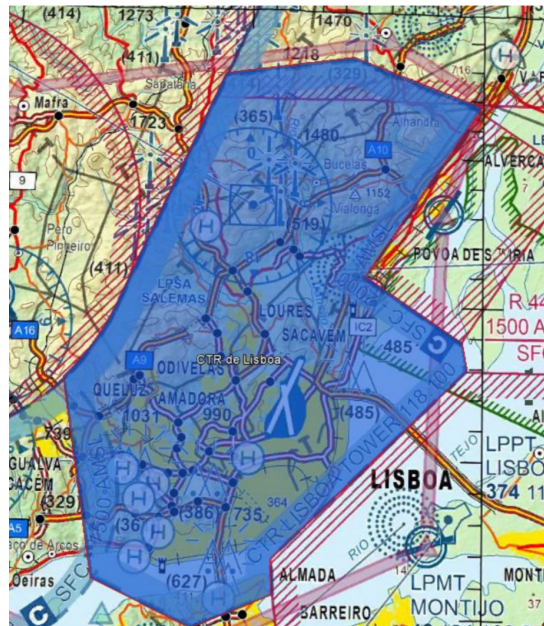


Figura 2.4: CTR de Lisboa [2]

A figura 2.5 mostra-nos os variados espaços da zona de Lisboa. Conseguimos ver distintivamente a sua TMA, a maior zona limitada por uma linha azul escura. Inserida na TMA distinguimos o maior círculo incompleto, como sendo o setor 1 do APP de Lisboa, e outra zona mais pequena delimitada a azul, como o setor 2 do APP de Lisboa. A zona mais pequena, delimitada a roxo, representa a CTR de Lisboa e o círculo incompleto mais pequeno a azul corresponde à CTR de Cascais.

Conseguimos também ver a **zona de tráfego do aeródromo** de Ponte de Sor e de Évora. As zonas de tráfego do aeródromo (ATZ) são espaços aéreos de dimensões definidas, estabelecidos em torno de aeródromos com o objetivo de proteger o tráfego desses aeródromos. Estes espaços são não controlados, o que significa que apenas é prestado o serviço de informação de voo.

Em Portugal, estão estabelecidas ATZ em doze aeródromos: Aeródromo da Graciosa, Bragança, Chaves, Coimbra, Évora, Ponte de Sor, Portimão, São Jorge, Vila Real, Viseu, Corvo e Pico. Em todos estes é obrigatório que haja comunicações bilaterais entre as aeronaves e a entidade que presta o serviço de informação de voo – AFIS (*Aerodrome Flight Information*

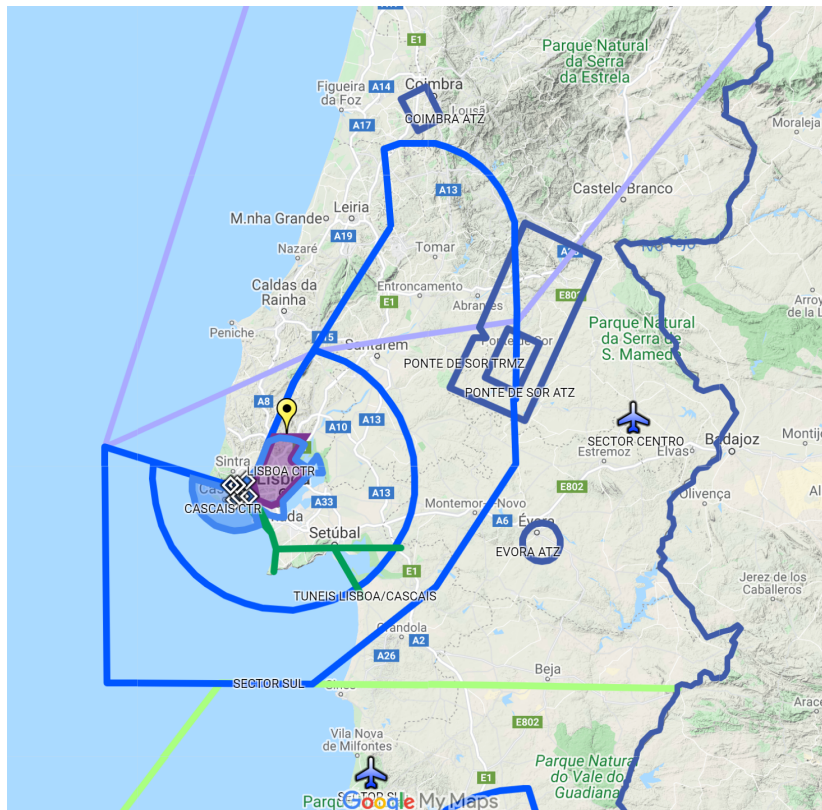


Figura 2.5: Zonas do espaço aéreo de Lisboa [3]

Service – Serviço de Informação de Voo de Aeródromo). Na figura 2.6 estão representados dois exemplos de ATZ em Portugal.



Figura 2.6: ATZ de Bragança (à esquerda) e ATZ do Corvo (à direita) [2]

Existem ainda outras zonas no espaço aéreo português denominadas **zonas de equipamento rádio e transponder** obrigatório. Podem ser divididas em zonas de equipamento rádio obrigatório (RMZ) – aqui deve manter-se uma escuta contínua às comunicações de voz ar-solo – e zonas de equipamento *transponder* obrigatório (TMZ), em que todos os voos devem dispor e utilizar *transponders* SSR (Radar de Vigilância Secundário).

Em Portugal estão estabelecidas duas destas zonas: uma na zona do aeródromo de Ponte de Sor, que podemos ver representada na figura 2.5, e uma no grupo central dos Açores, compreendendo a CTR da Horta e sob responsabilidade do controlo de tráfego aéreo da NAV Portugal, E.P.E..

Por fim, falaremos das **Áreas Proibidas, Restritas, Perigosas e Temporariamente Reservadas**. São igualmente zonas de dimensões bem definidas e com fins maioritariamente militares.

Como o próprio nome indica, uma **área proibida** é um espaço onde o voo de aeronaves é proibido. Em Portugal, atualmente, apenas consta nas publicações de informação aeronáutica uma área como sendo proibida – LPP2 - Pinhal do Arneiro, representada na figura 2.7.



Figura 2.7: LPP2 - Pinhal do Arneiro [2]

As **áreas restritas** são zonas onde o voo de aeronaves é sujeito a restrições de acordo com determinadas condições previamente especificadas. Todas as áreas restritas em Portugal estão destinadas à atividade militar e a sua extensão inicia-se a partir do solo. São elas a LPR40A – Ovar, LPR60A – Monte Real, LPR39A – Tancos, LPR42A – Sintra, LPR43C – Ota, LPR44A – Alverca, LPR26A – Montijo, LPR51A – Beja e LPR61 – Beja.

Áreas perigosas são áreas onde, em determinados períodos, podem ter lugar atividades perigosas para o voo de aeronaves. Também estas são áreas destinadas à atividade militar.

Por fim, as **áreas temporariamente reservadas** são áreas que se destinam exclusivamente a atividades militares de treino ou de exercícios.

Todas estas áreas são publicadas num documento nacional denominado por AIP (*Aeronauti-*

cal Information Publication), que contém detalhadamente os regulamentos, procedimentos e outras informações relevantes para as operações de uma aeronave no país específico no qual se encontra. Este documento é emitido em nome do Estado, normalmente pelas entidades de aviação civil. Em Portugal, a entidade que publica a AIP é a NAV Portugal E.P.E., em colaboração com a ANAC (Autoridade Nacional de Aviação Civil).

No dia 11 de março de 2021 estavam sinalizadas como áreas restritas, perigosas, temporariamente reservadas e área perigosa, em Portugal Continental, as áreas representadas na figura 2.8.

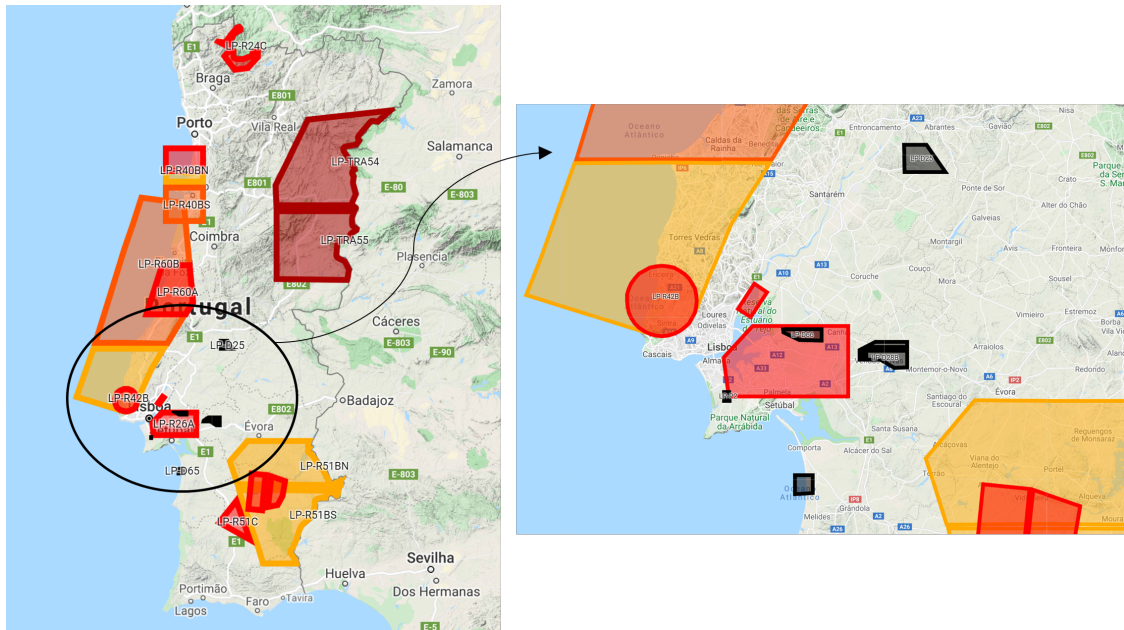


Figura 2.8: Áreas restritas, perigosas, temporariamente reservadas e área perigosa de Portugal Continental - 11 de março de 2021 [3]

As áreas representadas pelas letras LP-R representam áreas restritas - são as áreas delineadas a amarelo e a vermelho. As áreas temporariamente reservadas estão representadas a bordeaux com as letras LP-TRA (do inglês, *temporary reserved areas*). As áreas perigosas (LP-D - do inglês, *dangerous*) estão representadas a preto - estão concentradas no centro de Portugal e podemos vê-las mais facilmente na figura à direita. Por fim, a única área perigosa em Portugal está também representada a preto - LP-P2.

Uma vez que o objeto de estudo do presente trabalho é ambiente de tráfego aéreo do espaço entre Madrid e Lisboa, iremos ver também como está dividido o espaço aéreo espanhol - com maior ênfase na área de Madrid.

2.2 Espaço Aéreo Espanhol

Em Espanha existem três Regiões de Informação de Voo: RIV de Madrid, RIV de Barcelona e RIV das Ilhas Canárias. Sevilha é muitas vezes considerada uma "quarta RIV", uma vez que

atua sob delegação do ACC de Madrid como um Espaço Aéreo Delegado (EAD). [38] O nível de voo que separa o espaço superior do inferior é o FL245. [4] Podemos ver representadas as diferentes RIV na figura 2.9.

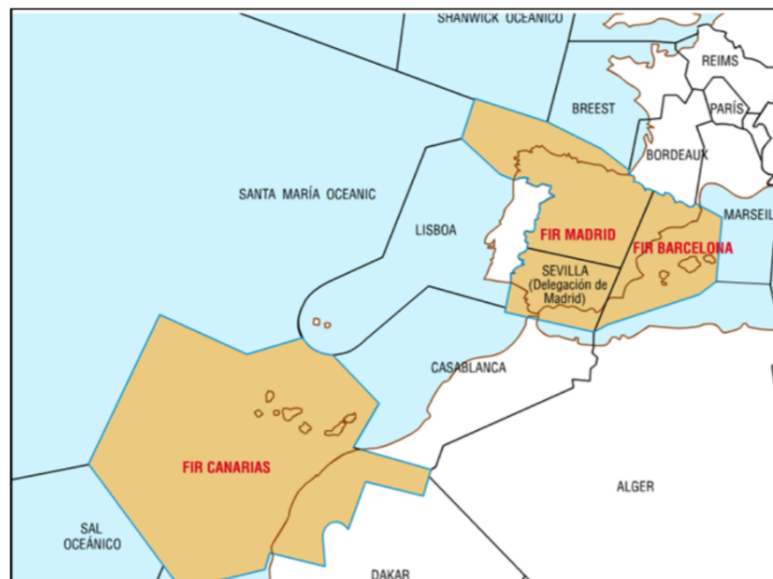


Figura 2.9: Regiões de Informação de Voo de Espanha [4]

O espaço aéreo espanhol encontra-se dividido em espaço aéreo controlado e não controlado, tal como em Portugal. [39]

Em termos de navegação aérea e limitações subjacentes, Espanha tem o seu espaço aéreo dividido em 7 classes: A, B, C, D, E, F e G - onde as classes F e G dizem respeito a espaços aéreos não controlados. [39] Tal como em Portugal, em todas as classes são permitidos voos IFR e VFR, exceto na classe A, onde apenas são permitidos voos IFR. A caracterização das classes A, C, D e G, também presentes em Portugal, é idêntica ao nosso país. Algumas notas breves sobre as restantes classes, B, E e F:

- A classe B é bastante abrangente - a única diferença para a classe A é que são permitidos voos IFR e VFR. Todas as aeronaves são separadas umas das outras e têm direito a serviços de ATC. Existem comunicações ar-solo contínuas em ambos os sentidos;
- Na classe E, apenas os voos IFR são separados de outros voos IFR. Voos VFR apenas têm direito a serviços de informação de tráfego, mediante pedido e se for possível. Os voos IFR têm obrigatoriedade de manter contacto ar-solo mas os voos VFR não.
- Por fim, a classe F diz respeito a uma classe de espaço aéreo não controlado. Apenas há separação de voos IFR de outros voos IFR quando for possível. Voos IFR e VFR apenas têm direito a serviços de informação de voo. Voos VFR não têm obrigatoriedade de manter comunicações ar-solo, mas os voos IFR sim.

A entidade responsável pela regulação e controlo de tráfego aéreo em Espanha é a ENAIRE. [5]

Dentro do espaço aéreo controlado encontramos várias divisões do espaço: Aerovias (AWY), Áreas Terminais (TMA), Áreas de Controlo de Tráfego (CTA), Zonas de Controlo de Tráfego (CTR) e Zonas de Tráfego do Aeródromo (ATZ). [40]

Aerovias (AWY - Airway) são corredores de tráfego aéreo bem definidos, necessários para canalizar o tráfego aéreo entre determinados pontos do espaço aéreo a uma determinada altitude. O limite superior destas vias é o limite superior do próprio espaço aéreo, enquanto o limite inferior é um limite pré-afixado. [40] Um mapa destas rotas está representado na figura 2.10.

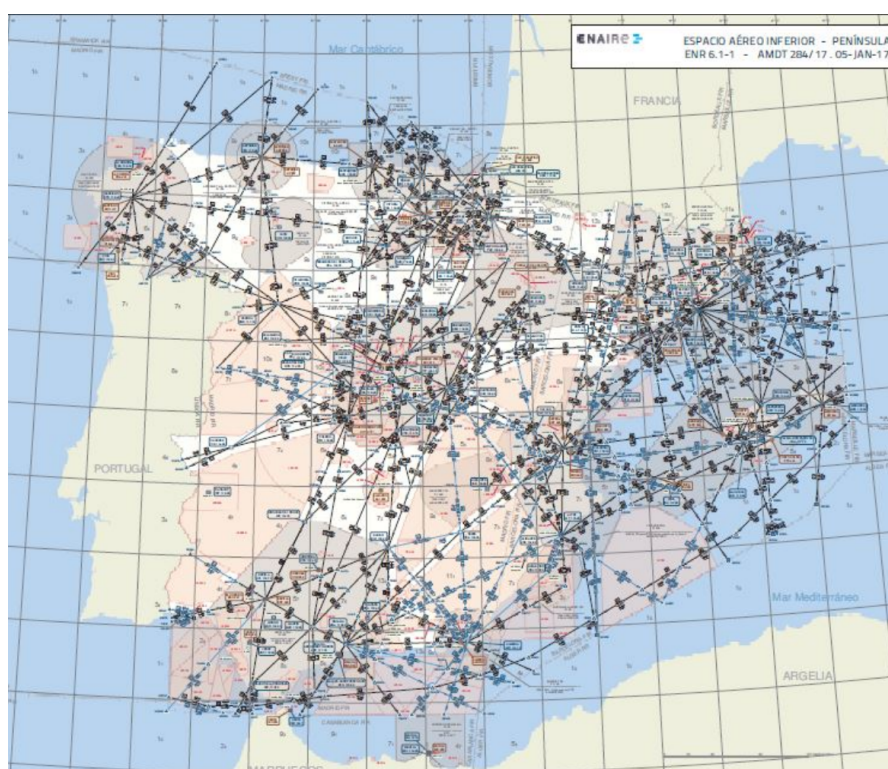


Figura 2.10: Rotas e aerovias do espaço aéreo peninsular Espanhol [5]

Existem doze **TMA** em Espanha: TMA da Galiza, Astúrias, Santander, Bilbao, Saragoça, Barcelona, Valência, Palma, Madrid, Sevilha, Almeria e Canárias. [5] A TMA de Madrid e as suas divisões estão representadas no anexo A.

As **áreas de controlo de tráfego (CTA)** são semelhantes às TMA - correspondem a áreas do espaço estabelecidas à volta de um aeroporto cujas dimensões e tráfego associado não justificam uma TMA. [40] Existem oito CTA em Espanha: Granada, Múrcia San Javier, Albacete, Logronho, León, Pamplona, San Sebastián e Vitória.

As **zonas de controlo de tráfego (CTR)** são áreas associadas a aeródromos com o objetivo

de proteger o tráfego IFR que entra e sai do mesmo aeródromo. Quando existem vários aeródromos próximos uns dos outros define-se apenas uma CTR.

Por fim, as **zonas de tráfego aeródromo (ATZ)** são zonas que se estabelecem à volta de um aeródromo. A ATZ é um espaço que se estabelece para que a Torre de Controlo possa controlar o tráfego desse aeródromo e proteger os voos que operam segundo regras de voo visual (VFR). Quando além disto existe tráfego IFR nesse aeródromo e foi estabelecida uma CTR, esta normalmente abrange a ATZ. [40]

Além destas áreas controladas, temos também várias **áreas proibidas, perigosas, restritas e zonas com fauna sensível**. As zonas com fauna sensível são espaços protegidos, como a área de recuperação do urso pardo, no Parque Nacional dos Picos da Europa, ou outros parques naturais que não alcançam a categoria e proteção de um parque nacional. [5]

Na figura 2.11 estão representadas várias zonas que compõem o espaço aéreo espanhol continental.

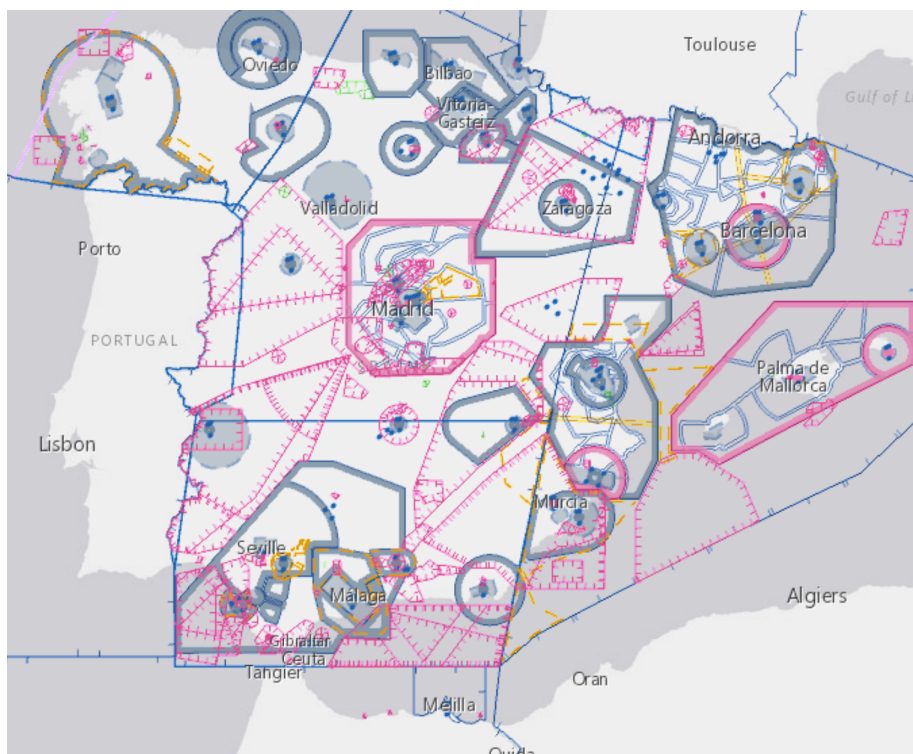


Figura 2.11: Zonas do espaço aéreo de Espanha continental [6]

O objetivo desta representação gráfica é percebermos de que forma o espaço aéreo está dividido, tanto em Portugal (como foi possível percebermos anteriormente), como agora em território espanhol - uma vez que no âmbito do presente trabalho é fundamental termos uma noção das zonas/áreas atravessadas por uma aeronave a percorrer o espaço aéreo compreendido entre Madrid e Lisboa.

2.3 Céu Único Europeu - SES (*Single European Sky*)

O espaço aéreo europeu está estruturado em função de fronteiras nacionais. Os voos seguem rotas previamente estudadas respeitando estas fronteiras, o que os impede muitas vezes de seguir um caminho mais direto - aumentando assim o consumo de combustível e consequentes emissões de CO₂. [41]

Tanto os setores do espaço aéreo como as trajetórias seguidas pelos pilotos são projetados seguindo estas rotas pré-definidas, desconsiderando totalmente os fluxos de tráfego existentes. É fácil perceber que isto não constitui uma gestão eficaz nem intuitiva, capaz de assegurar as necessidades do futuro.

Posto isto, a Comissão Europeia lançou, no final da década de 90, o projeto **Céu Único Europeu (SES - *Single European Sky*)**, com o objetivo de reestruturar o espaço aéreo europeu em função dos fluxos de tráfego existentes.

Esta proposta da Comissão Europeia pretende resolver dois problemas: o primeiro diz respeito à ineficácia dos serviços de navegação aérea - a remoção das fronteiras nacionais permite a criação de rotas mais curtas e racionais, tornando a provisão de serviços mais simples. O segundo problema diz respeito à fragmentação dos sistemas de tráfego aéreo - numa tentativa de melhorar esta realidade foram criados os *Blocos de Espaço Aéreo Funcionais*, os quais falaremos a seguir. [41]

Com tais objetivos em mente, foram estabelecidas as seguintes metas: [42]

- Triplicar a capacidade do espaço aéreo - reduzindo assim os atrasos em terra e no ar;
- Melhorar em 10 vezes a segurança;
- Reduzir em 10% o impacto ambiental da aviação;
- Reduzir para metade os custos dos serviços de ATM.

Iremos explorar duas iniciativas levadas a cabo em todo o continente europeu, no âmbito do Céu Único Europeu: os Blocos de Espaço Aéreo Funcionais e o *Free Route Airspace*.

2.3.1 Blocos de Espaço Aéreo Funcionais - FAB (*Functional Airspace Blocks*)

Um **Bloco de Espaço Aéreo Funcional** é um volume de espaço aéreo estabelecido com base em requisitos operacionais, independente de fronteiras internacionais, tal como foi definido pelo SES.

Cada vez que uma aeronave entra no espaço aéreo de um Estado Membro é servida por um prestador de serviços de navegação aérea diferente, com base em regras e requisitos operaci-

onais diferentes. Esta fragmentação, já anteriormente evidenciada, impacta negativamente a segurança, limita a capacidade e, acima de tudo, aumenta o custo. Nestes blocos, a oferta dos serviços de navegação aérea é otimizada através da **cooperação entre as entidades que atuam em cada FAB**, ou mesmo por um prestador único integrado, quando tal é considerado necessário. [43]

A criação destes FAB é considerada vital para reduzir a fragmentação do espaço aéreo europeu e para uma gestão mais dinâmica do tráfego, de modo a acomodar eficazmente o aumento progressivo do mesmo, assim como para reduzir atrasos. Este aumento na eficiência e segurança da operação baseia-se na cooperação além-fronteiras e no aumento da escala da operação ATM. A coordenação entre voos civis e militares e gestão dos mesmos também contribuem positivamente neste sentido. [43]

Embora a implementação dos FAB tenha sido lenta, todos os nove FAB já foram declarados, estabelecidos e notificados à Comissão Europeia, e estão representados na figura 2.12.

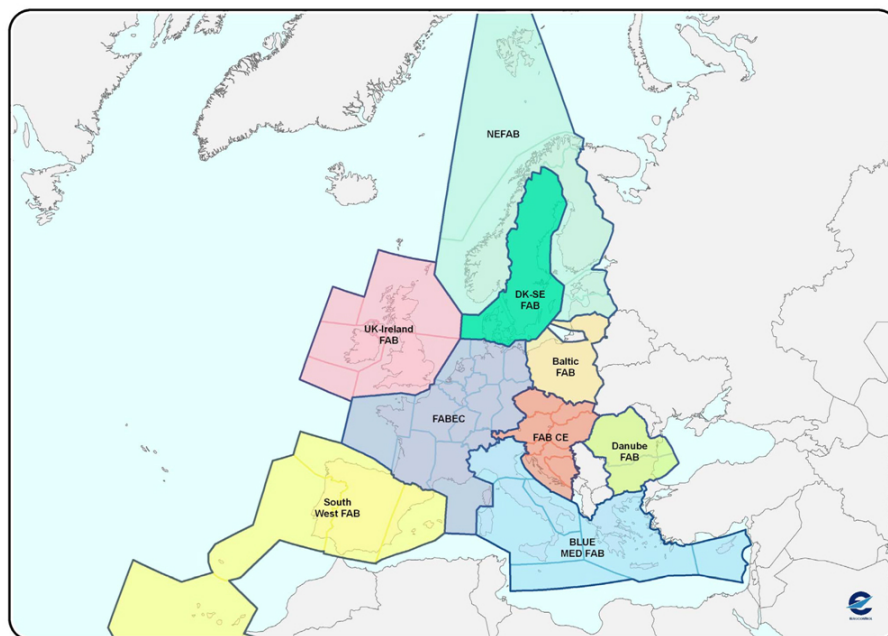


Figura 2.12: Divisão do Espaço Aéreo Europeu em 9 FAB [7]

O *South West FAB* - SW FAB, cobre o espaço aéreo acima do FL245 sob responsabilidade de Portugal e Espanha, excluindo a FIR de Santa Maria. Este FAB é assim composto pelas seguintes FIR/UIR: FIR de Lisboa, UIR de Madrid, UIR de Barcelona e UIR das Ilhas Canárias [44].

2.3.2 *Free Route Airspace* - RIV de Lisboa

Um **Free Route Airspace (FRA)** corresponde a uma zona do espaço aéreo onde os utilizadores do espaço podem escolher livremente a rota que pretendem seguir, entre um ponto de entrada e saída bem definidos. Nos FRA, o tráfego continua sujeito às indicações do ATC,

mas em vez de terem que seguir trajetórias pré-definidas, os utilizadores poderão escolher o trajeto mais conveniente consoante o seu perfil de voo, mediante disponibilidade. [45] Isto permite, mais uma vez, encurtar as rotas, quer em distância, quer em tempo de voo - consumindo menos combustível e consequentemente reduzindo as emissões de CO₂.

Atualmente o espaço aéreo sobre Lisboa é tal como representado na figura 2.13.

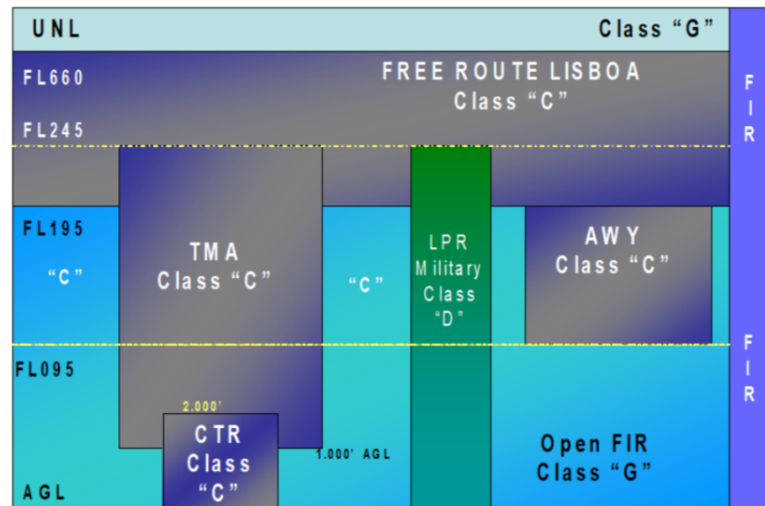


Figura 2.13: Representação e classificação do espaço aéreo sobre Lisboa [8]

O projeto *Free Route* na RIV de Lisboa foi pioneiro na Europa, tendo sido implementado em 2009. [45][46]

Capítulo 3

Modelação do Fluxo de Tráfego Aéreo

Nas áreas da matemática e engenharia do transporte, a expressão *fluxos de tráfego* diz respeito ao estudo das interações entre os viajantes e a infraestrutura - os utilizadores e o espaço aéreo - com o objetivo de compreender e desenvolver uma rede ótima de transportes, com um movimento de tráfego eficiente e problemas de gestão de tráfego mínimos.

Agora que já estudamos a infraestrutura - o espaço aéreo - podemos definir um modelo que nos permita simular essa interação entre viajante e infraestrutura.

3.1 Modelos Eulerianos

Quando falamos de **modelação** em engenharia, falamos do processo de descrever por expressões matemáticas o funcionamento/realidade de algo que já conhecemos. Diferentes tipos de modelação são adotados quando se quer levar a cabo diferentes tipos de análises.

Fluxos de tráfego podem ser modelados através da integração das equações que ditam o movimento de cada aeronave no espaço aéreo, fazendo uso do plano de voo de cada uma. Nesta abordagem, o número de equações dinâmicas é tanto maior quanto o número de aeronaves presentes no ambiente que pretendemos descrever. Se pensarmos na realidade do controlo de fluxo de tráfego, entendemos que o foco é a **dinâmica agregada de um grupo de aeronaves**, e não o comportamento dinâmico individual de cada uma. Assim, uma abordagem que consiga agregar propriedades dinâmicas de várias aeronaves será mais eficiente numa aplicação prática.

Tal abordagem à modelação de fluxos de tráfego aéreo pode ser intitulada de **abordagem Euleriana**. Tal como explicado por *Menon, et al.* em [9], esta agregação de propriedades é conseguida através da divisão do espaço aéreo em **secções**, regiões do espaço interconectadas, e a consequente descrição das dinâmicas de fluxo através das propriedades de fluxo dessas regiões. Por exemplo, a taxa de mudança do número de aeronaves numa determinada região pode ser definida com base no número de aeronaves que entra e sai dessa região. Leis constitutivas, tal como a lei de conservação do número de aeronaves no espaço aéreo, podem ser invocadas para a formulação adequada das equações que descreverão o fluxo de tráfego aéreo na região.

Assim, a abordagem Euleriana contrasta com outras abordagens já mais conhecidas, como a abordagem Lagrangiana - que modela as trajetórias individuais de cada aeronave no am-

biente descrito - enquanto que um modelo Euleriano agrega espacialmente tráfego aéreo de modo a gerar modelos de tráfego numa rede de **volumes de controlo**, interligados e unidimensionais - exemplo deste apresentado na figura 3.1.

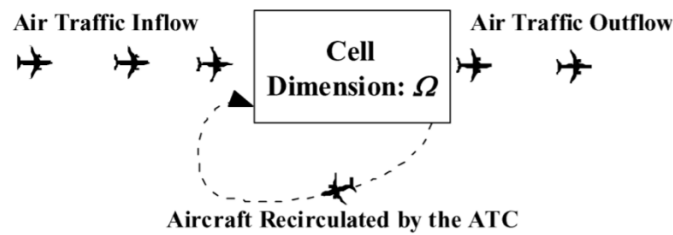


Figura 3.1: Conceito de volume de controlo no contexto de tráfego aéreo [9]

O número e a distribuição de volumes de controlo utilizados para modelar um certo ambiente de tráfego dependem da fidelidade desejada do modelo e da eficiência computacional.

Assim, uma abordagem Euleriana simplifica a caracterização do tráfego aéreo, uma vez que a "ordem" do modelo depende apenas do número de volumes de controlo espaciais utilizados, e não do número de aeronaves a operar neles, como é o caso dos modelos de trajetórias individuais. Desta feita, a eficiência da descrição Euleriana das dinâmicas de fluxo de tráfego aéreo aumenta com o número de aeronaves no ambiente.

Os modelos Eulerianos de fluxo de tráfego podem ter várias aplicações. Quando utilizados em conjunto com teoria de controlo automático, estes modelos permitem uma abordagem sistemática ao desenvolvimento de estratégias de controlo de fluxo. Adicionalmente, técnicas de controlo automático podem ser utilizadas para introduzir ciclos de realimentação no ambiente de tráfego aéreo, com o intuito de melhorar as suas propriedades dinâmicas de modo a permitir um melhor controlo manual do ambiente.

Nesta dissertação iremos utilizar um modelo idêntico ao apresentado em [36], o qual é baseado em [9], apenas com algumas alterações. Iremos modelar o espaço aéreo entre dois aeroportos, um de partida e um de chegada, começando pela definição do modelo das secções individuais.

3.2 Modelo das Secções Individuais

Tal como em [36], afastamo-nos no modelo apresentado por *Menon* no sentido em que o nosso modelo é **contínuo no tempo**. O problema em causa, de regular e monitorar fluxos de tráfego, é claramente um problema cujas dinâmicas são contínuas no tempo - por isso faz todo o sentido utilizar um modelo que assim o seja também.

Primeiramente, temos que definir as **dinâmicas de cada secção individual**. Antes de construirmos a estrutura do modelo completa, precisamos de modelar as secções individuais

que o compõem.

Uma vez que a solução apresentada para o problema da gestão de tráfego aérea em [36] é apresentada sob a forma de **fluxos de chegada e de saída desejados**, temos de caracterizar o fluxo de tráfego que deixa uma determinada secção.

Considere-se uma **secção** i ; Um controlador consegue controlar o fluxo dentro da sua secção modificando a **velocidade**, v_i - velocidade a que as aeronaves voam dentro da secção i - e Ω_i - **o comprimento do percurso** que as aeronaves devem seguir, em cada secção. Modificando estes dois parâmetros, o controlador controla o **tempo de travessia**, τ_i , na sua secção - onde $\tau_i = \frac{\Omega_i}{v_i}$. Ao modificar estes parâmetros, o controlador consegue controlar o fluxo de tráfego que deixa a sua secção.

Outro parâmetro que temos que ter em conta é a **taxa de recirculação**, q_i . Como o próprio nome indica, esta taxa caracteriza a fração de tráfego de saída que volta a entrar na secção. Em termos físicos e práticos, esta taxa de recirculação traduz as aeronaves que, por algum motivo, voltam a reentrar na secção da qual saíram. É algo que acontece raramente e que pode ser devido, por exemplo, a uma falha na aeronave, que leve a uma aterragem de emergência no aeroporto mais perto, ou até mesmo por algum constrangimento no aeroporto de destino que impeça a aeronave de aterrar imediatamente e que a sujeite a ficar num padrão de espera.

Temos assim todos os parâmetros necessários para definir o **fluxo de tráfego aéreo que deixa uma determinada secção** i , no tempo t ,

$$f_i(t) := \frac{v_i(t)}{\Omega_i(t)} x_i(t) - q_i(t) \quad (3.1)$$

Onde $x_i(t)$ representa o **número de aeronaves** na secção i , no tempo t .

Por cada $i \in \{1, \dots, n\} \cup \{A, B\}$ (onde **A** denota o **aeroporto de partida** e **B** o **aeroporto de destino**) definimos $0 \leq \beta_{ij} \leq 1$ - fração de fluxo de tráfego, f_i , que flui desde a secção i até à secção j . A fração de aeronaves que parte do aeroporto A em direção à secção i é denotada por um escalar η_{Ai} , onde $0 \leq \eta_{Ai} \leq 1$. β_{ij} e η_{Ai} são valores fixos e dados como parte do modelo - o que significa que os controladores apenas podem controlar o fluxo ao longo de cada secção, mas não conseguem redirecionar aeronaves.

Introduzem-se dois conjuntos de secções: \mathcal{I}_i e \mathcal{O}_i - em que \mathcal{I}_i define o conjunto de secções de onde as aeronaves estão a vir para entrar em i e \mathcal{O}_i define o conjunto de secções que as aeronaves que deixam i podem entrar. Tendo em conta que o aeroporto A é o aeroporto de partida e o aeroporto B é o aeroporto de destino, então $\mathcal{I}_A = \mathcal{O}_B = \emptyset$ - uma vez que assumimos que o aeroporto A é uma fonte de aeronaves e o aeroporto B é um poço - ou seja, não há nenhuma secção de onde as aeronaves venham antes de partirem de A, nem nenhuma secção para onde as aeronaves possam ir depois de aterrem em B.

Assim, a dinâmica da secção i pode ser caracterizada por

$$\dot{x}_i = -\frac{x_i}{\tau_i} + q_i + \sum_{\substack{j \in \mathcal{I}_i \\ j \neq A}} \beta_{ji} \left(\frac{x_j}{\tau_j} - q_j \right) + \eta_{Ai} d \quad (3.2)$$

Onde d representa uma **perturbação**, como por exemplo vento ou turbulência. A variável d representa algo que varia aleatoriamente e nós não sabemos bem definir o que é, mas que tem uma influência direta na trajetória da aeronave e conseqüentemente na qualidade do nosso modelo.

As duas primeiras parcelas da equação 3.2 indicam-nos o fluxo de tráfego que deixa a secção i (tal como na equação 3.1); o somatório seguinte diz respeito ao fluxo que entra na secção i vindo de outras secções do espaço aéreo; por fim, a última parcela diz respeito a uma fração do fluxo que é afetada por algum tipo de distúrbio.

3.3 Restrições do Modelo

Vamos agora focar-nos nas restrições físicas e definidas pelo utilizador que irão posteriormente afetar a dinâmica das secções. Também iremos impor restrições que garantam que o "arranjo" físico das secções permita criar uma rede interconectada das mesmas.

Os controladores têm a capacidade de controlar o fluxo de aeronaves ao longo da sua secção através da modificação de parâmetros como a v_i , Ω_i e q_i . Em cada sinal t , estes três parâmetros devem ser escolhidos de modo a respeitar as seguintes restrições:

1. Conservação de aeronaves;
2. Número de aeronaves na secção i deve ser não negativo;
3. Aeronaves voam segundo as suas restrições dinâmicas;
4. Aeronaves fluem ao longo das secções seguindo uma direção prescrita;
5. O fluxo de aeronaves ao longo das secções deve ser fisicamente possível;
6. O aeroporto B deve conseguir ser alcançado a partir de qualquer secção.

3.4 Estrutura da Rede de Secções

A estrutura do espaço é representada através de um diagrama que conecta diferentes secções do espaço, tal como ilustrado na figura 3.2.

As setas indicam a direção do fluxo de tráfego ao longo da rede de secções que compõem o

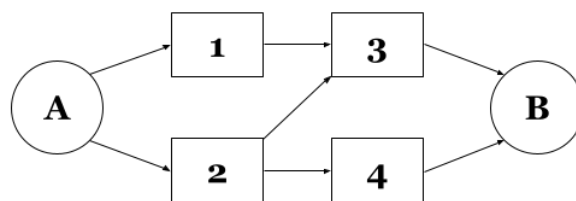


Figura 3.2: Exemplo de uma rede de secções do espaço aéreo

espaço aéreo. Existe apenas uma direção possível ao percorrer a estrutura de rede, desde o aeroporto de partida em direção ao aeroporto de destino.

Podemos dividir as secções em níveis, consoante a sua distância ao aeroporto de partida. Assim, dizemos que uma determinada secção i pertence ao nível C se o comprimento do trajeto desde essa secção até à origem (aeroporto A) for igual a C . A notação S_C representa o conjunto de secções que estão no nível C . Ou seja, se i está no nível C , então $i \in S_C$.

Assume-se que existem $m + 2$ níveis no diagrama todo. Se se representar os níveis inicial e final por I e F , respetivamente, e $L \in \{1, \dots, m\}$, obtêm-se $m + 2$ níveis. O nível inicial contém as secções onde a aeronave pode entrar imediatamente a descolar - que no caso da figura 3.2 são as secções 1 e 2 - e o nível final contém as secções que apenas levam ao aeroporto de destino - secções 3 e 4.

Como já foi referido anteriormente, existe uma direção única a percorrer entre A, as secções do espaço e B. Assim, por convenção, o fluxo através das secções acontece segundo $I \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow \dots \rightarrow m \rightarrow F$ - ou seja, o movimento de aeronaves de uma secção para a outra é sempre um movimento em direção ao aeroporto de destino.

3.4.1 Cumprimento das Restrições pelo Modelo

As restrições descritas anteriormente tanto podem ser **incorporadas no modelo** que estamos a criar, como traduzidas em restrições que devem ser **satisfeitas pelo controlador**. O cumprimento destas restrições é imprescindível para que o modelo seja fiel fisicamente ao ambiente de tráfego aéreo do espaço a ser estudado.

Começamos pela **restrição 1** - o número de aeronaves que entram no sistema deve ser igual ao número que sai dele. Isto é conseguido pela escolha adequada das constantes β_{ij} e η_{Ai} . A estrutura da rede de secções escolhida por nós permite-nos definir um β_{ij} e um η_{Ai} . Uma definição diferente da estrutura do modelo iria ter um efeito sobre a escolha e interpretação destas mesmas constantes.

De modo a garantir que o sistema conserva o número de aeronaves é preciso que todas elas deixem uma determinada secção, ou o aeroporto de partida, e entrem noutra secção adja-

cente, ou aterrem no aeroporto de destino. Isto é o mesmo que garantir que

$$\begin{aligned} \eta_{Ai} &= 0 \text{ se } i \notin \mathcal{S}_{\mathcal{I}} \\ \eta_{Ai} &> 0 \text{ se } i \in \mathcal{S}_{\mathcal{I}} \\ \sum_{i \in \mathcal{S}_{\mathcal{I}}} \eta_{Ai} &= 1 \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para o caso de aeronaves que estão a descolar do aeroporto A, e

$$\begin{aligned} \beta_{ij} &= 0 \text{ se } j \notin \mathcal{O}_i \\ \beta_{ij} &> 0 \text{ se } j \in \mathcal{O}_i \\ \sum_{j \in \mathcal{O}_i} \beta_{ij} &= 1 \end{aligned} \quad (3.4)$$

No caso do fluxo entre secções.

A condição de que $\beta_{ij} > 0$ se $j \in \mathcal{O}_i$ também é necessária para cumprir a **restrição 4**, mas não é suficiente. Mais restrições ao nível do controlo irão garantir que esta restrição seja cumprida.

Ditado pela **restrição 6** temos que garantir que o aeroporto de destino pode ser alcançado por qualquer secção do espaço. Para isto basta garantir que $\mathcal{O}_i \neq \emptyset$ para qualquer i - ou seja, há sempre uma secção para a qual as aeronaves podem ir quando deixam a secção i .

A **restrição 5** - fluxo de aeronaves ser fisicamente possível - é cumprida através da definição de uma estrutura adequada do modelo. Assumimos que existe um único caminho a percorrer pelas aeronaves e que este é sempre em direção ao aeroporto de destino. Ao longo deste trajeto, é preciso configurar a rede de secções de modo a que o ponto de saída de uma determinada secção esteja próximo fisicamente do ponto de entrada da secção para onde a aeronave deseja ir.

3.4.2 Limites de Controlo

Algumas das restrições impostas por nós na secção 3.3 - nomeadamente as restrições 2, 3 e 4 - são satisfeitas através da aplicação de limites sobre as variáveis de controlo.

A **restrição 2** é uma restrição de positividade - garantir que o número de aeronaves nas secções é sempre maior ou igual a zero. Para isto, é necessário que

$$x_i(0) \in \mathbb{R}_+, \forall i = 1, \dots, n \Rightarrow x_i(t) \in \mathbb{R}_+ \quad (3.5)$$

Para todo o $i, t \geq 0$. Isto é equivalente à condição $x_i(t) = 0 \Rightarrow \dot{x}_i(t) \geq 0$, independentemente dos valores $x_j(t) \in \mathbb{R}_+, j \neq i$. Os estados do sistema, representados pelo vetor x , representam o número de aeronaves em cada secção - o qual é uma quantidade positiva - daí a obrigatoriedade do vetor x permanecer positivo.

O que a expressão 3.5 também nos diz é que o número de aeronaves ser não negativo é equivalente a dizer que o fluxo de aeronaves ao longo das secções é não negativo. Para isto ser verdade, então

$$0 \leq q_i \leq \frac{x_i(t)}{\tau_i(t)}, \forall i = 1, \dots, n \quad t \geq 0 \quad (3.6)$$

Nós não temos em conta as taxas de partida dos vários aeroportos de onde as aeronaves estão a vir para entrar nas secções, mas assumimos que este valor é sempre maior ou igual a 0. A equação 3.6 garante que tanto o fluxo de saída da secção, como a taxa de recirculação, são ambos sempre maior ou igual a 0 - garantindo assim que a restrição é cumprida. A mesma equação, juntamente com a condição de que $\beta_{ij} > 0$ se $j \in \mathcal{O}_i$, garantem assim que a **restrição 4** - aeronaves fluem segundo uma direcção prescrita - é cumprida.

A **restrição 3**, que dita que as aeronaves devem voar segundo as suas restrições dinâmicas, refere-se ao facto de haver limites impostos sobre a velocidade máxima atingida por um grupo de aeronaves em cada secção. Traduzindo esta restrição por uma expressão matemática obtemos

$$0 < v_i^I \leq v_i(t) \leq v_i^S, \forall t \geq 0 \quad (3.7)$$

As letras *I* e *S* indicam os níveis inferior e superior, respetivamente, de velocidade das aeronaves. Assume-se que as aeronaves estão a voar à sua velocidade máxima dentro das secções e que a recirculação só é utilizada como medida de controlo para diminuir f_i , fluxo de saída, em última instância - ou seja, só após se ter reduzido a velocidade das aeronaves o máximo possível.

Esta expressão pode ser reescrita de uma maneira mais simples - para isso, reescreve-se o fluxo de saída da secção i como $f_i = \frac{v_i^S}{\Omega_i} x_i - u_i$, onde u_i pode ser interpretado como uma **taxa de recirculação generalizada** - a qual capta todas as possíveis ações de controlo para regular o fluxo nominal de aeronaves. Esta taxa de recirculação generalizada pode ser definida da seguinte forma

$$u_i := \frac{v_i^S - v_i}{\Omega_i} x_i + q_i \quad (3.8)$$

Assim, o requisito que dita que a recirculação apenas deve ser utilizada quando todos os outros controlos tiverem sido esgotados toma a forma de

$$\begin{cases} \frac{v_i}{\Omega_i} > \frac{v_i^I}{\Omega_i^I} & \Rightarrow & q_i = 0 \\ \frac{v_i}{\Omega_i} = \frac{v_i^I}{\Omega_i^I} & \Rightarrow & q_i > 0 \end{cases} \quad (3.9)$$

Ou seja, se a velocidade for maior que o valor de velocidade mais baixo admissível, a taxa de recirculação é 0 - uma vez que a velocidade ainda poderá ser reduzida antes de se recorrer a taxas de recirculação. Se a velocidade for igual ao valor mínimo, então a taxa de recirculação passa a ser diferente e maior que 0. Posto isto, a expressão geral que garante o cumprimento

da restrição 3 é a seguinte

$$0 \leq u_i \leq \rho_i \frac{v_i^I}{\Omega_i} x_i + \frac{v_i^S - v_i^I}{\Omega_i} x_i = \frac{x_i}{\tau_i^S} \left[1 - \frac{v_i^I}{v_i^S} (1 - \rho_1) \right] \quad (3.10)$$

Onde ρ_i é uma constante com valores entre 0, inclusive, e 1. Posto isto, até existir uma possível mudança na variável de controlo, u , todas as restrições de interesse para uma lei de controlo aplicada ao nosso sistema, são captadas pela seguinte expressão

$$0 \leq u_i(t) \leq \frac{r_i}{\tau_i^S} x_i(t) \quad (3.11)$$

Para todo o $i, t \geq 0$ e uma escolha apropriada de um fator $0 \leq r_i \leq 1$ - representativo da fração máxima de fluxo de saída disponível para controlo de velocidade ou recirculação.

As restrições impostas sobre a variável de controlo de cada secção individual podem ser agora expressas como restrições impostas sobre a entrada de controlo do sistema, da seguinte forma

Restrição 1

$$0 \leq u(t) \leq u(t)_{max}, \forall t \geq 0 \quad (3.12)$$

Onde $u(t)_{max}$ é definido pelo valor de $u_{i_{max}}$, determinado pela equação 3.11.

Restrição 2

$$u(t) = Kx(t) \quad (3.13)$$

Para uma matriz qualquer K .

3.5 Modelo do Sistema

Depois de definido o modelo das secções individuais e as restrições impostas sobre ele, podemos agora criar um modelo do sistema global. A figura 3.3 ilustra como nós pretendemos modelar o espaço aéreo entre o aeroporto de partida **A - Aeroporto de Madrid**, e o aeroporto de destino **B - Aeroporto de Lisboa**.

Por simplicidade, apenas é representado um aeroporto de partida e um de chegada, além das 9 secções, embora este modelo também possa ser utilizado para múltiplos aeroportos de chegada e de partida, assim como múltiplas secções.

No panorama real, o espaço aéreo atravessado num voo de Madrid com destino a Lisboa contém mais que 9 secções. Contudo, optamos por trabalhar apenas com 9 secções por uma questão de simplificação de cálculos, nomeadamente no que diz respeito ao tamanho das matrizes do sistema, e de modo a respeitar a eficiência computacional disponível. Assim,

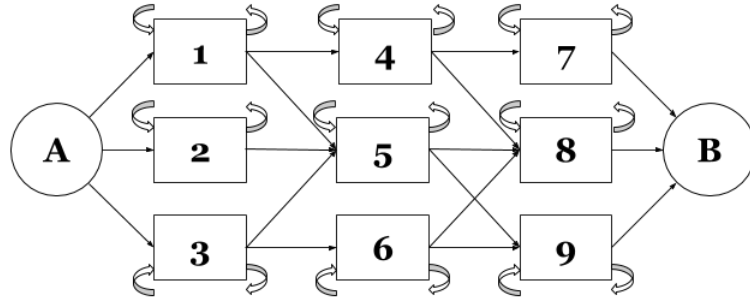


Figura 3.3: Estrutura do espaço aéreo entre os aeroportos A e B

as secções 2, 4, 6 e 8 são secções reais; enquanto que as secções 1, 3, 5, 7 e 9 representam agrupamentos de secções reais. Isto terá influência no cálculo dos valores de β_{ij} , como iremos ver no capítulo 4, e nos "caminhos possíveis" entre secções.

Com o modelo do espaço aéreo que pretendemos estudar definido e as restrições aplicadas sobre ele estruturadas, podemos agora representar o nosso modelo através de um **sistema linear**. Este sistema será aquele com que trabalharemos ao longo desta dissertação.

Primeiro é necessário reescrever a dinâmica de cada secção em termos da **variável de controlo**, u_i

$$\dot{x}_i = -\frac{x_i}{\tau_i^S} + u_i + \sum_{\substack{j \in \mathcal{I}_i \\ j \neq A}} \beta_{ji} \left(\frac{x_j}{\tau_j^S} - u_j \right) + \eta_{Ai} d \quad (3.14)$$

Esta variável de controlo engloba todas as ações de controlo possíveis do sistema, podendo ser considerada como um **controlo generalizado**.

Posto isto, o nosso **sistema linear** apresenta-se da seguinte forma

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Ed \\ z &= Cx + Du \end{aligned} \quad (3.15)$$

Onde:

- $x = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9)^T \in \mathbb{R}_+^n$ é o **vetor de estado** - consiste na contagem do número de aeronaves em cada secção;
- $u = (u_1, u_2, u_3, u_4, u_5, u_6, u_7, u_8, u_9)^T \in \mathbb{R}^n$ é o **vetor de controlo** de entrada - consiste no controlo aplicado a cada secção;
- d é um escalar que representa qualquer **perturbação** do sistema;
- z é um escalar que representa a **saída controlada** do sistema - n.º de aeronaves na TMA do aeroporto B, por unidade de tempo (equivalente ao valor da taxa de aterragem

do aeroporto B).

Utilizando a equação 3.14 para descrever a dinâmica individual de cada secção, podemos descrever a **dinâmica da rede completa de secções** como

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{-1}{\tau_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\tau_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{14}}{\tau_1} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{15}}{\tau_1} & \frac{\beta_{25}}{\tau_2} & \frac{\beta_{35}}{\tau_3} & 0 & \frac{-1}{\tau_5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta_{36}}{\tau_3} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{47}}{\tau_4} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{48}}{\tau_4} & \frac{\beta_{58}}{\tau_5} & \frac{\beta_{68}}{\tau_6} & 0 & \frac{-1}{\tau_8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{59}}{\tau_5} & \frac{\beta_{69}}{\tau_6} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} \\
 + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_{14} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_{15} & -\beta_{25} & -\beta_{35} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{36} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{47} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{48} & -\beta_{58} & -\beta_{68} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{59} & -\beta_{69} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{A1} \\ \eta_{A2} \\ \eta_{A3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (3.16) \\
 z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau_7} & \frac{1}{\tau_8} & \frac{1}{\tau_9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

Onde o vetor u pode representar taxas de recirculação verdadeiras ou generalizadas, dependendo da interpretação dos números τ_i .

A **saída** z , uma vez que representa o fluxo de saída controlado do sistema, pode ser expressa da seguinte forma

$$z = \sum_{i \in \mathcal{S}_{\mathcal{F}}} \left(\frac{x_i}{\tau_i} - u_i \right) \quad (3.17)$$

Capítulo 4

Sistemas Dinâmicos: Estabilidade e Controlabilidade

4.1 Conceitos sobre Sistemas Dinâmicos

Um **sistema** é um conjunto de fenómenos ou acontecimentos com uma dinâmica própria e que pode ser isolado do resto do universo. O conceito de sistema é uma tentativa de estruturar o nosso conhecimento sobre a natureza.

Considere-se um sistema Σ (físico, matemático, biológico, económico, etc.) caracterizado por um número finito de variáveis $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. Nos instantes t_0 e t_1 , com $t_0 < t_1$, os estados do sistema Σ são especificados por

$$x(t_0) = (x_1(t_0), x_2(t_0), \dots, x_n(t_0)) \text{ e } x(t_1) = (x_1(t_1), x_2(t_1), \dots, x_n(t_1)).$$

Se $x(t_0) \neq x(t_1)$, o estado do sistema evolui no tempo - daí ser chamado de **sistema dinâmico**.

Distinguem-se quatro classes de sistemas, consoante o número de variáveis de entrada e de saída: [47]

- Sistemas SISO (*single input single output*) - sistemas com uma entrada e uma saída;
- Sistemas SIMO (*single input multiple output*) - sistemas com uma entrada e múltiplas saídas;
- Sistemas MISO (*multiple input single output*) - sistemas com múltiplas entradas e uma saída;
- Sistemas MIMO (*multiple input multiple output*) - sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas.

O modelo geral de um sistema controlado é dado por

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x, u) + \eta(t, x, u) \\ y &= h(t, x, u) + \xi(t, x, u) \end{aligned} \quad (4.1)$$

Onde

- $x \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estado;
- $u \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de controlo;
- $y \in \mathbb{R}^r$ é o vetor de saída, ou de observação;
- t é o tempo;
- $f : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^n$ e $h : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^m \rightarrow \mathbb{R}^r$ são duas funções lineares ou não lineares (no geral);
- $\eta(\cdot)$ e $\xi(\cdot)$ representam funções que expressam as incertezas do modelo e das medidas, respetivamente - são funções aleatórias.

A primeira equação do sistema 4.1 chama-se **equação de estado** do sistema - diz-nos como o estado muda ao longo do tempo; enquanto que a segunda modela o modo como as variáveis são medidas para "produzir" as/a saída - por esta razão é chamada de **equação de observação (ou de saída)** do sistema. [47]

Se escolhermos desprezar as incertezas relativas às equações de estado e de saída, o modelo do sistema simplifica-se

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(t, x, u) \\ y &= h(t, x, u) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Além disto, as expressões das funções $f(\cdot)$ e $h(\cdot)$ podem não incluir o tempo, t , explicitamente - neste caso, omite-se a variável t da representação do modelo do sistema. Assim, a forma padrão dos modelos com tais características passa a ser

$$\begin{aligned} \dot{x} &= f(x, u) \\ y &= h(x, u) \end{aligned} \quad (4.3)$$

É sob esta forma particular que se apresentam as equações da dinâmica de voo.

Um dos conceitos mais importantes de sistemas dinâmicos é o conceito de **equilíbrio**. Dizemos que $x_e \in \mathbb{R}^n$ é um **estado de equilíbrio** de um sistema representado pela equação 4.3, se existir um controlo $u_e \in \mathbb{R}^m$, tal que, para qualquer tempo, t :

$$f(x_e, u_e) = 0 \quad (4.4)$$

De modo a encontrar as condições (pontos) de equilíbrio do sistema, bastaria resolver a equação 4.4. [47]

Em torno do estado e do controlo de equilíbrio do sistema, o modelo pode ser **linearizado**,

sendo representado da seguinte forma

$$\begin{aligned}\dot{\bar{x}} &= A\bar{x} + B\bar{u} \\ y &= C\bar{x} + D\bar{u}\end{aligned}\quad (4.5)$$

Onde

- $\bar{x} = x - x_e$ e $\bar{u} = u - u_e$;
- A é a matriz jacobiana de f relativamente ao vetor de estado x para $x = x_e$ e $u = u_e$ - esta matriz descreve como os estados do sistema estão interligados - a dinâmica geral do sistema;
- B é a matriz jacobiana de f relativamente ao vetor de controlo u para $x = x_e$ e $u = u_e$ - esta matriz descreve como as entradas entram no sistema, quais os estados que estão a afetar;
- C é a matriz jacobiana de h relativamente ao vetor de estado x para $x = x_e$ e $u = u_e$ - esta matriz descreve como os estados são combinados para obter as/a saída;
- D é a matriz jacobiana de h relativamente ao vetor de controlo u para $x = x_e$ e $u = u_e$ - esta matriz permite às/à entrada "atravessar" o sistema e alimentar diretamente as/a saída.

O modelo do sistema 3.15, com o qual iremos trabalhar ao longo desta dissertação, é um modelo linearizado.

Iremos agora estudar os conceitos de estabilidade e controlabilidade, assim como analisar a estabilidade e controlabilidade do modelo do nosso sistema.

4.2 Estabilidade e Controlabilidade

Considere-se um sistema dinâmico descrito pela equação diferencial

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) \quad (4.6)$$

Ou, simplesmente,

$$\dot{x} = f(x) \quad (4.7)$$

Onde

- $x \in \mathbb{R}^n$ é o vetor de estado do sistema;
- $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^n$ é uma função qualquer.

Chamamos $S(x_0, t_0, t)$ à solução (comportamento) da equação diferencial 4.7 que se inicie em $x_0 \equiv x(t_0)$, com t_0 sendo o instante inicial - o qual geralmente é igual a 0. [47]

Estabilidade pode ter vários significados, dependendo do tipo de estabilidade a que nos referimos. De um modo geral, um sistema é dito estável se a sua saída estiver sob controle, ou seja, se ele estiver controlado. Se um sistema não for estável, significa que é preciso controlá-lo de forma permanente - ou seja, se não o controlarmos, há garantia de que irá haver **saturação**.

De modo a perceber-se a definição de estabilidade é primeiro necessário definir-se **ponto de equilíbrio**.

Definição 4.1. [47] Um ponto $x^* \in \mathbb{R}^n$ é definido como ponto de equilíbrio do sistema descrito pela equação diferencial 4.7 se: $f(x^*) = 0$.

Definição 4.2. [47] O sistema acima referido é dito **estável** no sentido de Lyapunov em torno do ponto de equilíbrio x^* (do mesmo sistema) se: $\forall \varepsilon > 0, \exists \eta > 0$, tal que para qualquer x_0 satisfazendo $\|x_0 - x^*\| \leq \eta$, tem-se $\|S(x_0, t_0, t) - x^*\| \leq \varepsilon$ para qualquer $t \geq t_0$.

Definição 4.3. [47] O sistema acima referido é dito **assimptoticamente estável** no sentido de Lyapunov em torno do ponto de equilíbrio x^* (do mesmo sistema) se é estável e se: $\exists \eta > 0$ e uma função $\gamma : [t_0, +\infty[\rightarrow [0, +\infty[$ contínua com $\lim_{t \rightarrow +\infty} \gamma(t) = 0$ tal que para qualquer x_0 satisfazendo $\|x_0 - x^*\| \leq \eta$ tem-se, $\|S(x_0, t_0, t) - x^*\| \leq \gamma(t) \cdot \|x_0 - x^*\|$ para qualquer $t \geq t_0$.

É importante salvaguardar a diferença entre estabilidade (simples) e estabilidade assintótica. A estabilidade assintótica garante que o sistema retorna completamente ao equilíbrio, mais cedo ou mais tarde - ou seja, inevitavelmente. Já a estabilidade (simples) assegura que o sistema fica na vizinhança do equilíbrio, sem necessariamente o atingir, mesmo a longo prazo. Assim, estabilidade assintótica implica estabilidade (simples).

No que diz respeito à **controlabilidade**, um sistema tanto pode ser de **estado controlável** como de **saída/observação controlável**. Neste contexto, apresentamos as 2 seguintes definições.

Definição 4.4. [47] Um sistema é de **estado controlável** se se pode guiar (ou “forçar”) o sistema a ir de um qualquer estado até atingir um outro (qualquer) estado, dentro de um prazo finito.

Definição 4.5. [47] Um sistema é de **saída/observação controlável** se se pode guiar (ou “forçar”) a saída deste sistema a ter, dentro de um prazo finito, qualquer valor (de saída) previamente imposto; isto é, se for possível conduzir o sistema de uma observação qualquer y_i para uma outra qualquer y_f , dentro do espaço de observações e num prazo

finito.

Por fim, outra definição importante para o nosso trabalho é a de matriz **definida positiva**.

Definição 4.6. [47] *Seja $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ uma função com valores escalares.*

- *V é dita **positivamente definida** se: $\forall x \neq 0, V(x) > 0$ e $V(x) = 0$ para $x = 0$. V é **positivamente semidefinida** se: $\forall x \neq 0, V(x) \geq 0$ e $V(x) = 0$ para $x = 0$.*
- *V é dita **negativamente definida** se: $\forall x \neq 0, V(x) < 0$ e $V(x) = 0$ para $x = 0$. V é **negativamente semidefinida** se: $\forall x \neq 0, V(x) \leq 0$ e $V(x) = 0$ para $x = 0$.*

Posteriormente, veremos que uma maneira mais simples de saber se uma matriz é definida positiva é através do cálculo dos seus valores próprios. No caso de uma matriz simétrica, esta é definida positiva se as partes reais de todos os seus valores próprios forem positivas. Para uma matriz quadrada não simétrica, por exemplo uma matriz B , esta é definida positiva se todos os valores próprios da matriz $\frac{B+B^T}{2}$ forem positivos. [48]

4.3 Análise da Estabilidade e Controlabilidade

4.3.1 Estabilidade

Existem métodos diretos e indiretos para estudar a estabilidade de um sistema. No que diz respeito aos **métodos diretos**, existem dois teoremas que vale a pena referir.

Teorema 4.1. [47] **Estabilidade de Lyapunov:** *Um sistema é estável na vizinhança de um ponto de equilíbrio ou de referência, x^* , se existir uma função escalar $V : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ satisfazendo as seguintes condições:*

1. *V é contínua e possui derivadas parciais contínuas numa vizinhança Ω de x^* .*
2. *V é positivamente definida em Ω , isto é: $\forall x \in \Omega \setminus \{x^*\}, V(x) > 0$ e $V(x^*) = 0$.*
3. *\dot{V} é negativamente semidefinida em Ω , isto é: $\forall x \in \Omega \setminus \{x^*\}, \dot{V}(x) \leq 0$.*

Substituindo a semidefinição negativa na condição 3 pela definição negativa obtemos o segundo teorema - o Teorema da Estabilidade Assintótica de *Lyapunov*.

Os dois teoremas permitem analisar a estabilidade (assintótica) local, ou seja, a estabilidade na vizinhança de um ponto de equilíbrio. Para analisar a estabilidade (assintótica) global de um sistema, relativamente a um ponto de equilíbrio, é necessário substituir o domínio ω por todo o espaço \mathbb{R}^n .

Outro teorema relevante é o **Teorema da Linearidade Local de Lyapunov** [49]. Se-

gundo este, um sistema dinâmico não linear tem um comportamento linear na vizinhança dos seus pontos de equilíbrio. Portanto, na vizinhança de tais pontos, o modelo linearizado do sistema é próximo do seu modelo não linear. Assim, pode analisar-se a estabilidade de um sistema em torno de um ponto de equilíbrio através da análise do seu modelo linearizado (em torno desse mesmo ponto) - esta análise corresponde ao **método indireto**.

No âmbito desta análise indireta, recorre-se ao **Teorema de Poincaré-Lyapunov** [49]. Este teorema requer determinar os valores próprios do sistema para a análise do mesmo. No caso de um **sistema linear**, este é estável se **todos os valores próprios** da sua matriz A possuírem a sua **parte real negativa**.

Considere-se então o modelo linear do nosso sistema:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Ed \\ z &= Cx + Du \end{aligned} \quad (4.8)$$

As matrizes A , B , E , C e D são tais como apresentadas no capítulo 3,

$$A = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\tau_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\tau_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{14}}{\tau_1} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{15}}{\tau_1} & \frac{\beta_{25}}{\tau_2} & \frac{\beta_{35}}{\tau_3} & 0 & \frac{-1}{\tau_5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta_{36}}{\tau_3} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{47}}{\tau_4} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{48}}{\tau_4} & \frac{\beta_{58}}{\tau_5} & \frac{\beta_{68}}{\tau_6} & 0 & \frac{-1}{\tau_8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{59}}{\tau_5} & \frac{\beta_{69}}{\tau_6} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_9} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_{14} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_{15} & -\beta_{25} & -\beta_{35} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{36} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{47} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{48} & -\beta_{58} & -\beta_{68} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{59} & -\beta_{69} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$E = \begin{bmatrix} \eta_{A1} \\ \eta_{A2} \\ \eta_{A3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau_7} & \frac{1}{\tau_8} & \frac{1}{\tau_9} \end{bmatrix}$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

E onde x representa o vetor de estado do sistema, que consiste no número de aeronaves em cada secção; u é o vetor de controlo do sistema; d é uma variável de entrada do sistema - um escalar que representa qualquer tipo de perturbação; e z é a saída do sistema - um escalar que representa o número de aeronaves na TMA de Lisboa, por unidade de tempo.

Para analisar a estabilidade do sistema, seguindo o Teorema de *Poincaré-Lyapunov*, apenas é necessário utilizar a sua matriz A. Com os valores de parâmetro estipulados de velocidade (v), em cada secção, e respetivos comprimentos das mesmas (Ω), obtiveram-se os valores de τ correspondentes. Esses valores são como se segue

$v_1 = 380$	$\Omega_1 = 100$
$v_2 = 400$	$\Omega_2 = 100$
$v_3 = 475$	$\Omega_3 = 100$
$v_4 = 420$	$\Omega_4 = 80$
$v_5 = 420$	$\Omega_5 = 90$
$v_6 = 440$	$\Omega_6 = 90$
$v_7 = 400$	$\Omega_7 = 100$
$v_8 = 450$	$\Omega_8 = 90$
$v_9 = 500$	$\Omega_9 = 90$

Com os correspondentes valores de τ_i

$\tau_1 = 0.222$	$\tau_2 = 0.250$	$\tau_3 = 0.211$	$\tau_4 = 0.190$
$\tau_5 = 0.214$	$\tau_6 = 0.205$	$\tau_7 = 0.250$	$\tau_8 = 0.200$
$\tau_9 = 0.180$			

Onde as unidades utilizadas para v_i , Ω_i e τ_i foram, respetivamente, $\frac{NM}{h}$ (milha náutica/hora), NM e h .

Os valores para o parâmetro β_{ij} utilizados foram os seguintes

$$\begin{array}{cccccc}
\beta_{A1} = 0.2 & \beta_{A2} = 0.4 & \beta_{A3} = 0.4 & \beta_{14} = 0.8 & \beta_{15} = 0.2 \\
\beta_{35} = 0.4 & \beta_{36} = 0.6 & \beta_{47} = 0.5 & \beta_{48} = 0.5 & \beta_{58} = 0.4 \\
& \beta_{68} = 0.3 & \beta_{59} = 0.6 & \beta_{69} = 0.7 &
\end{array}$$

Com todos os outros valores de β_{ij} ¹ a serem iguais a 1 - seguindo a estrutura do modelo 3.3.

Os valores de v_i para as diferentes secções foram arbitrados, com base num breve estudo feito às velocidades de cruzeiro máximas dos aviões comerciais mais comuns. Os valores de Ω_i foram igualmente arbitrados - com base no comprimento do trajeto percorrido pelas aeronaves, em milhas náuticas, entre Madrid e Lisboa - o qual é estatisticamente igual para todos os voos.

O parâmetro β_{ij} representa a fração do fluxo de tráfego que flui desde a secção i até à secção j - ou seja, no caso do fluxo desde o aeroporto A até à secção 1, representa o número de voos de A para 1, dividido pelo número total de voos que deixa o aeroporto A em direção ao aeroporto B. Estes valores de β_{ij} foram calculados com base em dados históricos do ano de 2018, de janeiro a dezembro, retirados do site *flightradar24*.

Posto isto, a matriz A vem

$$A = \begin{bmatrix}
-4.5045 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & -4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & -0.0047 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
3.6036 & 0 & 0 & -5.2632 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0.9009 & 4 & 1.8957 & 0 & -4.6729 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 2.8436 & 0 & 0 & -4.8780 & 0 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 2.6316 & 0 & 0 & -4 & 0 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 2.6316 & 1.8692 & 1.4634 & 0 & -5 & 0 \\
0 & 0 & 0 & 0 & 2.8037 & 3.4146 & 0 & 0 & -5.5556
\end{bmatrix} \quad (4.9)$$

Com recurso ao programa *MATLAB R2020b*, calcularam-se os valores próprios da matriz A , utilizando a função *eig*. Os resultados obtidos foram os seguintes:

$$vp_real = \begin{bmatrix}
-5 \\
-4 \\
-5.5556 \\
-5.2632 \\
-4.6729 \\
-4.5045 \\
-4 \\
-4.8780 \\
-0.0047
\end{bmatrix}$$

¹De referir que, a partir daqui, os valores de η_{Ai} , uma vez que também representam frações de fluxo de tráfego de aeronaves, serão representados por β_{ij} .

Uma vez que a parte real de todos os valores próprios do vetor vp_real , vetor dos valores próprios da matriz A , é negativa, podemos concluir que o modelo do nosso sistema é **estável**.

Embora o modelo seja estável - o que representa um ambiente de tráfego aéreo estável - a introdução de estratégias específicas de controlo de fluxo poderá, por vezes, resultar num comportamento tanto estável como instável do sistema. Procedimentos de controlo utilizados na regulação de fluxos de tráfego, como iremos ver posteriormente, são baseados na realimentação de informação relacionada com o estado do fluxo de tráfego aéreo. É bastante reconhecido na teoria de controlo que, até sistemas dinâmicos estáveis se podem tornar instáveis na presença de realimentação.

Posto isto, análises de estabilidade feitas periodicamente poderão ser uma mais valia em revelar uma potencial instabilidade no ambiente de tráfego aéreo.

4.3.2 Controlabilidade

A controlabilidade está associada à capacidade de um sistema de influenciar todos os seus estados através das suas entradas (*input*) - de modo a conseguir obter uma saída desejada. Assim, se o sistema for controlável, significa que, à partida, por meio de um controlo adequado, seremos capazes de cumprir as restrições impostas sobre a saída z .

No caso de um sistema linear, a análise da controlabilidade de estado pode ser feita pela **Caraterização por Kalman**: [47]

Dada uma **matriz de controlabilidade de estado**

$$\Delta = \begin{bmatrix} B & AB & A^2B & \dots & A^{n-1}B \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

O sistema é controlável se a caraterística da matriz de controlabilidade de estado for igual a n - onde n representa a dimensão do vetor de estado x , que no nosso caso é igual a 9.

Assim, a matriz B vem

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.8000 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -0.2000 & -1 & -0.4000 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.6000 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.5000 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -0.5000 & -0.4000 & -0.3000 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -0.6000 & -0.7000 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Com a matriz A já definida anteriormente.

Recorrendo ao programa *MATLAB R2020b* obtivemos a matriz 4.10. Utilizando a função *rank*, calculamos a característica da matriz. Uma vez que a característica obtida é igual a n , podemos concluir que o **estado do sistema é controlável**.

Por sua vez, a análise da controlabilidade da saída/observação de um sistema linear também pode ser feita seguindo a caracterização por *Kalman*, do seguinte modo: [47]

Dada uma **matriz de controlabilidade de observação**

$$\Gamma = \begin{bmatrix} CB & CAB & CA^2B & \dots & CA^{n-1}B & D \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

O sistema é de saída/observação controlável, se a característica da matriz de controlabilidade de saída/observação for igual à dimensão r do espaço de observação - no nosso caso $r = 1$, uma vez que a nossa saída z é um escalar.

Assim, a matriz C vem

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 4 & 5 & 5.5556 \end{bmatrix} \quad (4.13)$$

Com a matriz D já definida anteriormente.

Os cálculos efetuados foram os mesmos que aquando da análise da controlabilidade de estado. Uma vez que característica da matriz obtida é igual à dimensão r , podemos concluir que a **saída/observação do sistema é controlável**.

A informação que a análise da controlabilidade nos permite ter é extremamente valiosa no âmbito de planeamento de estratégias de fluxo de tráfego em casos em que os padrões de tráfego estão constantemente a evoluir. Testes de controlabilidade baseados num modelo Euleriano de fluxo de tráfego podem ser usados como um auxiliar de decisão em matéria de controlo de fluxo em tempo real.

Capítulo 5

Regulação da Capacidade de Fluxo pelo Controle H_∞

5.1 Introdução

No capítulo 3 definimos um sistema linear de espaço de estado (*state-space*) que descreve o fluxo de aeronaves através de uma rede ordenada de secções, no espaço aéreo compreendido entre um aeroporto de partida A, que no nosso caso será o Aeroporto de Madrid, e um aeroporto de chegada B - o Aeroporto de Lisboa. No capítulo 4 estudamos a estabilidade e a controlabilidade desse mesmo sistema - provamos que o sistema era passível de ser estabilizado e controlado.

No presente capítulo, pretendemos dar uma resposta a um problema de gestão de tráfego aéreo, que se apresenta da seguinte forma: se houver uma taxa de chegada imposta no aeroporto de destino, B - por exemplo, só podem chegar 30 aeronaves numa hora - qual deverá ser a taxa de partida de todos os aeroportos cujos voos têm como destino o aeroporto B, assim como taxa de transferência de aeronaves entre as secções do espaço, de modo a que essa taxa seja cumprida?

Vamos ilustrar o problema com um exemplo prático concreto. Considere-se os vários laboratórios que existem no Departamento de Ciências Aeroespaciais na UBI. Imaginemos que cada laboratório só pode ter 2 pessoas dentro simultaneamente e que existe um tempo máximo de permanência em cada um deles. Se uma pessoa se apresentar na secretaria (supomos que é a única entrada), a pessoa responsável pelas entradas e saídas terá que decidir se essa pessoa pode entrar, face a ocupação atual dos laboratórios. Caso não possa, a pessoa da entrada deve ser capaz de dizer quanto tempo a pessoa terá que esperar para entrar na faculdade, em direção aos laboratórios. Suponhamos então que os vários laboratórios são as secções do espaço e que a faculdade de engenharia é a área terminal do aeroporto de Lisboa. É necessário haver um método, um mecanismo, que permita fazer esta gestão de modo a cumprir as restrições impostas.

Propomos resolver este problema de gestão com recurso às ferramentas da teoria de controlo - ou seja, iremos abordar o problema com sendo um **problema de controlo**. Assim, tendo o fluxo de saída, z , imposto (taxa de aterragem imposta no aeroporto de destino), pretendemos controlar o fluxo ao nível das secções, u_i , de modo a satisfazer essa restrição, evitando a saturação. Pretendemos desenvolver um **método de controlo de fluxo de tráfego aéreo** que nos permita atingir esse objetivo.

O objetivo do controlo de fluxo de tráfego aéreo é sintetizar estratégias de partida, chegada e em rota, que resultem num fluxo de aeronaves seguro e fluido. Este processo de controlo pode incluir diversas medidas, tais como: limitação das taxas de partida nos aeroportos de origem, ajustar a velocidade das aeronaves em determinadas secções do espaço, impor taxas de recirculação em determinadas secções, etc.

Um objetivo típico de teoria de controlo é sintetizar uma lei de controlo estática de realimentação (*feedback*) de estado, da forma

$$u = Kx \quad (5.1)$$

Onde x representa o estado do sistema a ser controlado, u representa a entrada (*input*) de controlo e K representa a matriz de realimentação.

5.2 Definição do Problema de Controlo Robusto

Relembrando o modelo do sistema apresentado na secção 3.5

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu + Ed \\ z &= Cx + Du \end{aligned} \quad (5.2)$$

Onde, mais uma vez, $x(t) \in \mathbb{R}^n$ é o estado, $u(t) \in \mathbb{R}^n$ é a variável de controlo, para todo $t \geq 0$, enquanto $d(t) \in \mathbb{R}$ representa qualquer distúrbio e, por fim, $z(t) \in \mathbb{R}$ é a saída do sistema.

Relembrando também que z é definida como

$$z = \sum_{i \in \mathcal{S}_{\mathcal{F}}} f_i \quad (5.3)$$

Onde f_i corresponde ao fluxo de aeronaves que sai de cada secção.

O nosso objetivo é projetar uma lei de controlo estática com realimentação de estado, que seja capaz de estabilizar o sistema em circuito fechado (*closed-loop*), conduzindo a um comportamento satisfatório da saída z - enquanto satisfaz as restrições impostas na secção 3.4.2, as quais relembramos aqui por conveniência

Restrição 1

$$0 \leq u(t) \leq u(t)_{max}, \forall t \geq 0 \quad (5.4)$$

Restrição 2

$$u(t) = Kx(t) \quad (5.5)$$

Para uma matriz qualquer K .

Relembrando também que a restrição 1 corresponde a um limite no fluxo de aeronaves disponível para controlo, nomeadamente recirculação, em cada secção - a qual toma a forma de $0 \leq u_i(t) \leq r_i \frac{x_i}{\tau_i}$.

Mais precisamente, temos o objetivo de regular o fluxo de tráfego ao nível das secções do espaço aéreo de modo a cumprir restrições de capacidade impostas sobre z - evitando que o aeroporto de destino entre em saturação, mesmo na presença de distúrbios.

Importante referir que, uma vez que modelamos o espaço aéreo entre Madrid e Lisboa, temos em conta todas as aeronaves que atravessam essa porção do espaço tendo como destino o aeroporto de Lisboa, e não apenas as aeronaves que partem de Madrid em direção ao Aeroporto Humberto Delgado. Assim, o controlo é feito ao nível das secções.

Num problema de **regulação**, a ação de controlo passa por forçar a evolução do sistema a atingir um determinado sinal de referência assintoticamente, na presença de distúrbios externos a atuarem sobre o sistema. De modo a cumprirmos restrições de capacidade impostas sobre a saída z , iremos medir o desempenho do sistema em circuito fechado através da comparação de z a um valor de referência desejado - o qual chamamos de r_e . Este valor, assim como a saída z , são representados por movimentos/hora.

A cada passo de simulação medimos o erro e associado à diferença $z - r_e$, tendo como objetivo minimizar e , sendo este representado por

$$\begin{aligned} e &= z - r_e \\ &= \sum_{i \in \mathcal{S}_{\mathcal{F}}} \left(\frac{x_i}{\tau_i} - u_i \right) - r_e \quad (5.6) \\ &= Cx - r_e \end{aligned}$$

Por outras palavras, pretendemos fazer a regulação assintótica de r_e em circuito fechado.

5.3 Design de um Controlador Robusto H_∞

Nesta secção iremos apresentar um método de controlo baseado na teoria de controlo H_∞ . Com o problema de controlo claramente definido na secção 5.2, podemos agora derivar as condições necessárias para a projeção de um controlador que cumpra os nossos objetivos.

Optamos por utilizar uma estrutura de design do controlador do tipo **PI - Proportional Plus Integral**. A motivação para tal recai sobre o facto de termos objetivos de controlo que incluem especificações práticas de design que de outra forma se tornariam difíceis de incluir. [50]

Um controlo PI é um caso particular de um controlador PID (*Proportional Plus Integral Plus Derivative*). Aqui, o controlo tenta corrigir o erro entre uma variável da planta medida e

um valor desejado através do cálculo da diferença entre eles e uma posterior ação corretiva, de modo a ajustar o processo de controle de acordo com o desejado. Um controlador PID controla um processo através de três parâmetros: proporcional (P), integral (I) e derivativo (D). [51]

Um controle proporcional e integral (PI) é um tipo de controlador proporcional melhorado com ação integral. Um controle proporcional pode ser entendido da seguinte forma: a mudança na saída do sistema é proporcional ao sinal de entrada produzido pelo erro - por isso, quanto maior é o erro, maior será a ação corretiva aplicada. Já o sinal de saída de um controlador integral é determinado pela integral do erro calculado ao longo de todo o processo. Assim, um controle PI correlaciona a saída do sistema, o erro e a integral do erro - tal como é feito em [50].

Considere-se então o sistema *aumentado* Σ , representado pela equação 5.7 - o qual consiste da planta do sistema a ser controlado (3.15) e os seus integradores

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) + B_r r_e(t) + Ed(t) \\ z(t) &= Cx(t) \end{aligned} \quad (5.7)$$

Com,

$$A = \begin{bmatrix} A_p & 0 \\ C_p & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} B_p \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} C_p & 0 \end{bmatrix}, \quad B_r = \begin{bmatrix} 0 \\ -I \end{bmatrix}$$

Onde

- $x(t) = \begin{bmatrix} x_p(t) \\ x_e(t) \end{bmatrix}$, $x(t) \in \mathbb{R}^m$ é o vetor de estado com
- $x_e = \int_0^t [z(t) - r_e(t)] dt$, $x_e(t) \in \mathbb{R}^n$ sendo o estado integrador e
- $x_p(t) \in \mathbb{R}^{m_p}$ o estado da planta;
- $z(t) \in \mathbb{R}^n$ é a saída controlada do sistema;
- $u(t) \in \mathbb{R}^q$ é a entrada de controle com $q \geq n$;
- $r_e(t) \in \mathbb{R}^n$ é o sinal de referência;
- $A \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $B \in \mathbb{R}^{m \times q}$, $C \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $A_p \in \mathbb{R}^{m_p \times m_p}$, $B_p \in \mathbb{R}^{m_p \times q}$, $C_p \in \mathbb{R}^{n \times m_p}$.

Uma vez que utilizamos um controlador robusto H_∞ , $Du(t)$ está implícito na equação de

$z(t)$, sendo assumido como uma perturbação que o sistema é capaz de suportar. Além disto, é assumido que todas as funções-peso foram absorvidas pela planta 5.7 - tal é um procedimento comum na teoria de controlo de H_∞ .

A classe de controladores considerada para o sistema 5.7 é do tipo linear, invariante no tempo com realimentação de estado e é definida pela equação

$$u = Kx \quad (5.8)$$

Estamos interessados em computar a **matriz de ganho de realimentação** da forma

$$K = \begin{bmatrix} K_1 & K_2 \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

O que nos leva a

$$\begin{aligned} u(t) &= Kx(t) \\ &= K_1 x_p(t) + K_2 x_e(t) \end{aligned} \quad (5.10)$$

Uma vez que não impomos nenhum padrão de dispersão específico à matriz K , a simples escolha por uma lei de controlo da forma $u = Kx$ cumpre a restrição 2 imposta.

A abordagem moderna para caraterizar os objetivos de desempenho em circuito fechado consiste em medir o tamanho de certas **matrizes de função de transferência**, utilizando para isso normas de matrizes. A norma de uma matriz fornece informação acerca de quão grande certos sinais de saída (*output*) podem ser para determinada classe de sinais de entrada (*input*). [52]

Assim, deixemos $T_s(s) := E[sI - (A + BK)]^{-1}D$ denotar a função de transferência desde o sinal de entrada d até à saída z . [53] Definimos então uma constante

$$\gamma_s := \inf \{ \|T_s\|_\infty : K \in S \} \quad (5.11)$$

Onde,

$$S := \{ K \in \mathbb{R}^{m \times n} : A + BK \text{ é uma matriz de estabilidade} \} \quad (5.12)$$

E apresentamos a definição 5.1.

Definição 5.1. [53] *Deixemos uma constante $\gamma > 0$ ser dada. O sistema 5.7 é dito estabilizável (via realimentação de estado estático) com atenuação de distúrbio γ se existir um controlador Σ_s , tal que o sistema em circuito fechado é internamente estável e a função de transferência em circuito fechado desde o distúrbio d até à saída controlada z , isto é, $T_s(s) := E[sI - (A + BK)]^{-1}D$, satisfaz*

$$T_s'(-j\omega)T_s(j\omega) \leq \gamma^2 I \quad (5.13)$$

Para todo $\omega \in \mathbb{R}$.

Esta expressão é equivalente a

$$\|T_s\|_\infty \leq \gamma \quad (5.14)$$

O desempenho do sistema é medido pela sua norma infinita (5.14). Assim, qualquer valor de γ que satisfaça a condição 5.14, para um sistema específico, dá-nos um limite superior do desempenho desse sistema, assim como uma garantia de estabilidade interna. De modo a provar que tal condição é satisfeita, é necessário resolver uma equação de *Riccati*. Para isso, apresentamos a seguinte definição.

Definição 5.2. [53] Deixemos $Q \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e $R \in \mathbb{R}^{m \times m}$ serem duas matrizes positivas definidas dadas. Para uma dada constante $\gamma > 0$, o sistema Σ satisfaz ARE com constante de atenuação γ se existir um $\varepsilon > 0$ de tal modo que a equação de *Riccati*

$$PA + A^T P - \frac{1}{\varepsilon} P B R^{-1} B^T P + \frac{1}{\gamma} P E E^T P + \frac{1}{\gamma} C^T E + \varepsilon Q = 0 \quad (5.15)$$

tem um solução positiva definida $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$.

É pertinente referir a relevância de ε - é um parâmetro de design que influencia diretamente os valores possíveis de γ . Reparámos que quanto maior era o ε , maior o γ_{min} .

Um dos problemas inicialmente encontrados na resolução da equação 5.15 foi a multiplicação de variáveis de matrizes - os termos não lineares tornavam o problema não convexo e, por isso, bastante difícil de resolver. Através da substituição de variáveis, transformamos um problema de H_∞ num problema de LQR, mais simples. O procedimento utilizado foi tal como em [54], como se segue:

$$PA + A^T P - \frac{1}{\varepsilon} P B R^{-1} B^T P + \frac{1}{\gamma} P E E^T P + \frac{1}{\gamma} C^T C + \varepsilon Q = 0$$

1. Fatorizar P :

$$PA + A^T P - P \left(\frac{1}{\varepsilon} B R^{-1} B^T - \frac{1}{\gamma} E E^T \right) P + \frac{1}{\gamma} C^T C + \varepsilon Q = 0$$

2. Criar uma matriz nova - F :

$$F = \frac{1}{\varepsilon} B R^{-1} B^T - \frac{1}{\gamma} E E^T$$

3. Criar nova matriz Q - \bar{Q} :

$$\bar{Q} = \frac{1}{\gamma} C^T C + \varepsilon Q$$

4. Transformar equação de *Riccati* de H_∞ numa equação de *Riccati* de LQR:

$$F = GG^T (*) \Leftrightarrow$$

$$PA + A^T P - PGG^T P + \bar{Q} = 0$$

$$(*) G = \text{sqr}tm(F)$$

Com F sendo uma matriz definida positiva.

Posto isto, o sistema 5.7 é necessariamente de saída controlável se a equação de *Riccati* simplificada, apresentada no ponto 4, tiver uma solução P definida positiva.

Interessa-nos computar o valor mínimo de γ - este valor dá-nos uma garantia de desempenho do sistema em circuito fechado. Qualquer valor de γ superior ao γ_{min} será capaz de estabilizar o sistema. É, no entanto, importante referir que o valor ótimo de γ , aquele que nos confere o melhor controlo possível, não será necessariamente o γ_{min} , como veremos mais à frente. Cabe ao utilizador escolher o γ adequado às suas necessidades/requisito do sistema.

Como sabemos, não é possível cancelar totalmente os efeitos das perturbações sobre o sistema a ser estudado. Contudo, a teoria de controlo H_∞ permite encontrar um compromisso entre a exigência do utilizador e a magnitude máxima das perturbações que o sistema é capaz de sofrer, através da escolha de um γ adequado.

Neste contexto, o processo de escolha de γ foi iterativo, do seguinte modo:

Minimizar : γ

Sujeito a: Satisfazer (5.14), (5.15); valores da matriz G serem todos reais

Reparamos que ao longo do processo iterativo da escolha do γ , a matriz G poderia tomar valores imaginários - assim, houve a necessidade de impor a condição de que todos os valores fossem reais explicitamente.

Dadas as definições 5.1 e 5.2, apresentamos agora o seguinte teorema.

Teorema 5.1. [53] *Supõe-se que o sistema definido em 5.7 satisfaz ARE com constante de atenuação γ . Além disso, a matriz de realimentação de estado $K := -R^{-1}B'P/2\varepsilon$ serve este propósito. Por outro lado, deixemos $\gamma > 0$ ser dado e supomos que existe uma constante $\delta \in (0, \gamma)$ de tal modo que o sistema Σ é estabilizável com constante de atenuação $\gamma - \delta$. Assim, o sistema Σ deve satisfazer ARE com constante de atenuação γ para quaisquer matrizes positivas-definidas Q e R .*

De modo a testar adicionalmente se o sistema é estabilizável com constante de atenuação de perturbação γ , apresentamos uma condição alternativa à definição 5.15, sob a forma de uma proposição.

Proposição 5.1. [53] Considere-se o sistema linear e invariante no tempo definido em (5.7). Deixemos $\gamma > 0$ ser dado. Assim, o sistema Σ satisfaz ARE com constante de atenuação γ para quaisquer matrizes definidas positivas Q e R se, e só se, existir uma constante $\alpha > 0$, uma matriz definida positiva $P \in \mathbb{R}^{n \times n}$ e uma matriz constante $K \in \mathbb{R}^{m \times n}$, de tal modo que a seguinte desigualdade se mantém para todo $x \in \mathbb{R}^n$:

$$x^T \left[P(A + BK) + (A + BK)^T P + \frac{1}{\gamma} P D D^T P + \frac{1}{\gamma} E^T E \right] x \leq -\alpha \|x\|^2 \quad (5.16)$$

Onde $\alpha = \varepsilon \lambda$, com λ a ser o menor valor próprio da matriz definida positiva Q .

A proposição 5.1, a par da definição 5.15, servem como prova de que o sistema 5.7 é **estabilizável** em circuito fechado, com um γ e um ε que garantam a igualdade 5.15, duas matrizes Q e R definidas positivas, um $\alpha > 0$ e a existência de uma solução definida positiva P da equação de *Riccati* (5.15), utilizando uma lei de controlo de realimentação de estado estático - $u = Kx$.

Uma vez encontrado o γ mínimo e tendo em conta que a nossa equação de *Riccati* está escrita sob a forma de uma equação de LQR, podemos agora utilizar a ferramenta do MATLAB, lqr - utilizando as matrizes A , G , \bar{Q} e R - para achar a solução positiva definida da equação de *Riccati*, P .

Tendo obtido P , substituímos o seu valor em $K := -R^{-1} B' P / 2\varepsilon$, o que nos dará diretamente uma matriz de realimentação K .

5.4 Simulação do Controlador com MATLAB

Nesta secção aplicamos o controlador projetado na secção anterior ao sistema 3.15 apresentado no capítulo 3.

Relembramos aqui a dinâmica do sistema 3.15

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \\ \dot{x}_5 \\ \dot{x}_6 \\ \dot{x}_7 \\ \dot{x}_8 \\ \dot{x}_9 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{\tau_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-1}{\tau_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{14}}{\tau_1} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_4} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{\beta_{15}}{\tau_1} & \frac{\beta_{25}}{\tau_2} & \frac{\beta_{35}}{\tau_3} & 0 & \frac{-1}{\tau_5} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\beta_{36}}{\tau_3} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{47}}{\tau_4} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_7} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{48}}{\tau_4} & \frac{\beta_{58}}{\tau_5} & \frac{\beta_{68}}{\tau_6} & 0 & \frac{-1}{\tau_8} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{\beta_{59}}{\tau_5} & \frac{\beta_{69}}{\tau_6} & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix}$$

$$\begin{aligned}
& + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_{14} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\beta_{15} & -\beta_{25} & -\beta_{35} & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\beta_{36} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{47} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\beta_{48} & -\beta_{58} & -\beta_{68} & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\beta_{59} & -\beta_{69} & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_{A1} \\ \eta_{A2} \\ \eta_{A3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} d \quad (5.17) \\
z = & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau_7} & \frac{1}{\tau_8} & \frac{1}{\tau_9} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \\ x_7 \\ x_8 \\ x_9 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \\ u_4 \\ u_5 \\ u_6 \\ u_7 \\ u_8 \\ u_9 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

Os parâmetros de design utilizados no projeto do controlador, e posteriormente na simulação, foram apresentados no capítulo 4. Iremos reproduzi-los aqui por conveniência

$$\begin{array}{ll}
v_1 = 380 & \Omega_1 = 100 \\
v_2 = 400 & \Omega_2 = 100 \\
v_3 = 475 & \Omega_3 = 100 \\
v_4 = 420 & \Omega_4 = 80 \\
v_5 = 420 & \Omega_5 = 90 \\
v_6 = 440 & \Omega_6 = 90 \\
v_7 = 400 & \Omega_7 = 100 \\
v_8 = 450 & \Omega_8 = 90 \\
v_9 = 500 & \Omega_9 = 90
\end{array}$$

Com os correspondentes valores de τ_i

$$\begin{array}{llll}
\tau_1 = 0.222 & \tau_2 = 0.250 & \tau_3 = 0.211 & \tau_4 = 0.190 \\
\tau_5 = 0.214 & \tau_6 = 0.205 & \tau_7 = 0.250 & \tau_8 = 0.200 \\
\tau_9 = 0.180 & & &
\end{array}$$

Onde as unidades utilizadas para v_i , Ω_i e τ_i são, respectivamente, $\frac{NM}{h}$ (milha náutica/hora), NM e h .

Os valores para o parâmetro β_{ij} utilizados foram os seguintes

$$\begin{array}{lllll}
\beta_{A1} = 0.2 & \beta_{A2} = 0.4 & \beta_{A3} = 0.4 & \beta_{14} = 0.8 & \beta_{15} = 0.2 \\
\beta_{35} = 0.4 & \beta_{36} = 0.6 & \beta_{47} = 0.5 & \beta_{48} = 0.5 & \beta_{58} = 0.4 \\
\beta_{68} = 0.3 & \beta_{59} = 0.6 & \beta_{69} = 0.7 & &
\end{array}$$

Com todos os outros valores de β_{ij} a serem iguais a 1.

O nosso objetivo é igualar a nossa saída z a uma referência desejada r_e , em circuito fechado, garantindo que z tem um comportamento satisfatório - estabilizando assim o sistema.

A variável r_e corresponde à referência efetiva - para a qual consideramos um valor realista da capacidade de movimentos/hora do Aeroporto Humberto Delgado. Tal valor não é constante, pois, realisticamente, a capacidade máxima disponível pode variar ao longo do dia. Os valores foram arbitrados segundo conhecimento geral de valores admissíveis. Por conveniência, será também apresentada uma referência teórica, correspondente a um valor máximo de capacidade - o qual é um valor característico do aeroporto e não deve ser ultrapassado. Esta referência teórica tem o valor de 44 movimentos/hora.

É importante referir que reparamos que alguns dos estados se tornavam negativos ao longo do tempo. Uma vez que os estados representam o número de aeronaves em cada secção, e esta só pode ser uma quantidade positiva, tornou-se necessário impor explicitamente essa restrição de positividade.

O sistema foi simulado ao longo de 5 horas, numa tentativa de capturar as horas de maior tráfego no aeroporto de Lisboa. A variável de perturbação, d , foi definida seguindo uma distribuição normal. O sistema foi simulado para vários controladores diferentes - valores de γ e ε diferentes - o valor de γ escolhido foi de 0.1 e o de ε de 0.02.

A matriz Q foi escolhida de tal modo a ser uma matriz diagonal, com todos os seus elementos iguais a 100. Ao passo que a matriz R escolhida foi a matriz identidade. Assim, a constante de Lyapunov α é igual a 2, uma vez que $\alpha = \varepsilon\lambda$. Posto isto, estão reunidas as condições que nos garantem que o sistema é estabilizável em circuito fechado.

Por fim, as condições iniciais utilizadas foram

$$\begin{aligned}x_0 &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T \\u_0 &= [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T\end{aligned}\quad (5.18)$$

Nestas condições, o erro inicial é de 40 aeronaves.

5.5 Exemplo de Aplicação: Resultados Gráficos

Nesta secção serão apresentados os resultados gráficos obtidos pela aplicação do controlador ao nosso modelo de sistema, assim como uma aplicação teórica. Todas as simulações e gráficos foram obtidos com recurso ao MATLAB.

5.5.1 Aplicação teórica: modelo de 4 secções

Em primeiro lugar iremos analisar os resultados obtidos para um modelo de sistema de apenas 4 secções - mais simples, com valores de velocidade, tempo de travessia e comprimento de secções arbitrados, tendo como referência os valores apresentados em [36].

Notamos que o valor de γ que nos confere o menor limite superior possível da norma infinita da função de transferência T_s , em circuito fechado, não era o mais apropriado - tanto na aplicação teórica como na prática. Assim, depois de várias simulações, optamos por escolher um $\gamma = 1$ para um valor de $\varepsilon = 0.02$.

A influência do parâmetro r é mínima - no entanto, experiências numéricas mostraram-nos que o valor mais indicado de r era 1, uma vez que permitia uma maior liberdade à ação do controlador - o que é esperado uma vez que $r = 1$ diz-nos que todas as aeronaves numa secção estão disponíveis para controlo, nomeadamente recirculação de aeronaves.

O sistema foi simulado com um passo de $h = 0.01$, durante 5 horas. Os resultados obtidos estão representados no gráfico 5.1.

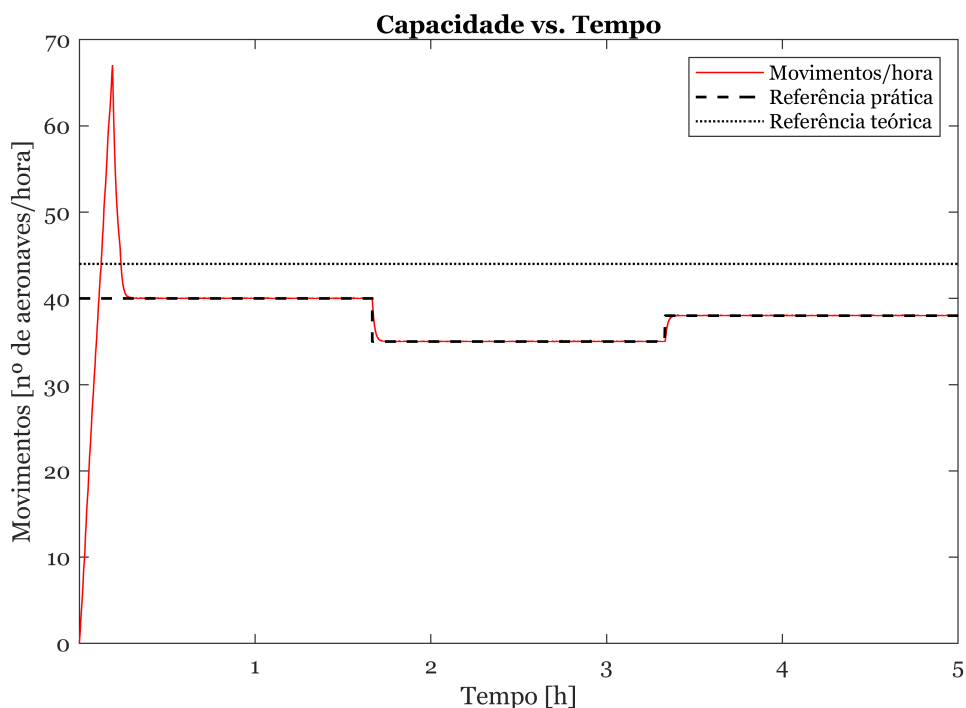


Figura 5.1: Variação da capacidade de um sistema com 4 secções ao longo de 5 horas

Inicialmente observa-se um sobre-esforço denunciado do controlador - natural, tendo em conta a natureza do controlador em questão. A utilização de um controlo proporcional faz com que a saída inicial do sistema seja tanto maior quanto o erro inicial. Com as condições iniciais escolhidas, o erro inicial é de 40 aeronaves. Quando este tipo de controlo é aliado a um controlo integral, a resposta da saída do sistema, z , a um erro inicial, dá origem a um

desvio inicial ainda maior devido a uma contribuição no sinal de saída vinda do controlo integral. Além disto, este sobre-esforço observado pode ser resultado da própria natureza do sistema, mais concretamente da localização dos valores próprios da matriz A realimentada.

Tornou-se claro que simular o sistema com condições iniciais iguais a 0 não era o mais indicado, tal como se observa em [36]. No entanto, se formos capazes de entender o funcionamento de um sistema com condições iniciais nulas, facilmente derivamos as respostas do sistema com diferentes condições iniciais, dada a natureza linear e invariante no tempo do nosso sistema - daí a nossa escolha.

Uma consequência deste sobre-esforço inicial é o facto do sistema permanecer acima da referência teórica durante cerca de 7 minutos. Adicionalmente, o sistema apenas segue a referência, pela primeira vez, 18 minutos após o início da simulação. Isto é explicado pelo simples facto da rede de secções utilizada ser bastante grande, em termos de distância percorrida pelas aeronaves até ao aeroporto de destino. Reparámos que este atraso observado aumenta com o tamanho da rede de secções.

5.5.2 Aplicação prática: modelo de 9 secções entre Madrid e Lisboa

Nesta sub-secção apresentamos os resultados obtidos pela aplicação de um controlador projetado na secção 5.3 ao modelo Euleriano de 9 secções desenvolvido no capítulo 3.

O sistema foi simulado para vários controladores diferentes, com o melhor resultado a ser obtido com um $\gamma = 0.1$ (para $\varepsilon = 0.02$). É pertinente referir que a influência de γ sobre o controlador não é linear - foram obtidos resultados aceitáveis tanto para γ altos, na ordem dos 10^1 , como para γ baixos, na ordem dos 10^{-1} .

Os resultados obtidos são apresentados no gráfico 5.2.

Uma vez que o nosso sistema constitui uma rede de espaço aéreo menor que o sistema de 4 secções (isto é comprovado através da comparação dos valores de Ω_i de ambos os modelos), é expectável que o sistema atinja a referência mais cedo, como se pode verificar através do gráfico 5.2. Assim, o sistema "apanha" a referência em, sensivelmente, 1 minuto.

O sobre-esforço inicial, tal como discutido no gráfico das 4 secções, pode ser devido a vários fatores - no entanto, a presença do mesmo existirá sempre uma vez que é da natureza do próprio sistema, mais propriamente da localização dos valores próprios da matriz A realimentada. O sistema permanece acima da referência teórica durante, aproximadamente, 16 segundos - valor totalmente desprezável dada a natureza do nosso problema.

É evidente a constante oscilação do sistema em torno da referência, o que significa que o erro nunca chega a ser nulo. Contudo, o nosso foco principal não é necessariamente que o erro seja igual a 0, mas sim que o sistema seja capaz de seguir a referência ao longo do tempo mesmo na presença de distúrbios - o que é cumprido de forma bastante satisfatória. O erro ao longo

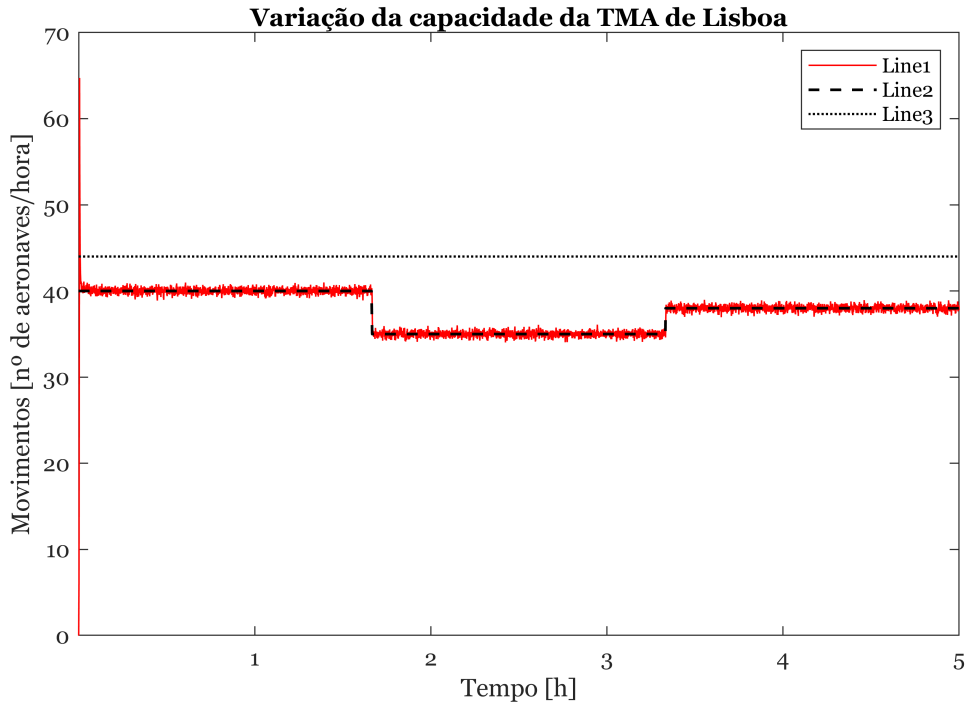


Figura 5.2: Variação da capacidade da TMA do aeroporto de Lisboa, com $\gamma = 0.1$, durante 5 horas

das 5 horas foi sensivelmente de 1 aeronave por hora, valor que consideramos admissível.

Todavia, esta oscilação pode ser explicada de várias formas. Teoricamente, e para este tipo de controlo, este efeito pode ser devido à presença de dinâmicas do sistema que não foram modeladas adequadamente, como nos mostra [55]. Geralmente, o melhor desempenho alcançável de um sistema de controlo depende do desempenho de sensores e atuadores, disponibilidade de conhecimento acerca do sistema - isto é, as suas variáveis, dinâmicas, qualidade, etc. - e a disponibilidade de medição de variáveis do sistema. Uma vez que o modelo utilizado por nós nunca pode capturar totalmente a dinâmica do sistema, não é possível obter naturalmente um controlo sem oscilações. Há, contudo, métodos que permitem reduzir tais oscilações - mas neste caso, haverá uma compensação entre a "suavidade" da resposta do sistema e a sua robustez em circuito fechado, o que comprometeria a sua capacidade para lidar com perturbações externas.

Além disto, é importante salvaguardar que, tal como em [9], as restrições referentes ao controlo só são impostas após a entrada de controlo ter sido calculada através da matriz de realimentação K . Isto compromete o desempenho do controlador e garantias de estabilidade em circuito fechado, em prol de uma maior simplificação do processo de design do controlador.

Embora a estabilização do sistema em circuito fechado não seja atingida totalmente, o sistema controlado apresenta um comportamento satisfatório, de acordo com os objetivos por nós traçados - o sistema seguir uma referência variável imposta sem ultrapassar a referência teórica. Assim, podemos concluir que o método de controlo implementado é eficaz e,

por isso, permite-nos garantir o cumprimento das restrições de capacidade impostas sob o aeroporto de Lisboa.

Além destes dois resultados que provam a eficiência do método de controlo, foram também feitas simulações para casos em que o controlo não foi limitado - ou seja, este poderia tomar quaisquer valores, sem limites superiores e inferiores. Decidimos simular também um caso extremo, em que o sistema tinha que cumprir com o limite teórico - a referência de capacidade máxima teórica de 44 movimentos/hora. Os resultados obtidos para ambos os casos são apresentados nos gráficos 5.3 e 5.4, respetivamente.

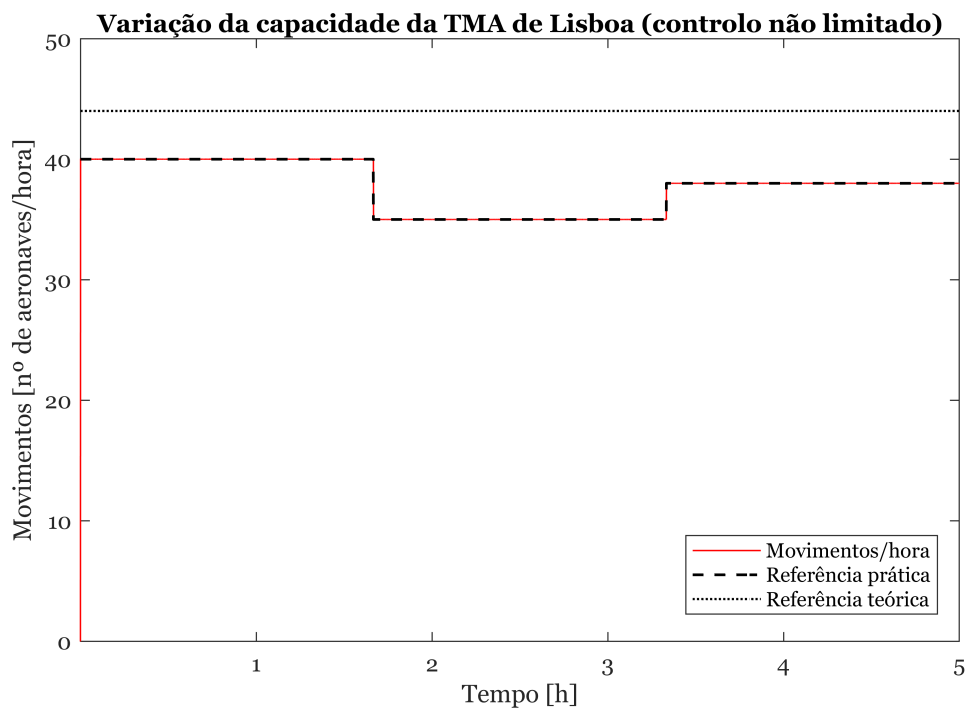


Figura 5.3: Variação da capacidade da TMA de Lisboa com controlo sem limitação

No caso do controlador sem limitação, devido à maior liberdade e conseqüente flexibilidade que lhe estamos a conferir, os resultados obtidos são significativamente melhores. A estabilização do sistema em torno da referência é atingida e o comportamento do sistema controlado é exatamente o pretendido inicialmente. Contudo, fisicamente, um controlo sem limitação não é algo realista. Desta feita, este gráfico apenas é apresentado aqui para comprovar a eficácia do método de controlo proposto.

Por sua vez, no caso extremo, o objetivo de controlo é igualmente atingido. Verificamos que até no caso mais extremo o sistema é capaz de cumprir com o desejado. O sistema permanece acima da referência durante, aproximadamente, 51 segundos - valor novamente desprezável.

Uma vez analisados todos os casos estudados podemos concluir que o controlo cumpre satisfatoriamente o objetivo para o qual foi projetado - fazer o sistema igualar um valor de referência variável imposto. Desta forma, podemos afirmar que o método de controlo proposto

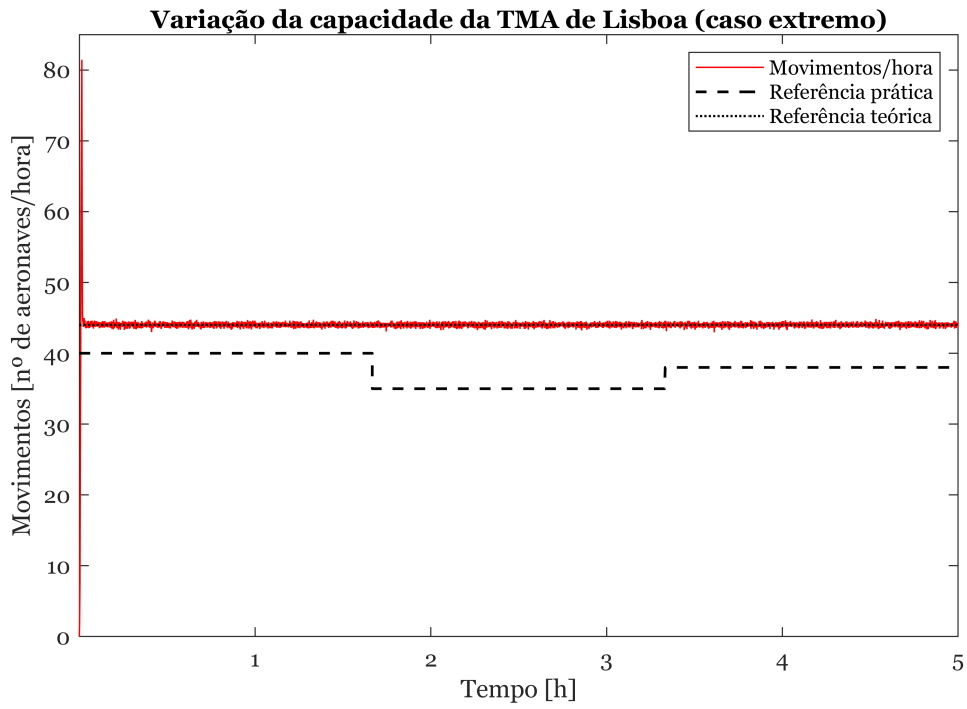


Figura 5.4: Caso extremo da variação da capacidade da TMA de Lisboa

permite-nos garantir o cumprimento de restrições de capacidade impostas sobre o aeroporto de destino, teoricamente evitando assim a sua saturação.

Capítulo 6

Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo propor uma solução para um problema de regulação de fluxo de tráfego aéreo através de uma abordagem baseada na teoria de controlo. Para isso, propusemos-nos a desenvolver um método de controlo de fluxo de tráfego capaz de regular a capacidade ao nível das secções do espaço aéreo e, assim, evitar a sobrecarga da área terminal de voo.

Neste contexto, esta dissertação ilustrou como a teoria de controlo robusto H_∞ pode ser utilizada para sintetizar uma lógica de controlo de fluxo de tráfego aéreo, com base num modelo Euleriano de fluxo de tráfego. A estratégia de controlo desenvolvida pode ser utilizada de forma automática ou como auxiliar de decisão em operações de controlo de fluxo, num ambiente de gestão de fluxos de tráfego aéreo.

A abordagem Euleriana muniu-nos com uma técnica sistemática para a agregação espacial de aeronaves com dinâmicas idênticas, através da divisão do espaço aéreo em secções, o que nos permitiu obter uma aproximação fiel do ambiente de tráfego aéreo no espaço compreendido entre Lisboa e Madrid. A posterior análise à estabilidade e controlabilidade do modelo do sistema desenvolvido garantiu-nos que o sistema era passível de ser controlado.

O método de controlo desenvolvido provou ser capaz de lidar com distúrbios. Os resultados obtidos, tanto na aplicação teórica de 4 secções, como na aplicação prática, foram satisfatórios e com características semelhantes. Apesar da estabilização em circuito fechado não ter sido atingida totalmente, o controlo cumpriu com o objetivo definido - fazer com que o sistema igualasse uma referência de capacidade variável imposta, sem a ultrapassar. No caso prático, o sobre-esforço inicial do controlador provou ser desprezável para o estudo em questão, uma vez que o sistema volta rapidamente à referência desejada. Mesmo no caso mais extremo, em que o sistema tinha que seguir a referência teórica de 44 movimentos/hora, o sistema foi capaz de cumprir os objetivos, provando assim a eficiência da metodologia de controlo desenvolvida.

Os resultados obtidos permitem-nos concluir que o método proposto é eficaz na regulação do tráfego aéreo, uma vez que nos permite garantir o cumprimento de restrições de capacidade no aeroporto de destino. Neste contexto, o controlo automático poderá de facto ser uma mais valia como auxiliar dos controladores aéreos nos seus processos de toma de decisão, no âmbito da gestão e controlo do fluxo de tráfego aéreo ao nível das secções do espaço.

Trabalhos Futuros

Apesar de terem sido obtidos resultados satisfatórios com a imposição de restrições e limites de controlo, isto foi feito apenas após o design do controlador. Métodos de design de sistemas de controlo que possam diretamente levar em conta este tipo de restrições, como [36, 54], aplicados a grande escala num caso real, serão de futuro interesse. Adicionalmente, uma eficiência computacional maior poderá permitir um estudo mais abrangente - com múltiplos aeroportos e um número mais elevado de volumes de controlo, o que permitirá uma fidelidade acrescida do modelo do ambiente de fluxo de tráfego utilizado.

Bibliografia

- [1] SESAR Joint Undertaking, “A proposal for the future architecture of the European airspace,” 2019. [Online]. Available: https://www.sesarju.eu/sites/default/files/2019-05/AAS_FINAL_0.pdf [Accessed: 10-Jul-2021]. xiii, 2, 12
- [2] ANAC, *Guia de Utilização do Espaço Aéreo*. [Online]. Available: www.voanaboa.pt xiii, xv, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24
- [3] “ESPAÇO AÉREO – Google Os Meus Mapas.” [Online]. Available: https://www.google.com/maps/d/viewer?mid=1Og8rGguyGgNR1DUpGW7Oq9k4_Xw [Accessed: 5-Jun-2020]. xiii, 23, 25
- [4] EUROCONTROL, “LSSIP Year 2019 for Spain,” Tech. Rep., 2019. xiii, 26
- [5] “El espacio aéreo controlado y limitado - Todo lo que tienes que saber,” Mar. 2017. [Online]. Available: <https://www.aerial-insights.co/blog/el-espacio-aereo-restringido/> [Accessed: 4-Feb-2021]. xiii, 27, 28
- [6] ENAIRE, “Insignia.” [Online]. Available: <https://insignia.enaire.es/> [Accessed: 11-Mar-2021]. xiii, 28
- [7] Comissão Europeia, “Single European Sky: Commission urges eighteen Member States to make a decisive move towards common airspace management,” Jul. 2014. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/DA/IP_14_818 [Accessed: 4-Jan-2021]. xiii, 30
- [8] EUROCONTROL, “LSSIP Year 2019 for Portugal,” Tech. Rep., 2019. xiii, 18, 31
- [9] P. K. Menon, G. D. Sweriduk, and K. D. Bilimoria, “New Approach for Modeling, Analysis, and Control of Air Traffic Flow,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 27, no. 5, Sep. 2004, pp. 737–744. xiii, 15, 33, 34, 65
- [10] “Open Tres Provincias » espacio aéreo.” [Online]. Available: <https://opentresprovincias.com/espacio-aereo> [Accessed: 20-Dec-2020]. xiii, 77
- [11] EUROCONTROL, “New traffic record set: 37,228 flights in one day.” [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/news/new-traffic-record-set-37228-flights-one-day> [Accessed: 18-Nov-2020]. 1
- [12] EUROCONTROL, “Industry Monitor | The EUROCONTROL bulletin on air transport trends,” Tech. Rep., 2019. 1

- [13] NAV Portugal, E.P.E., “2020.01.16 - NAV bate novo recorde de tráfego em 2019.” [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/press-releases/docs/NAV/press-releases/2020-01-16---nav-bate-novo-recorde-de-tr%C3%A1fego-em-2019> [Accessed: 18-Nov-2020]. 1
- [14] NAV Portugal, E.P.E., “2020.02.11 - Trafego 2019 por torre de controlo.” [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/press-releases/docs/NAV/press-releases/2020-02-11---trafego-2019-por-torre-de-controlo> [Accessed: 18-Nov-2020]. 1
- [15] NAV Portugal, E.P.E., “RIV LISBOA 2015.” [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/quem-somos/dados-de-tr%C3%A1fego/riv-lisboa-2014> [Accessed: 11-Nov-2020]. 1
- [16] NAV Portugal, E.P.E., “RIV SANTA MARIA 2015.” [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/quem-somos/dados-de-tr%C3%A1fego/riv-santa-maria-2014/> [Accessed: 11-Nov-2020]. 1
- [17] Agência Lusa, “IATA agrava projeções e só prevê recuperação do tráfego aéreo em 2024.” [Online]. Available: <https://observador.pt/2020/07/28/iata-agrava-projecoes-e-so-preve-recuperacao-do-trafego-aereo-em-2024/> [Accessed: 22-Nov-2020]. 1
- [18] A. O. E. Silva, “Lisboa, o turismo e um aeroporto saturado.” [Online]. Available: <https://pt.euronews.com/2018/07/17/lisboa-o-turismo-e-um-aeroporto-saturado> [Accessed: 22-Nov-2020]. 1
- [19] V. L. Arreigoso, “Sistema de tráfego aéreo não permite aumento de voos,” *Expresso*, 2017. [Online]. Available: <https://expresso.pt/arquivos-expresso/2017-10-17-Sistema-de-trafego-aereo-nao-permite--aumento-de-voos> 1
- [20] SESAR Consortium, “Air Transport Framework - The Current Situation,” Jul. 2006. [Online]. Available: http://ulc.gov.pl/_download/loz/jepp/Deliverable%201.pdf [Accessed: 19-Jun-2020]. 1
- [21] EUROCONTROL, “European Aviation in 2040, Challenges of Growth,” Tech. Rep., Oct. 2018. 2
- [22] NAV Portugal, E.P.E., “O que fazemos.” [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/quem-somos/o-que-fazemos> [Accessed: 20-Nov-2020]. 2
- [23] Commission of the European Communities, “AIR TRAFFIC MANAGEMENT, Freeing Europe’s airspace,” Mar. 1996. [Online]. Available: <http://edz.bib.uni-mannheim.de/www-edz/pdf/kom/weissbuch/kom-1996-0057-en.pdf> [Accessed: 10-Nov-2020]. 2

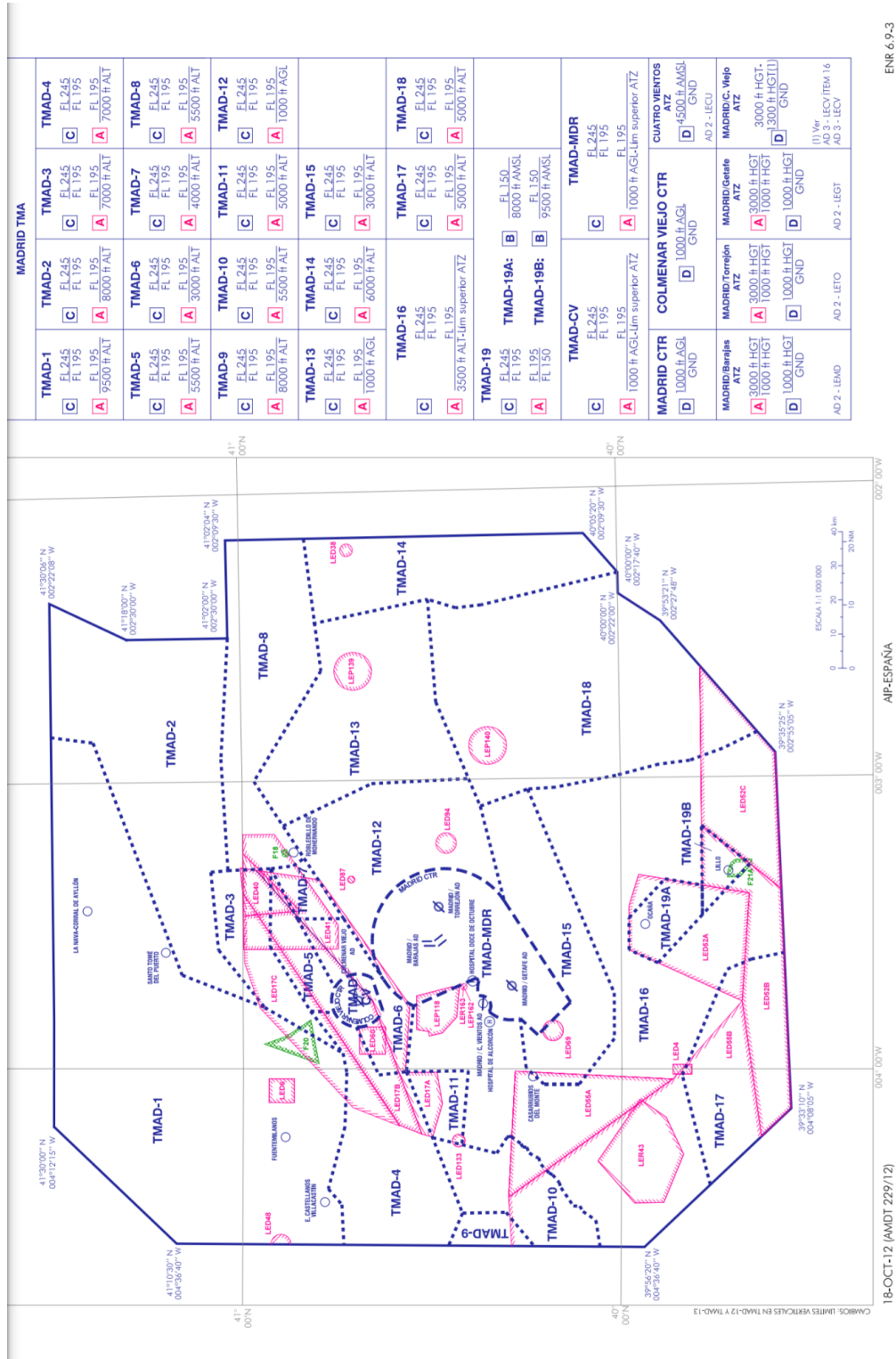
- [24] ICAO, “Why Air traffic Flow & Capacity Management,” 2019. [Online]. Available: <https://www.icao.int/MID/Documents/2019/ACAO-ICAO%20ATFM%20Workshop/1.4.3-%20ACAO%20last%20V7presentation%20-%20Copy-converti-1.pdf> [Accessed: 15-Jun-2021]. 2
- [25] M. Soares and R. Colaço, “Os Controladores | Reportagem | Antena 1,” Feb. 2019. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=dHH9fYxdyto> [Accessed: 10-Mar-2021]. 2
- [26] NAV Portugal, E.P.E., “Centro de Controlo de Área.” [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/servi%C3%A7os-de-navega%C3%A7%C3%A3o-a%C3%A9rea-1/infraestruturas-de-aeron%C3%A1utica/centros-de-controle> [Accessed: 8-Jan-2021]. 3
- [27] N. J. Ashford, P. H. Wright, and S. A. Mumayiz, *Airport Engineering: Planning, Design, and Development of 21st Century Airports*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 4
- [28] EUROCONTROL, “2018’s air traffic in a nutshell.” [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/news/2018s-air-traffic-nutshell> [Accessed: 10-Mar-2021]. 6
- [29] “Air Traffic Flow Management (ATFM).” [Online]. Available: [https://www.skybrary.aero/index.php/Air_Traffic_Flow_Management_\(ATFM\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Air_Traffic_Flow_Management_(ATFM)) [Accessed: 15-Jun-2021]. 6
- [30] SESAR Consortium, “The ATM Target Concept,” Sep. 2007. [Online]. Available: http://www.ulc.gov.pl/_download/loz/jepp/Deliverable%203.pdf [Accessed: 20-Apr-2020]. 7
- [31] SESAR Joint Undertaking, “SESAR Joint Undertaking | History.” [Online]. Available: <https://www.sesarju.eu/discover-sesar/history> [Accessed: 5-Jan-2021]. 7
- [32] SESAR Joint Undertaking, “SESAR Joint Undertaking | Partnering for smarter aviation.” [Online]. Available: <https://www.sesarju.eu/index.php/discover-sesar/partnering-smarter-aviation> [Accessed: 5-Jan-2021]. 7
- [33] SESAR Joint Undertaking, “SESAR Joint Undertaking | Vision.” [Online]. Available: <https://www.sesarju.eu/vision> [Accessed: 5-Jan-2021]. 8
- [34] NAV Portugal, E.P.E., “Aprovado projecto para aumentar capacidade aeroportuária de lisboa até 72 movimentos/hora,” Nov 2019. [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/press-releases/docs/NAV/press-releases/25-11-2019---aprovado-projeto-para-aumentar-capacidade-aeropor\tuária-de-lisboa-até-72-movimentos-hora> [Accessed: 15-Nov-2020]. 14

- [35] NAV Portugal, E.P.E., “A NAV Portugal torna-se o sexto membro efetivo da Aliança COOPANS.” [Online]. Available: <https://www.nav.pt/nav/not%C3%ADcias/2018/09/18/a-alian%C3%A7a-coopans-d%C3%A1-as-boas-vindas-ao-seu-sexto-membro-nav-portugal> [Accessed: 15-Mar-2021]. 14
- [36] H. M. Arneson, “Distributed Robust and Adaptive Control Techniques for Air Traffic Management using an Eulerian Model of Air Traffic Flows,” Master’s thesis, B.S., Cornell University, 2002. 15, 34, 35, 63, 64, 70
- [37] NATS, “Introduction to Airspace.” [Online]. Available: <https://www.nats.aero/ae-home/introduction-to-airspace/> [Accessed: 3-Feb-2021]. 18
- [38] “ANEXO 2. Espacios Aeronáuticos y Servicios de Control de Tránsito Aéreo,” in *Plan Director del aeropuerto de Madrid-Cuatro Vientos*, 2001. 26
- [39] “Clasificación del espacio aéreo en España » PepInAir,” Jun. 2018. [Online]. Available: <https://pepinair.com/clasificacion-del-espacio-aereo-en-espana/> [Accessed: 3-Feb-2021]. 26
- [40] ENAIRE, *Guía ENAIRE para vuelo visual*. [Online]. Available: https://guiavfr.enaire.es/guiaVFR/TEXTO_VOLUMEN_I_VFR.pdf [Accessed: 21-Dec-2020]. 27, 28
- [41] Parlamento Europeu, “O que é o Céu Único Europeu? | Atualidade | Parlamento Europeu,” Mar. 2014. [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/news/pt/headlines/economy/20140129STO34174/o-que-e-o-ceu-unico-europeu> [Accessed: 4-Jan-2021]. 29
- [42] Parlamento Europeu, “Air transport: Single European Sky | Fact Sheets on the European Union | European Parliament.” [Online]. Available: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/en/sheet/133/air-transport-single-european-sky> [Accessed: 4-Jan-2021]. 29
- [43] Comissão Europeia, “Functional airspace blocks (FABs),” Sep. 2016. [Online]. Available: https://ec.europa.eu/transport/modes/air/single-european-sky/functional-airspace-blocks-fabs_en [Accessed: 4-Jan-2021]. 30
- [44] “The Europe Gate To The Atlantic - SW FAB Scope.” [Online]. Available: https://www.fabsw.eu/about_swfab/sw_fab_scope/ [Accessed: 3-Feb-2021]. 30
- [45] EUROCONTROL, “Free route airspace (FRA).” [Online]. Available: <https://www.eurocontrol.int/concept/free-route-airspace> [Accessed: 4-Jan-2021]. 31
- [46] NAV Portugal, E.P.E., “Free route airspace RIV Lisboa.” [Online]. Availa-

- ble: <https://www.nav.pt/nav/servi%C3%A7os-de-navega%C3%A7%C3%A3o-a%C3%Agrea-1/free-route> [Accessed: 4-Jan-2021]. 31
- [47] Apontamentos da Disciplina de Dinâmica e Controlo de Voo, Departamento de Ciências Aeroespaciais. Universidade da Beira Interior, 2019. 43, 44, 46, 47, 51, 52
- [48] “How do I determine if a matrix is positive definite using MATLAB? - MATLAB Answers - MATLAB Central.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/answers/101132-how-do-i-determine-if-a-matrix-is-positive-definite-using-matlab> [Accessed: 10-Apr-2020]. 47
- [49] F. Verhulst, *Nonlinear Differential Equations and Dynamical Systems*, 2nd ed. Springer, 2006. 47, 48
- [50] C. Frangos and Y. Yavin, “Design methodology for linear optimal control systems,” *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 15, no. 5, Sep. 1992, pp. 1302–1304. 55, 56
- [51] P. W. et al., “9.2: P, I, D, PI, PD, and PID control,” May 2020. [Online]. Available: [https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_\(Woolf\)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_\(PID\)_Control/9.02%3A_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD%2C_and_PID_control](https://eng.libretexts.org/Bookshelves/Industrial_and_Systems_Engineering/Book%3A_Chemical_Process_Dynamics_and_Controls_(Woolf)/09%3A_Proportional-Integral-Derivative_(PID)_Control/9.02%3A_P%2C_I%2C_D%2C_PI%2C_PD%2C_and_PID_control) [Accessed: 16-Apr-2021]. 56
- [52] “H-Infinity Performance - MATLAB & Simulink.” [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/robust/gs/h-infinity-performance.html> [Accessed: 19-Mar-2021]. 57
- [53] P. P. Khargonekar, I. R. Petersen, and M. A. Rotea, “H/sub infinity /-optimal control with state-feedback,” *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 33, no. 8, 1988, pp. 786–788. 57, 58, 59, 60
- [54] K. Bousson, “Generalized Regression Neural Control of Pseudolinear Systems with Actuator Saturation,” Accepted for publication in *Archives of Control Sciences*, 2021. 58, 70
- [55] J. Guldner and V. I. Utkin, “The chattering problem in sliding mode systems,” *Proceedings of the 14th International Symposium of Mathematical Theory of Networks and Systems (MTNS'00)*, 2000. 65

Apêndice A

Anexos



ENR 6-9.3

Figura A.1: Divisões da TMA de Madrid [10]