

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL



Otimização do planeamento das inspeções de aeronaves na TAP Manutenção e Engenharia

Daniel Cardoso Semedeiros Bartolomeu

Mestrado em Estatística e Investigação Operacional

Especialização em Investigação Operacional

Trabalho de projeto orientado por:
Professora Doutora Inês Marques
Engenheiro Pedro Costa

2016

UNIVERSIDADE DE LISBOA
FACULDADE DE CIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA E INVESTIGAÇÃO OPERACIONAL



Otimização do planeamento das inspeções de aeronaves na TAP Manutenção e Engenharia

Daniel Cardoso Semedeiros Bartolomeu

Mestrado em Estatística e Investigação Operacional

Especialização em Investigação Operacional

Trabalho de projeto orientado por:
Professora Doutora Inês Marques
Engenheiro Pedro Costa

2016

*“It’s important to find an area
where you can really help
and you can feel the results.”*

Roman Abramovich

Resumo

Este projeto estuda e desenvolve um modelo de suporte à tomada de decisão relativo às inspeções periódicas de manutenção de aeronaves da frota TAP. O objetivo é obter uma distribuição das inspeções dos aviões de forma a maximizar a sua disponibilidade para operação, ou seja, permitir que os aviões estejam disponíveis para voar o máximo tempo possível.

Foram consideradas várias condicionantes para o problema, quer externas como internas ao grupo TAP. As inspeções são divididas em dois tipos, inspeções de tipo A e inspeções de tipo C, sendo que neste projeto apenas foi estudado o planeamento das inspeções de tipo A.

O conjunto de aviões da TAP foi também dividido em dois grupos, aviões de tipo *narrow body* e aviões de tipo *wide body*. Ainda que existam algumas considerações específicas a ter em conta para cada um dos dois tipos de avião, no modelo de planeamento das inspeções, a generalidade das condicionantes são as mesmas, o que faz com que o modelo seja comum aos dois tipos de avião, excetuando algumas especificidades.

Desenvolveu-se um modelo de otimização para o planeamento de inspeções do tipo A. Este modelo, baseado em programação linear inteira, pretende minimizar a diferença temporal entre o dia da inspeção e o último dia admissível para inspeção, o que conduz a um menor número de inspeções a longo prazo. Foi, ainda, considerada uma segunda função objetivo para o problema que, no decorrer do trabalho e após a análise de alguns resultados iniciais, foi considerada relevante para a distinção entre soluções ótimas alternativas no modelo inicialmente otimizado. Foi, assim, utilizada uma abordagem lexicográfica.

O projeto foi desenvolvido em parceria com o grupo TAP Portugal, através da TAP Manutenção e Engenharia – área de Processos e Melhoria Contínua. Esta parceria possibilitou o estudo detalhado do problema e, principalmente, permitiu a utilização de dados reais e atuais nos testes computacionais. Com recurso aos dados disponibilizados, foram realizados testes para vários instantes de tempo e para cada um dos tipos de aviões da frota da TAP.

Os resultados obtidos permitem fornecer, à TAP Portugal, informação útil e com qualidade, que pode ser utilizada e comparada com as soluções atualmente escolhidas pelo departamento de Manutenção e Engenharia da TAP Portugal. No final do projeto foi possível verificar a existência de potencial para reduzir de forma significativa os custos, através de menos inspeções, e aumentar as receitas, através de maior disponibilidade das aeronaves para poderem ser utilizadas em voos comerciais.

Palavras-Chave: planeamento de manutenção; otimização; calendarização de inspeções de aeronaves; programação linear inteira

Abstract

This project studies and develops a model for the decision support regarding maintenance periodical inspections of TAP fleet aircraft. The main goal is to get a distribution of the aircraft periodic inspections in order to maximize their operational availability, and thus to allow aircrafts to be able to fly as much as possible.

Several conditions for the problem were taken in consideration, either external or internal from TAP group. Inspections are divided into two type of inspections, A check inspections and C check inspections, where in this project only the scheduling of A check inspections was studied.

The TAP aircraft set was also divided into two groups, narrow body planes and wide body planes. Although there are some specifications to take into consideration at inspections model planning for each type of planes, most of the constraints are the same, which makes both aircraft types to share the same model except for some specifications.

An optimization model for the scheduling of A check inspections was developed. This model, based on integer linear programming, aims to minimize the time difference between the inspection day and the last feasible day for the inspection, which leads to a lower number of inspections at a long range. A second objective function was also considered since, during the execution of the work and after the analysis of some initial results, it was considered relevant to distinguish between alternative optimal solutions for the model initially optimized. A lexicographic approach was used.

This project was developed in partnership with TAP Portugal group, through TAP Maintenance and Engineering department – Continuous Improvement and Processes area. This partnership made it possible the detailed study of this problem and, mainly, allowed to use real and current data at the computational tests. Using the delivered data, test were carried out for several time sets and for both types of planes from TAP's fleet.

Obtained results allowed to deliver TAP Portugal useful and quality information that can be used and compared with current solutions chosen by TAP's Maintenance and Engineering department. At the end of the project it is possible to realize the potential to significantly reduce costs, trough less inspections planned, and increase revenue, trough bigger aircraft availability to be used in flight.

Keywords: maintenance planning; optimization; airplane inspections' scheduling; integer linear programming

Agradecimentos

Um trabalho de mestrado possibilita a um aluno abraçar um projeto ou um trabalho que ao longo da sua carreira académica tenha suscitado curiosidade e interesse. Durante a licenciatura em Matemática Aplicada, ramo Estatística e Investigação Operacional, e durante o mestrado em Estatística e Investigação Operacional, no âmbito do qual este trabalho de projeto foi elaborado, fui desenvolvendo uma vontade de estar envolvido num projeto cujo resultado final tivesse uma objetividade prática e pudesse ser utilizado no dia-a-dia operacional de uma instituição, empresa ou organização.

Este desejo, associado à oportunidade proporcionada pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa (FCUL) e pela TAP Portugal, fez com que eu não hesitasse na altura de escolher o tema do trabalho de projeto. Por esse motivo agradeço à instituição FCUL, nomeadamente ao Departamento de Estatística e Investigação Operacional, e à TAP, sob secção de Processos e Melhoria Contínua, no departamento da TAP Manutenção e Engenharia, esta oportunidade criada.

Destaco e agradeço o papel da Professora Inês Marques, orientadora deste projeto, por todas as indicações e sugestões dadas. Pelo apoio prestado em todos os momentos, pela capacidade de me elucidar sempre que uma dúvida me surgia e pela disponibilidade que sempre teve para me receber. Finalmente, agradeço as palavras positivas e de incentivo que sempre me deu e que me ajudaram a manter confiança e no bom caminho para um bem-sucedido desenrolar da tese.

Agradeço, de igual forma, ao orientador do projeto, Engenheiro Pedro Costa, por ter tornado possível este projeto; por todas as explicações, conhecimentos e experiências partilhadas comigo, que me permitiram ter uma visão real do problema, e que possibilitou desenvolver um trabalho que pudesse colmatar e diminuir as dificuldades que a TAP diariamente tem de resolver. Agradeço a disponibilidade demonstrada ao longo do projeto para me ajudar a obter sempre um pouco mais. Não posso também deixar de agradecer as sessões de *coaching* pessoal e dos conselhos que certamente me irão ajudar no meu futuro profissional e pessoal.

Agradeço também aos meus professores e colegas que me acompanharam ao longo da minha carreira académica nos vários estabelecimentos de ensino e demais instituições por onde tive o privilégio de passar, com destaque para os que fomentaram e ajudaram a desenvolver o gosto que tenho pela área da Investigação Operacional.

Deixo também uma palavra de agradecimento à empresa onde estou a trabalhar, Mercer, que mostrou disponibilidade e me permitiu ter flexibilidade no meu horário de forma a conjugar este meu projeto a nível pessoal, académico e profissional.

Last, but clearly not the least, uma palavra muito especial à minha família: noiva, pais e irmã. Sempre estiverem a meu lado e mostraram grande disponibilidade para o que quer que fosse. Porque por vezes as palavras não descrevem sentimentos, estas simples palavras valem muito mais do que um simples agradecimento. Obrigado!

Índice

Capítulo 1 - Introdução	1
Capítulo 2 - A TAP Portugal e a manutenção de aviões	5
2.1 - Tipos de inspeção	6
2.2 - Regularidade de inspeções.....	7
2.3 - Espaço físico para a manutenção de aeronaves	7
2.4 - Disponibilidade de <i>central lines</i>	9
2.5 - Revisão de literatura	10
Capítulo 3 - Modelo matemático	13
3.1 - Metodologia usada atualmente pela TAP M&E.....	13
3.2 - Função objetivo	13
3.3 - Ideias iniciais do projeto <i>versus</i> Resultado final	15
3.4 – Informação necessária para o modelo	17
3.5 – Modelo em PLI bicritério.....	18
3.6 - Abordagem bicritério.....	21
Capítulo 4 – Testes e resultados computacionais.....	25
4.1 - Resultados.....	25
4.2 - Análise de resultados	26
Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro.....	33
5.1 - Conclusões.....	33
5.2 - Trabalho futuro	33
Bibliografia	35

Lista de tabelas e figuras

Tabela 2.1 - Frota Airbus da TAP	6
Tabela 2.2 - Limites e margem para inspeções de tipo A	7
Tabela 3.1 – Ilustração da abordagem bicritério	22
Tabela 4.1 - Resultados computacionais	26
Tabela 4.2 – Número de inspeções e número médio de horas de voo para o planeamento TAP	28
Tabela 4.3 – Número de inspeções e número médio de horas de voo para o planeamento obtido com o modelo.....	29
Tabela 4.4 - Planeamento TAP versus modelo: número de inspeções.....	31
Tabela 4.5 - Planeamento TAP versus Modelo: número médio de horas de voo	31
Figura 1.1 - Organigrama do Grupo TAP	1
Figura 1.2 - Organigrama da TAP Manutenção e Engenharia	2
Figura 2.1 - Airbus A330 (wide body) e A320 (narrow body)	5
Figura 2.2 - Localização de hangares no aeroporto de Lisboa.....	8
Figura 2.3 – Central line, no hangar 6 do aeroporto de Lisboa, ocupada por um avião do tipo narrow body	9
Figura 2.4 – Slots disponíveis no inverno IATA.....	10
Figura 2.5 – Slots disponíveis no verão IATA.....	10
Figura 4.1 - Planeamento TAP.....	27
Figura 4.2 - Planeamento obtido pelo modelo	30

Capítulo 1 - Introdução

A TAP Portugal é uma das empresas do grupo TAP (TAP, SGPS, S.A.). A Figura 1.1 mostra o posicionamento da TAP Portugal no grupo TAP e permite dar a conhecer a existência de outras empresas dentro do grupo TAP. Esta figura representa a estrutura organizativa do grupo TAP em Novembro de 2015, altura em que a empresa se encontrava num processo de privatização.

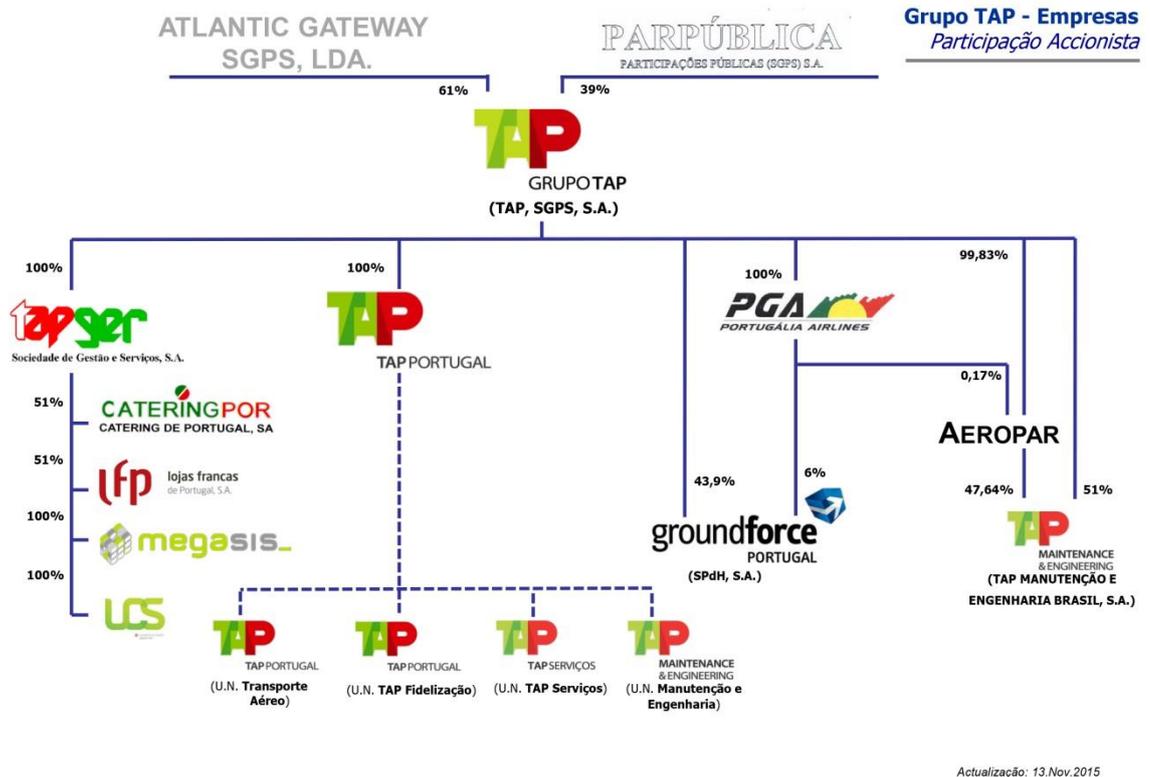


Figura 1.1 - Organograma do Grupo TAP

A TAP Portugal é a principal companhia aérea em Portugal a operar desde 1945. É a companhia líder nos voos entre a Europa e o Brasil, tirando partido do seu *hub* em Lisboa - uma plataforma privilegiada de ligação da Europa à América do Sul. Nos últimos anos, a TAP tem reforçado as ligações para a Europa, a América e a África. À data de realização deste projeto, a TAP faz cerca de 2500 voos por semana, para 84 destinos, distribuídos por 35 países. Dispõe de uma frota de 77 aviões, dos quais 61 são Airbus e os restantes 16 operam para a PGA –

Portugália Airlines. Os aviões Airbus são utilizados para os voos regulares operados pela TAP enquanto os aviões da PGA destinam-se a serviços de aluguer em regime de *Aircraft Crew Maintenance Insurance* (ACMI). Um dos imperativos da TAP é a excelência e a qualidade dos serviços prestados, sendo estes reconhecidos, não só pelos clientes, mas também por entidades como a *World Travel Award*, *Business Destinations*, *Global Traveller*, *United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization* (UNESCO), entre outros.

A TAP Manutenção e Engenharia (TAP M&E) é a organização de manutenção da TAP Portugal. A TAP M&E está certificada pelas principais entidades internacionais, nomeadamente a norte americana *Federal Aviation Administration* (FAA) e a *European Aviation Safety Agency* (EASA). A TAP M&E é responsável não só por prestar serviços de manutenção e engenharia aos aviões, motores e componentes da frota TAP, mas também por vender estes serviços a clientes externos. Mais de metade do proveito total desta unidade resulta de clientes externos.

Os imperativos de operação da TAP M&E assentam em ações de manutenção eficazes, de forma a disponibilizar o avião no horário estabelecido. Dessa forma, consegue oferecer aos seus clientes uma grande variedade de serviços com a mais alta qualidade e com prazos convenientes, respeitando padrões de segurança e ambiente.

Dentro da TAP M&E existe a área de Processos e Melhoria Contínua. Foi com o apoio desta secção que este projeto foi desenvolvido, sendo um dos orientadores deste trabalho de projeto, Engenheiro Pedro Costa, o responsável pela mesma.

A Figura 1.2 representa a estrutura organizativa da TAP M&E, estando realçada a área de Processos e Melhoria Contínua.

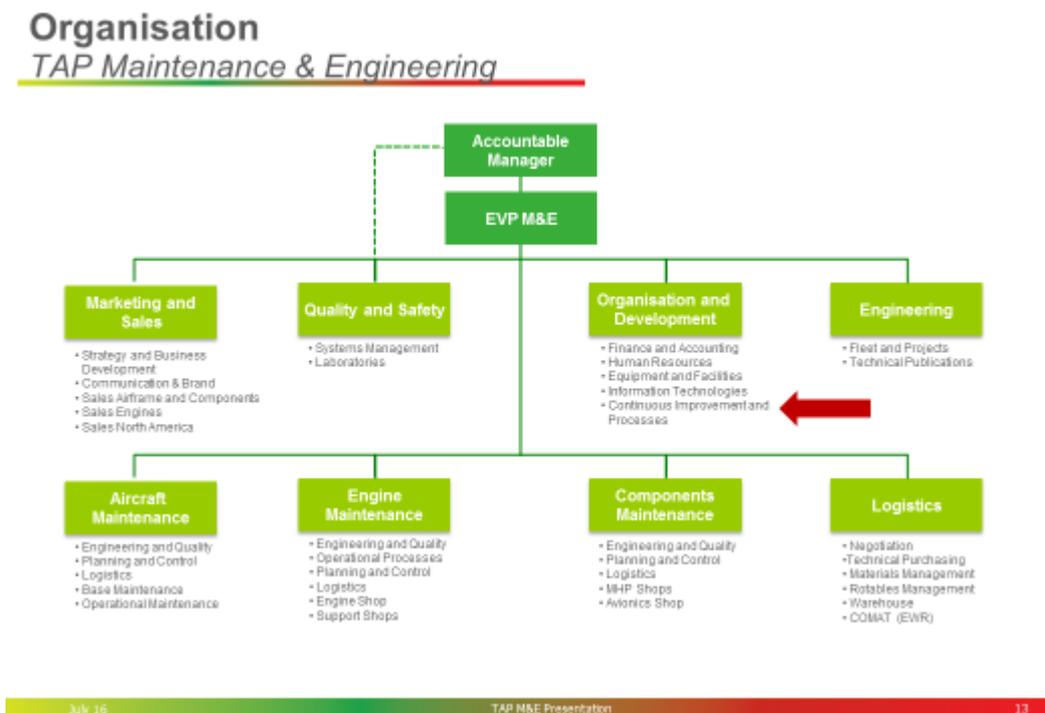


Figura 1.2 - Organigrama da TAP Manutenção e Engenharia

Os relatórios contabilísticos disponibilizados pela TAP mostram que, nos últimos anos, os resultados operacionais têm sido negativos. A Manutenção e Engenharia, em particular, tem tido dificuldades em aumentar o seu volume de negócios devido à concorrência existente, com destaque para a *Lufthansa Technik* ou a *Air France Industries & KLM Engineering* que têm uma maior dimensão quando comparada com a TAP M&E.

Como tal, é imperativo que a TAP M&E melhore os seus processos e, quando necessário, faça inovações nos procedimentos existentes de forma a otimizar o investimento e aumentar proveitos, aumentando o volume de negócios com clientes externos mas também diminuindo as despesas com a manutenção dos aviões da frota TAP.

Este projeto tem como principais objetivos estratégicos reduzir os custos com a manutenção, inovando os seus processos e recorrendo a conhecimentos na área da Investigação Operacional.

O desafio inicialmente proposto pela TAP, para o presente trabalho, era o de identificar as variáveis que influenciam a disponibilidade de voo das aeronaves. Adicionalmente, foi solicitada a criação de um modelo que, preferencialmente, dependesse diretamente das variáveis identificadas e que permitisse melhorar e automatizar o que estava a ser anteriormente realizado ao nível do planeamento das inspeções dos aviões com voos regulares da frota TAP. Após maior conhecimento das necessidades que provocaram o desafio inicial, foi segmentado o problema.

Aumentando a disponibilidade de voo das aeronaves, promove-se um aumento no intervalo entre inspeções, reduzindo os custos com as inspeções a longo prazo. Há, também, uma diminuição da utilização do hangar e, como tal, existe um aumento no potencial de venda de serviços para clientes externos.

Pretende-se, com este trabalho, criar condições para aumentar a disponibilidade de voo dos 61 aviões Airbus da frota TAP, com base em metodologias de Investigação Operacional. Assim, o objetivo deste projeto é desenvolver um calendário para a manutenção dos aviões com voos regulares da frota TAP, utilizando um modelo de otimização em programação linear inteira (PLI). Este objetivo será operacionalizado através da decisão sobre o dia em que os aviões devem fazer as suas inspeções de manutenção de forma a maximizar a sua disponibilidade de voo.

Este trabalho encontra-se estruturado da seguinte maneira:

O presente capítulo apresenta dados e factos sobre a TAP Portugal, sobre o departamento de Manutenção e Engenharia e ainda sobre a área de Processos e Melhoria Contínua. São também descritas as motivações para a elaboração deste trabalho de projeto.

No capítulo 2, é detalhada informação relevante para a elaboração e compreensão do trabalho realizado. É descrita informação específica assim como as normas e regras em vigor associadas ao planeamento das inspeções de manutenção das aeronaves.

No capítulo 3, apresenta-se o modelo desenvolvido em programação linear inteira. É ainda explicada a metodologia usada, acompanhada de uma descrição da evolução do projeto.

No capítulo 4, são apresentados os resultados dos testes computacionais em instâncias reais disponibilizadas pela TAP M&E, bem como a respectiva análise.

No último capítulo, apresentam-se as conclusões e são dadas sugestões para trabalho futuro.

Quanto ao tipo de operação, os aviões do tipo *narrow body* são utilizados em viagens de curta duração, sendo essencialmente usados em voos dentro da Europa, enquanto os aviões do tipo *wide body*, por terem maior capacidade e alcance, fazem maioritariamente voos intercontinentais (África e América).

A frota TAP inclui cinco modelos da *Airbus*: A319, A320, A321, A330 e A340. Estes modelos diferem entre si, sobretudo, ao nível da tecnologia, dimensão, capacidade de passageiros, alcance e necessidades de manutenção. Os aviões dos modelos A319, A320 e A321 são do tipo *narrow body*, enquanto os aviões A330 e A340 são do tipo *wide body*. No total dos 61 aviões *Airbus* da frota TAP, 43 são do tipo *narrow body* e 18 são do tipo *wide body*.

A Tabela 2.1 resume as características de cada modelo *Airbus* da frota TAP.

Tabela 2.1 - Frota *Airbus* da TAP

Modelo	Número de aviões	Capacidade de passageiros	Tipo de avião	Comprimento (m)	Alcance (km)
A319	21	132	<i>narrow body</i>	33,84	5.700
A320	19	162	<i>narrow body</i>	37,57	5.500
A321	3	200	<i>narrow body</i>	44,51	4.600
A330	14	263	<i>wide body</i>	58,37	12.000
A340	4	274	<i>wide body</i>	63,69	13.300

2.1 - Tipos de inspeção

A manutenção de aeronaves é a tecnologia relacionada com as ações necessárias para manter ou melhorar a aeronavegabilidade e a segurança das aeronaves, assim como os seus sistemas e componentes. Em Portugal, a entidade reguladora do setor é a Autoridade Nacional da Aviação Civil (ANAC). A ANAC é membro da *International Air Transportation Association* (IATA), organização internacional na indústria aérea.

Existem vários tipos de inspeção, que se podem agrupar, genericamente, em inspeções de linha, inspeções de tipo A e inspeções de tipo C [1].

As inspeções de linha são inspeções que ocorrem, geralmente, durante a noite, e são operações muito simples, baseadas em medições, verificações ou pequenas correções [2,3].

As inspeções de tipo A têm, habitualmente, uma duração entre um dia e um dia e meio, e geralmente são feitas, anualmente, entre 4 a 6 inspeções deste tipo em cada avião. As inspeções de tipo C fazem-se a cada 12 a 18 meses e requerem cerca de um mês a serem realizadas. Uma inspeção do tipo A é uma inspeção mais ligeira, abrangendo menor número de componentes, enquanto uma inspeção do tipo C é estrutural, requerendo maior detalhe e um maior número de tarefas de intervenção na aeronave [4].

A TAP considera que é possível obter ganhos significativos de eficiência com inspeções de tipo A. Havendo uma margem temporal bastante superior, quando comparado com as

inspeções de tipo A, as inspeções de tipo C acabam, na prática, por ter um carácter mais estratégico ao nível da decisão de agendamento. Assim, o âmbito deste projeto abrange apenas o estudo do planeamento das inspeções do tipo A.

2.2 - Regularidade de inspeções

Os requisitos operacionais entre duas inspeções dependem do tipo de avião. Caso seja um avião do tipo *wide body*, o único fator relevante é o número de horas de voo, que não deve ser superior a 800 horas. No caso de aviões do tipo *narrow body*, é necessário considerar as horas de voo, os ciclos de voo e o intervalo temporal: entre cada duas inspeções, o avião não deve voar mais de 750 horas, realizar mais de 750 ciclos ou ultrapassar 3 meses. Um ciclo de voo é um conjunto de descolagem e de sucessiva aterragem ou, por outras palavras, é uma viagem, independentemente da sua duração.

Legalmente, os limites descritos anteriormente, quanto ao número de horas de voo e, eventualmente, ao número de ciclos de voo, têm uma tolerância de 10%. Quando esta tolerância é usada, o valor que lhe corresponde deve ser deduzido ao valor máximo até à inspeção seguinte, isto é, deve haver uma reposição da tolerância utilizada. Por exemplo, se um avião do tipo *wide body* for sujeito a uma inspeção do tipo A com 820 (800+20) horas de voo, a inspeção seguinte deve ser feita antes das 780 (800-20) horas de voo para repor a tolerância utilizada na inspeção anterior.

A Tabela 2.2 faz um sumário do número de horas e ciclos de voo, assim como do intervalo temporal, entre cada duas inspeções de tipo A, para cada um dos tipos de avião. É também indicado o limite do número de horas e ciclos de voo considerando a margem de tolerância mencionada.

Tabela 2.2 - Limites e margem para inspeções de tipo A

Tipo de avião	Horas de voo	Ciclos de voo	Tempo entre inspeções	Horas ou ciclos de voo com margem
<i>Narrow body</i>	750	750	3 meses	825
<i>Wide body</i>	800	-	-	880

2.3 - Espaço físico para a manutenção de aeronaves

As inspeções de aviões de tipo A podem ser executadas num dos três hangares localizados no aeroporto de Lisboa (Figura 2.2), sendo normalmente utilizado o hangar 6. Um hangar é um edifício preparado para realizar diversas tarefas no âmbito da inspeção de manutenção. Cada hangar é composto por várias linhas principais de trabalho, também chamadas *central lines* – espaço necessário para realizar uma inspeção a um avião (Figura 2.3).

Designa-se por *slot* uma *central line* reservada, durante um certo período de tempo, para uma inspeção de manutenção. Como a operação em hangar não é exclusiva para a manutenção das aeronaves da TAP Portugal, existe uma disponibilidade máxima fixa de *central lines* quer para aviões do tipo *narrow body* como para aviões do tipo *wide body* da frota TAP. Como referido anteriormente, o hangar é também usado para operações de manutenção de clientes externos, representando estes mais de metade dos proveitos operacionais da TAP M&E.

Como tal, a TAP reserva duas *central lines* para as inspeções de manutenção do tipo A da frota TAP: uma para aviões do tipo *narrow body* e outra para aviões do tipo *wide body*.

Ainda que seja fisicamente possível aumentar a disponibilidade de espaço de hangar, seria obrigatório conjugar este aumento com os recursos humanos e recursos materiais necessários à operação. Além disso, este espaço adicional está condicionado à quantidade de serviços contratados. Esta possibilidade não se enquadra no âmbito deste projeto.

Na Figura 2.2, pode ver-se a localização dos hangares 4, 5 e 6, no campus TAP do aeroporto de Lisboa, respetivamente assinalados a azul, amarelo e vermelho.

Na Figura 2.3, mostra-se uma imagem de uma *central line*, no hangar 6 do aeroporto de Lisboa, ocupada por um avião do tipo *narrow body*.



Figura 2.2 - Localização de hangares no aeroporto de Lisboa



Figura 2.3 – *Central line*, no hangar 6 do aeroporto de Lisboa, ocupada por um avião do tipo *narrow body*

2.4 - Disponibilidade de *central lines*

O ano civil é dividido em dois períodos: o inverno IATA, que corresponde ao tempo compreendido entre o último domingo de outubro e o último sábado de março; e o verão IATA, que corresponde ao período entre o último domingo de março e o último sábado de outubro.

No período de inverno IATA, é disponibilizada uma *central line* para as inspeções de tipo A de cada um dos tipos de avião, que, historicamente, são usadas quase na totalidade durante a semana. As inspeções de manutenção de tipo A, de aviões do tipo *narrow body*, têm, habitualmente, uma duração de 24 horas. Estas inspeções de manutenção podem, por isso, ser realizadas entre o início de segunda-feira e o final de quinta-feira – havendo, portanto, quatro *slots* disponíveis por semana. Note-se que, por razões de funcionamento estrutural da empresa, o planeamento das inspeções de tipo A é feita de modo a não abranger fins de semana.

As inspeções de manutenção do tipo A, de aviões do tipo *wide body*, têm uma duração que varia entre um dia (24 horas) e um dia e meio (36 horas). As inspeções deste tipo de aviões realizam-se, habitualmente, nos seguintes períodos: a primeira inspeção da semana realiza-se entre as 8 horas da manhã de segunda-feira e o meio-dia de terça-feira; a segunda inspeção realiza-se entre as 8 horas da manhã de quarta-feira e o meio-dia de quinta-feira; a terceira inspeção da semana realiza-se entre o meio-dia de quinta-feira e as 16 horas de sexta-feira. Existem, assim, três *slots* disponíveis para inspeções de tipo A de aviões do tipo *wide body*.

Assim, durante o inverno IATA, existem quatro *slots* disponíveis para a manutenção de aviões do tipo *narrow body* e três *slots* para aviões do tipo *wide body*. A Figura 2.4 representa a disponibilidade de *slots* existente durante o período de inverno IATA.

Segunda-feira					Terça-feira					Quarta-Feira					Quinta-feira					Sexta-feira									
00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00
Slot1 - Narrow Body					Slot2 - Narrow Body					Slot3 - Narrow Body					Slot4 - Narrow Body														
Slot1 - Wide Body											Slot2 - Wide Body					Slot3 - Wide Body													

Figura 2.4 – Slots disponíveis no inverno IATA

A inspeção de manutenção de tipo A, de um avião *wide body* A340 tem características particulares. Os aviões A340 requerem inspeções mais complexas e, por isso, a TAP M&E decidiu não efetuar mais do que uma inspeção de aviões A340 por semana.

No período de verão IATA há maior procura e, conseqüentemente, a operação é maior, os aviões voam com mais frequência resultando numa diminuição nos intervalos entre inspeções. Aumenta, portanto, o número de inspeções durante este período de tempo e, como tal, é necessário aumentar o número de *slots* disponíveis para a manutenção dos aviões Airbus da TAP. A solução passa por criar uma *slot* adicional para os aviões do tipo *narrow body*.

A *slot* adicional é incluída à terça-feira, tornando possível a realização de uma inspeção adicional de tipo A a um avião do tipo *narrow body*. Não há necessidade de criar *slots* adicionais para os aviões do tipo *wide body* porque o aumento da procura no verão IATA observa-se, sobretudo, em voos dentro da Europa e este tipo de aviões são utilizados maioritariamente para voos de longo curso, essencialmente com destinos intercontinentais, para América e África.

Durante o verão IATA, existem, portanto, cinco *slots* disponíveis para a manutenção de aviões do tipo *narrow body* e três *slots* para aviões do tipo *wide body*. A Figura 2.5 representa a disponibilidade das *slots* no período de verão IATA.

Segunda-feira					Terça-feira					Quarta-Feira					Quinta-feira					Sexta-feira									
00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00	00:00	04:00	08:00	12:00	16:00	20:00
Slot1 - Narrow Body					Slot2 - Narrow Body					Slot3 - Narrow Body					Slot4 - Narrow Body														
						Slot5 - Narrow Body											Slot2 - Wide Body					Slot3 - Wide Body							

Figura 2.5 – Slots disponíveis no verão IATA

2.5 - Revisão de literatura

À área da aeronáutica estão associados elevados montantes de investimento e custos, e todas as tomadas de decisão têm impacto e conseqüências em grande escala. Como tal, as grandes companhias aéreas, e empresas que trabalham em conjunto com estas, têm tido necessidade de fazer estudos mais aprofundados. Naturalmente que esta necessidade provocou interesse em algumas áreas da Investigação Operacional e um número relevante de artigos foram desenvolvidos e publicados nas principais revistas da área.

Atualmente, a indústria aeronáutica agrupa, de forma genérica, os problemas que enfrenta e que são passíveis de serem analisadas pela Investigação Operacional em quatro grandes temas: *flight scheduling*, *fleet assignment*, *aircraft routing* e *crew scheduling* [1].

Resumidamente, os quatro grandes temas abordam os seguintes problemas.

O tema dedicado ao *flight scheduling* [5, 6] pretende definir as rotas e os horários oferecidos pela companhia aérea para os voos comerciais. Seleciona, por isso, quais os voos a oferecer, definindo o aeroporto de partida e o aeroporto de chegada, e respetivo horário. Nesta fase, é elaborado o mapa de voos disponibilizados pela companhia.

No caso do problema de *fleet assignment* [7-9], é atribuído uma classe de aeronave a cada um dos voos comerciais previamente definidos. Esta atribuição é feita em função da procura e de restrições relacionadas com eventuais especificidades do aeroporto de partida ou chegada, distância da viagem, duração do voo, entre outros fatores.

No *aircraft routing* [10,11], são definidas as rotas dos aviões consoante as necessidades de cada aeronave. Por exemplo, pode ser necessário garantir que uma determinada aeronave passe por um determinado aeroporto para realizar atividades de manutenção.

Os problemas integrados no tema de *crew scheduling* [12,13] pretendem atribuir a cada aeronave, para cada voo, uma equipa de pilotos e de pessoal de bordo, atendendo às regras legalmente em vigor, aos contratos coletivos de trabalho e ao bem-estar das pessoas envolvidas nas equipas de tripulação.

A área do planeamento de inspeções de manutenção é geralmente incluído no âmbito do problema de *aircraft routing* [14], sendo também, por vezes, considerado nos restantes três problemas. Na maioria destes casos, o planeamento de inspeções não é otimizado, sendo apenas consideradas algumas das condicionantes diretamente relacionadas com a manutenção de forma a otimizar o problema principal.

Em [15-19], estuda-se a planificação da manutenção dos aviões integrada com outros temas. A opção de integrar dois problemas potencia a obtenção de melhores soluções globais. No caso do presente projeto, em que o único objetivo é reduzir os custos associados à atividade de manutenção, o problema de planeamento de manutenção de aviões é desenvolvido isoladamente. É também desta forma que a TAP M&E implementa as suas decisões no âmbito do planeamento da manutenção dos aviões.

Nas abordagens integradas que incluem a manutenção de aviões, destacam-se o *flight scheduling* com *aircraft routing* [15], *fleet assignment* com *aircraft routing* [16] e *aircraft routing* com *crew scheduling* [17]. Existem artigos que englobam vários dos subproblemas da indústria aeronáutica, de forma agregada. Em [18] é estudado o *fleet assignment*, *routing* e *crew scheduling*, enquanto [19] é dedicado ao *flight scheduling*, *aircraft routing* e *crew scheduling*. Mais ambicioso é o artigo que integra os quatro temas (*flight scheduling*, *fleet assignment*, *aircraft routing* e *crew scheduling*) em simultâneo [20].

De acordo com [1], existe mais de uma centena de artigos ou outro tipo de trabalhos na área aeronáutica que englobam os aspetos da manutenção. No entanto, são poucos os artigos que estudam a manutenção de aviões de forma independente. A maioria dos artigos integra o estudo de outras fases do processo de decisão na indústria aeronáutica com o planeamento das inspeções de manutenção. Assim, pode-se concluir que esta ainda é uma especificidade dentro

deste vasto campo que pode ser desenvolvido no âmbito dos procedimentos da TAP. No caso da TAP, estes problemas são desenvolvidos de forma desintegrada por departamentos diferentes.

Devido à natureza e especificidade do planeamento de inspeções de manutenção, é complexo estudar formas de planeamento que possam ser adaptados à realidade de todas as companhias aéreas, nomeadamente no que diz respeito a constrangimentos de espaço, pessoal, aeronaves, operação, e outras especificidades associadas à própria companhia.

Como descrito anteriormente, existem vários tipos de inspeções de manutenção. No entanto, não há uma definição universal no que diz respeito aos tipos de inspeção. Por exemplo, em alguns artigos considera-se uma inspeção de tipo A como sendo uma inspeção com regularidade de 65 a 125 horas de voo [21]. Noutros artigos, considera-se inspeções de tipo A como sendo inspeções a serem executadas com uma regularidade de cerca de 700 a 800 horas de voo entre duas inspeções [4]. Esta última abordagem, é aquela que mais se aproxima das restrições consideradas pela TAP M&E, descrita ao longo deste projeto, e que é apresentada pela Airbus.

A própria definição de inspeções de linha não é a mesma para todas as companhias. Em algumas referências bibliográficas, são apenas abrangidas operações muito básicas, a serem executadas sempre que uma aeronave aterra e é preparada para iniciar novo voo [2]. Noutros artigos, as inspeções de linha são referidas como inspeções planeadas, cuja duração pode chegar a algumas horas, e são desenvolvidas durante a noite, enquanto o avião aguarda pelo primeiro voo da manhã [3].

Na pesquisa bibliográfica desenvolvida, não foram encontrados artigos que se foquem exclusivamente no planeamento de manutenção de aviões.

Capítulo 3 - Modelo matemático

3.1 - Metodologia usada atualmente pela TAP M&E

O processo que tem sido utilizado no passado recente pela TAP M&E não tira proveito das metodologias oferecidas pela Investigação Operacional. Na prática, são utilizados processos heurísticos iterativos, não muito complexos, cuja solução é regularmente modificada através de processos manuais.

Numa primeira fase, são imobilizados os aviões que necessariamente têm de parar em determinada data. De seguida, são preenchidas as *slots* disponíveis no hangar, por ordem decrescente de horas de voo à data considerada para a respetiva *slot*. As *slots* restantes são preenchidas cumprindo as regras de aeronavegabilidade, descritas na Tabela 2.2, e de acordo com a disponibilidade das *slots* existentes.

3.2 - Função objetivo

O problema consiste em definir quando é que cada um dos aviões Airbus da frota TAP deve ser imobilizado com o intuito de ser realizada uma inspeção de manutenção de tipo A. Pretende-se reduzir o tempo de imobilização das aeronaves, aumentando assim a sua disponibilidade para voar. Para definir a função objetivo deste problema, foi analisado um conjunto de métricas que influenciam o resultado final e estão relacionados com o objetivo final deste trabalho. Discutem-se, seguidamente, as métricas consideradas:

- Métricas financeiras:

Medir ou transformar as condicionantes do problema em unidades monetárias e perceber quais as consequências financeiras de determinadas opções, qual o custo adicional de mobilizar os recursos humanos disponíveis e como melhorar financeiramente o projeto a nível global. Ao aumentar a disponibilidade de voo dos aviões, a capacidade de venda do departamento de operações é também aumentada, o que pode resultar em maior capacidade de receita para a companhia aérea.

- Métricas temporais:

Como o objetivo principal é aumentar a disponibilidade das aeronaves, pode ser minimizado o tempo de imobilização de cada aeronave ou maximizado o tempo de voo. Isto

significa que se pretende determinar qual a data que corresponde ao último dia possível de inspeção, de acordo com os critérios existentes, e tentar imobilizar o avião nesse dia.

-Métricas de espaço de hangar:

O espaço de hangar é uma condicionante imutável, dado que não são expectáveis alterações na estrutura por incutirem custos elevados. Como tal, será razoável pensar no problema com o objetivo de otimizar a gestão do espaço fixo, ou seja, a maximização da utilização do espaço de hangar.

-Métricas de recursos humanos:

Analisou-se o modo como a otimização de uma função relacionada com a mão-de-obra necessária para realizar as manutenções pode ser refletida na função objetivo. Esta função teria como objetivo diminuir os tempos menos produtivos dos profissionais que se dedicam à manutenção dos aviões.

O critério de escolha recaiu numa análise de custo-benefício. Optou-se por ir ao encontro do que era conceptualmente pretendido pela TAP, não tornando o problema demasiado complexo.

As duas últimas métricas apresentadas - otimizar a utilização de espaço de hangar e aumentar o tempo de ocupação dos recursos humanos - foram as primeiras a ser excluídas. Tratam-se de decisões de segundo nível, ou seja, são decisões que podem ser analisadas após a escolha dos dias de imobilização dos aviões. Estes dois fatores conjugados seriam, portanto, considerados como restrições do problema, influenciando o número de *slots* disponíveis em cada instante.

A análise mais exigente foi a opção de considerar uma decisão baseada na otimização financeira ou na otimização dos dias de inspeção (métrica temporal). A utilização de uma métrica financeira tem a vantagem de associar a todas as decisões, opções, fatores e restrições, um valor monetário que possibilita associar um custo à não utilização dos recursos disponíveis. Esta possibilidade tem a dificuldade de ser necessário conhecer a rentabilidade associada à realização de uma inspeção em determinado dia. Esta operação não só é muito difícil de concretizar, como se revela bastante subjetiva. Para fazer uma análise detalhada e precisa, seria necessário medir em unidades monetárias, tendo em conta o tipo de avião, o volume de operação, o volume de operação para o modelo específico do avião, a altura do ano, a disponibilidade de hangar, a disponibilidade de mão-de-obra, a disponibilidade material, entre outros fatores. A métrica temporal simplifica este problema, não comprometendo a qualidade das soluções. Requer, no entanto, a definição do dia de potencial máximo de voo para cada uma das inspeções e para cada avião. O dia de potencial máximo de voo é o último dia de operação permitido, de acordo com as regras de operacionalidade indicadas na Tabela 2.2, para se realizar uma inspeção de manutenção a um avião.

Com base nos argumentos anteriores, optou-se pela métrica temporal, considerando uma função objetivo que minimiza a diferença entre o dia de potencial máximo de voo e a data de planeamento de cada inspeção. As variáveis de decisão definem o dia de planeamento de manutenção das inspeções do tipo A, para cada avião.

Esta é, possivelmente, a operação matemática que mais intuitivamente reflete o aumento da disponibilidade dos aviões numa função objetivo, de modo a ser utilizada no modelo.

3.3 - Ideias iniciais do projeto *versus* Resultado final

No início deste projeto, foram feitas algumas opções que, com a evolução do trabalho, concluiu-se que poderiam ser melhoradas.

Slots

Inicialmente, considerou-se que uma fixação semanal de *slots*, como descrito anteriormente e representado nas Figuras 2.4 e 2.5, seria o mais apropriado. Em termos genéricos, serviria para ter soluções aproximadas uma vez que poderá haver semanas com uma disponibilidade diferente a este nível. No entanto, segundo um prisma mais realista e para que o projeto pudesse ser imediatamente usado pela companhia, percebe-se que seria perdida alguma informação.

Há semanas que, devido a fatores conjeturais, existe menos disponibilidade para realizar manutenções, motivado por greves, formações e férias de pessoal, excesso de trabalho com manutenções de outros aviões, feriados, etc. Como tal, o número de *slots* disponíveis para cada dia é um parâmetro do modelo e que pode não ser igual de semana para semana. Por exemplo, sabe-se que, durante o verão IATA, está disponível uma *slot* à segunda, quarta e quinta-feira, e duas *slots* à terça-feira para inspeções de manutenção de tipo A para aviões do tipo *narrow body* (ver Figura 2.5). No entanto, pode acontecer que uma determinada terça-feira seja feriado e não haja inspeções de manutenção nesse dia. Trata-se, pois, de um parâmetro que depende da semana em análise. Assim, o modelo desenvolvido admite o número de *slots* para cada dia como um parâmetro que pode variar de semana para semana.

Mão-de-obra e hangar

Estes dois fatores foram considerados na decisão do número de *slots* disponíveis, em cada semana, para a manutenção de cada um dos dois tipos de avião. No caso de, pontualmente, haver uma redução de recursos humanos ou do espaço no hangar, o número de *slots* disponíveis poderá vir a ser reduzido.

Margem

Legalmente, é possível ultrapassar em 10% os requisitos operacionais entre duas inspeções. O modelo desenvolvido inicialmente considerava esta possibilidade. Resultados preliminares mostraram que as soluções obtidas utilizavam excessivamente esta situação. Uma vez que a utilização da tolerância deve ser uma exceção, à qual está associada alguns procedimentos formais morosos, nomeadamente um pedido de autorização à entidade responsável (ANAC), considerou-se que seria mais razoável não considerar esta hipótese no modelo. Deste modo, a margem fica disponível para salvaguardar eventuais diferenças entre a previsão das horas de voo, que é utilizada pelo modelo, e o tempo real de voo.

Frota integrada ou desagregada por tipo de avião

Inicialmente, foi considerada a hipótese de desenvolver uma análise integrada dos dois tipos de avião. Deste modo, seria possível gerir conjuntamente o espaço de hangar e mão-de-obra disponível para os dois tipos de avião. No entanto, com o conhecimento adquirido ao longo do projeto, percebeu-se que havia bastantes separações, em particular, ao nível das condicionantes associadas ao espaço de hangar e mão-de-obra, o que possibilita a separação dos dois tipos de avião. Assim, uma *central line* está afeta em exclusivo para os aviões do tipo *narrow body* e outra para os aviões de tipo *wide body* (de acordo com as Figuras 2.4 e 2.5). Associada à disponibilidade das *central lines* está também considerada a disponibilidade dos recursos humanos necessários para a manutenção dos aviões. Pode, ainda, acrescentar-se que os dados são disponibilizados pela TAP M&E de forma totalmente independente entre os dois tipos de avião. Deste modo, os dois tipos de aviões não partilham recursos, sendo este um problema que pode ser desagregado em função do tipo de avião.

Dentro dos aviões do tipo *wide body*, estão incluídos os aviões dos modelos Airbus A340 e Airbus A330. Como só existem quatro aviões A340 e a separação dos aviões feita pela TAP é a descrita, não foi considerado necessária a criação de um novo tipo de avião. No entanto, como há pequenas diferenças a considerar, foi necessário acrescentar uma restrição para limitar o número semanal de inspeções a aviões A340. Caso, no futuro, se pretenda adicionar um novo tipo de avião, quer por diferenças de operações ou por alargamento da frota, essa opção é relativamente fácil de implementar no trabalho realizado, quer através de novas restrições ou de alterações ao valor dos parâmetros.

Tratamento do fator tempo

A forma como os instantes temporais foram considerados teve como fatores de decisão, por um lado, garantir que o problema mantém uma dimensão razoável e tratável, e por outro lado, garantir que a informação contém o detalhe necessário para o problema. A consideração da hora como unidade de tempo, ou outra unidade resultante da partição de uma hora, revelou-se inadequado uma vez que o problema ficaria com uma dimensão demasiado elevada e os benefícios obtidos com este detalhe não se mostraram ser significativos. Adicionalmente, a informação disponibilizada pela TAP M&E utiliza o dia como unidade temporal de referência: o número de horas de voo diárias e o número de ciclos de voo diárias. Por outro lado, a consideração de uma unidade mais abrangente, como por exemplo, a semana, não seria viável uma vez que perder-se-ia o foco principal deste projeto – perceber qual o dia em que se deve fazer a inspeção de forma a disponibilizar os aviões para voar.

Assim, a escolha da unidade de tempo recaiu por um período de 24 horas, ou seja, um dia.

Função objetivo

Como referido anteriormente, a função objetivo considerada é a minimização do número de dias entre o dia de potencial máximo de voo e o dia efetivo da inspeção. No entanto, foi verificado que algumas das soluções obtidas, apesar de se tratarem de soluções ótimas,

poderiam ser melhoradas, de acordo com outros critérios pretendidos pela TAP M&E, devido à existência de soluções ótimas alternativas.

Assim, foi considerada uma segunda função objetivo. Esta função objetivo visa a minimização da diferença entre o número máximo de horas de voo permitido (750 ou 800 horas, consoante se tratem de aviões do tipo *narrow body* ou aviões do tipo *wide body*, respetivamente) e o número de horas de voo à data da inspeção. Deste modo, o modelo em PLI monocritério inicialmente concebido foi posteriormente reformulado em PLI bicritério, adicionando esta segunda função objetivo ao problema.

3.4 – Informação necessária para o modelo

Na presente secção, identifica-se a informação necessária para o modelo.

- Tipos de avião e respetiva quantidade: para as instâncias consideradas, foram usadas duas frotas, designadas por *wide body* e *narrow body*, com dimensão de 18 e 43 aviões, respetivamente.
- Dia da operação: corresponde ao dia que está a considerar-se como presente, isto é, ao dia em que pretende desenvolver-se o plano de calendarização da manutenção dos aviões.
- Horizonte temporal a estudar: este parâmetro mede o horizonte de tempo para o qual se pretende obter resultados do planeamento das inspeções de manutenção do tipo A.
- Número de inspeções a considerar: tal como o parâmetro anterior, este parâmetro garante que a solução abrange o planeamento de tantas inspeções de tipo A futuras quanto se queira. Naturalmente que, no caso de se pretender um número elevado de inspeções futuras, deve ser considerado um horizonte temporal maior.

Os dois últimos fatores permitem identificar o número de inspeções que são necessárias realizar em determinado intervalo de tempo. Como tal, estes dois parâmetros conjugados garantem que vão ser calendarizadas as inspeções, para que, à medida que são obtidas soluções consecutivas, continuam a obter-se soluções admissíveis em qualquer instante de tempo. Por outras palavras, garante uma homogeneidade da concentração de inspeções por unidade de tempo, ou, pelo menos, que as inspeções agendadas nos intervalos de tempo com mais inspeções são consideradas admissíveis pelo modelo.

Como dados de entrada para o modelo, é ainda necessária a seguinte informação:

- Estimativas: é necessário estimar e fornecer estimativas das horas e ciclos de voo diárias para cada avião, dentro do horizonte temporal que se pretende considerar;
- Dados da última meia-noite: horas e ciclos de voo acumulados, efetivamente verificados, para cada avião, na meia-noite do dia anterior ao dia da operação;
- Dados da última inspeção: informação com a data, número de horas e ciclos de voo acumulados, de cada avião, à data da última inspeção;

- *Slots* disponíveis: número de *slots* disponíveis em cada dia do horizonte temporal, para cada tipo de avião (*narrow body* e *wide body*).

Para os aviões do tipo *wide body*, podem ser ignorados os dados relativos aos ciclos de voo e ao tempo entre inspeções pois, como descrito anteriormente, esta informação não interfere no planeamento das inspeções deste tipo de aviões (ver Tabela 2.2).

3.5 – Modelo em PLI bicritério

Identificam-se, seguidamente, os índices, conjuntos, parâmetros e variáveis consideradas no modelo.

Índices e conjuntos

$i \in I$: conjunto de aviões

$k \in K_i$: conjunto de inspeções a planear para o avião i

$t \in T$: conjunto de dias do horizonte temporal

Parâmetros

har_i = número de horas de voo acumuladas, do avião i , à data da última inspeção realizada

car_i = número de ciclos de voo acumulados, do avião i , à data da última inspeção realizada

dar_i

= distância, em dias, entre o dia da operação e o dia da última inspeção realizada pelo avião i

hl_{it} = horas de voo diária estimadas, do avião i , no dia t

cl_{it} = ciclos de voo diário estimados, do avião i , no dia t

s_t = número de *slots* disponíveis no dia t

hmn_i = horas voo acumuladas, do avião i , na última meia noite

cmn_i = ciclos de voo acumulados, do avião i , na última meia noite

hv_{it} = horas de voo acumuladas, do avião i , no final do dia t :

$$hv_{it} = hmn_i + \sum_{t'=1}^t hl_{it'}, \quad \forall i \in I, t \in T$$

cv_{it} = ciclos de voo acumulados, do avião i , no final do dia t :

$$cv_{it} = cmn_i + \sum_{t'=1}^t cl_{it'}, \quad \forall i \in I, t \in T$$

$hmax_i$ = número máximo de horas de voo, entre duas inspeções, do avião i

$cmax_i$ = número máximo de ciclos de voo, entre duas inspeções, do avião i

$dmax_i$ = número máximo de dias de voo, entre duas inspeções, do avião i

$dpot_{ik}$ = dia de potencial máximo de voo, do avião i , para a inspeção k

Variáveis de decisão e auxiliares

$$x_{itk} = \begin{cases} 1, & \text{se a inspeção } k \text{ do avião } i \text{ é planeada para o dia } t \\ 0, & \text{c. c.} \end{cases}$$

y_{ik} = diferença, em dias, entre o dia de potencial máximo de voo e o dia planeado para a inspeção k do avião i

$$\min \quad z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} y_{ik} \quad (3.1)$$

$$\min \quad z_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} (hmax_i - hv_{it}) x_{itk} \quad (3.2)$$

$$\text{s. a:} \quad x_{itk} \in \{0,1\}, \forall i \in I, t \in T, k \in K_i \quad (3.3)$$

$$y_{ik} \geq 0, \forall i \in I, k \in K_i \quad (3.4)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} x_{itk} \leq s_t, \forall t \in T \quad (3.5)$$

$$\sum_{t \in T} x_{itk} = 1, \forall i \in I, k \in K_i \quad (3.6)$$

$$\sum_{t \in T} t x_{itk} \geq \sum_{t \in T} (t+1) x_{i,t,k-1}, \forall i \in I, k \in K_i \setminus \{1\} \quad (3.7)$$

$$\sum_{t \in T} hv_{it} x_{itk} - \sum_{t \in T} hv_{it} x_{i,t,k-1} \leq hmax_i, \forall i \in I, k \in K_i \setminus \{1\} \quad (3.8)$$

$$\sum_{t \in T} hv_{it} x_{it1} - har_i \leq hmax_i, \forall i \in I \quad (3.9)$$

$$\sum_{t \in T} cv_{it} x_{itk} - \sum_{t \in T} cv_{it} x_{i,t,k-1} \leq cmax_i, \forall i \in I, k \in K_i \setminus \{1\} \quad (3.10)$$

$$\sum_{t \in T} cv_{it} x_{it1} - car_i \leq cmax_i, \forall i \in I \quad (3.11)$$

$$\sum_{t \in T} (t-1) x_{itk} - \sum_{t \in T} t x_{i,t,k-1} \leq dmax_i, \forall i \in I, k \in K_i \setminus \{1\} \quad (3.12)$$

$$\sum_{t \in T} (t-1) x_{it1} + dar_i \leq dmax_i, \forall i \in I \quad (3.13)$$

$$y_{ik} \geq dpot_{ik} - \sum_{t \in T} t x_{itk}, \forall i \in I, k \in K_i \quad (3.14)$$

A primeira função objetivo (3.1) minimiza a soma das diferenças entre o dia de potencial máximo de voo e o dia de inspeção, para todas as inspeções planeadas. Nesta função objetivo, pretende-se que a inspeção seja feita num dia tão perto quanto possível do dia de potencial máximo de voo.

A segunda função objetivo (3.2) minimiza a soma das diferenças entre o número máximo de horas de voo e o número de horas de voo acumuladas à data de inspeção. Pretende-se, assim, que o número de horas de voo à data de inspeção seja o mais próximo possível do limite máximo permitido.

As restrições (3.3) e (3.4) definem os domínios das variáveis.

As restrições (3.5) são restrições de capacidade de *slots* e, como tal, garantem que o número de inspeções a planear, em cada dia, é menor ou igual que o número de *slots* disponíveis.

As restrições (3.6) obrigam ao planeamento de todas as inspeções a considerar no horizonte temporal, para todos os aviões.

O conjunto de restrições (3.7) estabelece uma ordem para o planeamento das inspeções de cada avião e garante que a k -ésima inspeção é planeada para um dia posterior à inspeção $k-1$.

As restrições (3.8) a (3.13) garantem que os intervalos máximos entre duas inspeções são respeitados, relativamente às horas de voo ((3.8) e (3.9)), aos ciclos de voo ((3.10) e (3.11)) e ao tempo ((3.12) e (3.13)), de acordo com a informação resumida na Tabela 2.2. Recorde-se que, no caso dos aviões do tipo *wide body*, não há restrições associadas aos ciclos de voo e ao tempo entre duas inspeções. Neste caso, as restrições (3.10) a (3.13) podem ser excluídas do modelo, ou pode atribuir-se um valor suficientemente grande para os parâmetros $cmax_i$ e $dmax_i$, no caso de aviões do tipo *wide body*.

As restrições (3.14) correspondem à definição da distância, em dias, entre o dia de potencial máximo de voo e o dia de inspeção, que será minimizada na primeira função objetivo. Estas restrições estabelecem também a ligação entre as variáveis x e as variáveis y . O valor da primeira função objetivo será usado como restrição na otimização da segunda função objetivo, como será descrito na secção seguinte.

O modelo descrito está preparado para utilizar instâncias para qualquer horizonte temporal. Para qualquer horizonte temporal o modelo garante que são feitas todas as inspeções necessárias tendo em conta o número de horas e ciclos de voo neste intervalo de tempo. Nas instâncias analisadas o horizonte temporal considerado foi de 180 dias, aproximadamente meio ano, por ser um intervalo suficientemente grande que assegura um número razoável de inspeções e por outro lado não excessivamente grande para não comprometer a qualidade das soluções obtidas.

Depois de o modelo ser corrido no horizonte temporal desejado, a análise às soluções tem em consideração apenas as 5 primeiras semanas, desta forma, a única condicionante ao horizonte temporal é ser superior a 5 semanas. O intervalo de tempo de 5 semanas após o dia de operação é baseado na forma como a TAP prepara as inspeções, historicamente a TAP começa a planear as operações e a preparar o material ou peças necessárias para a realização das inspeções 5 semanas antes. Assim, e para análise e comparação de resultados obtidos, considera-se o intervalo de tempo de 5 semanas.

3.6 - Abordagem bicritério

À medida que foram sendo obtidas soluções para o problema e foram sendo analisados os resultados, verificou-se que, não obstante o facto de as soluções terem como valor ótimo o menor valor possível de acordo com a primeira função objetivo (minimização da soma das diferenças entre o dia de potencial máximo de voo e o dia de inspeção), do ponto de vista operacional, para a TAP, as soluções não eram ainda as ideais. Havia várias soluções alternativas, com o mesmo valor ótimo, de acordo com a primeira função objetivo (3.1), que melhor serviam os interesses da TAP.

Como tal, decidiu-se adicionar ao modelo uma segunda função objetivo (3.2) que permite obter soluções com o mesmo valor ótimo, de acordo com a primeira função objetivo (3.1), mas com maior utilidade para a TAP. A segunda função objetivo minimiza a soma das diferenças entre o número máximo de horas de voo e o número de horas de voo acumuladas à data de

inspeção. Deste modo, o modelo é primeiramente otimizado de acordo com a primeira função objetivo (3.1); o valor ótimo encontrado é, então, incluído como restrição no modelo, que é otimizado com a segunda função objetivo (3.2).

Na Tabela 3.1 é exemplificado a metodologia utilizada.

Tabela 3.1 – Ilustração da abordagem bicritério

Avião (i):	A	B	C	D	
Dia de potencial máximo de voo ($d_{pot_{ik}}$):	2	3	4	5	
Dia de inspeção (t):	1	2	3	4	Valor ótimo (z_1^*):
Solução ótima inicial, de acordo com (3.1):	D	A	B	C	
Diferença entre o dia de potencial máximo de voo e o dia de inspeção:	4	0	0	0	4
Dia de inspeção (t):	1	2	3	4	Valor ótimo (z_1^*):
Solução ótima final, otimizando (3.2), depois de adicionada a restrição relativamente ao valor ótimo obtido com (3.1) [$z_1 = z_1^*$]:	A	B	C	D	
Diferença entre o dia de potencial máximo de voo e o dia de inspeção:	1	1	1	1	4

Como se pode verificar, as duas soluções encontradas têm o mesmo valor ótimo de acordo com a primeira função objetivo (3.1), no entanto a segunda solução adapta-se melhor ao funcionamento da TAP. A primeira solução, do ponto de vista matemática é ótima para a função objetivo inicialmente considerada, mas para a TAP não é a ideal porque um dos aviões (D) “perde” quatro dias de aeronavegabilidade enquanto os restantes aviões ficam sem margem temporal. Para a TAP, é preferível “perder” uma pequena margem em cada inspeção planeada, do que ter a maioria dos aviões a fazer a inspeção no dia de potencial máximo e ter algumas inspeções planeadas para dias afastados do dia de potencial máximo. Ou seja, é preferível uma solução com menor variabilidade quanto à diferença entre o dia de potencial máximo de voo e o dia de inspeção, nos aviões cuja manutenção se pretende calendarizar.

Existe um segundo fator igualmente importante: o modelo baseia-se numa estimativa do número de horas e ciclos de voo, que são realizadas para o cálculo do dia de potencial máximo de voo, para a inspeção de cada avião. Essa estimativa faz uma previsão de qual será o dia ótimo, sendo que, à medida que o modelo é corrido em dias de operação diferentes, com dados atualizados, o valor da estimativa pode variar, dependendo da variação dos novos dados fornecidos. Na eventualidade de o avião D (Tabela 3.1) voar menos do que o esperado, a solução ótima, de acordo com (3.1), seria necessariamente diferente. Se fosse implementada a primeira solução, o impacto seria maior porque, eventualmente, todos os aviões com inspeção marcada entre o dia anteriormente definido para inspeção do avião D e o novo dia planeado para inspeção, iriam sofrer alterações quanto à data de inspeção. Na segunda solução, as inspeções dos restantes aviões não seriam alteradas. Desta forma, é possível fazer um planeamento contínuo e minimizar as alterações à medida que as estimativas de voo vão sendo atualizadas e melhoradas.

O facto de se estar a trabalhar com estimativas pode favorecer abordagens mais conservadoras. Assim, a segunda solução dá garantias de que, caso existam diferenças relevantes nas estimativas utilizadas, o modelo está preparado para dar boas soluções, minimizando o impacto provocado por soluções obtidas em diferentes instantes de tempo.

Para concretizar o objetivo descrito anteriormente, formulou-se um modelo bicritério e foi usado o método lexicográfico. O método lexicográfico é um dos métodos mais intuitivos em otimização multicritério. Consiste em considerar funções objetivo, uma após outras, minimizando um problema de otimização monocritério, adicionando, gradualmente, restrições baseadas nos valores obtidos para as funções objetivo anteriormente otimizadas.

Genericamente, considerando um problema bicritério:

$$\begin{aligned} \min & \quad f_1(x) \\ \min & \quad f_2(x) \\ \text{s.a:} & \quad x \in X \end{aligned}$$

onde f_1 e f_2 representam os dois critérios em análise e X o conjunto de soluções admissíveis do problema. O método lexicográfico começa por resolver o problema monocritério:

$$\begin{aligned} \min & \quad f_1(x) \\ \text{s.a:} & \quad x \in X \end{aligned}$$

Sendo f_1^* o valor ótimo do problema anterior, considera-se, então, este valor como uma restrição de igualdade no valor da função objetivo f_1 . De seguida, considera-se a segunda função objetivo para otimizar o seguinte problema monocritério:

$$\begin{aligned} \min & \quad f_2(x) \\ \text{s.a:} & \quad x \in X \\ & \quad f_1(x) = f_1^* \end{aligned}$$

A solução obtida é, então, uma solução para o problema bicritério, de acordo com o método lexicográfico. A ordem escolhida para a otimização das funções objetivo deve refletir a

importância relativa dos critérios associados. Uma inversão na ordem de otimização de cada um dos critérios conduz a uma solução diferente [22]. Por vezes, não é imposta a igualdade nas restrições introduzidas com o valor ótimo dos critérios, mas são permitidos desvios em relação aos valores ótimos, limitados por uma percentagem pré-determinada dos seus valores [23]. Se, ao otimizar a primeira função objetivo, houver um ótimo único, o processo termina no caso de as restrições serem incluídas na igualdade. Na presença de ótimos alternativos, a otimização da segunda função objetivo permite encontrar uma solução eficiente para o problema bicritério, evitando-se, deste modo, soluções fracamente eficientes.

Uma solução é eficiente se não existe nenhuma outra solução admissível que seja igual ou melhor, nas duas funções objetivo, e estritamente melhor em pelo menos uma dessas funções objetivo [23]. Uma solução é fracamente eficiente se não existe uma outra solução admissível que seja estritamente melhor simultaneamente em ambas as funções objetivo [23].

No caso do problema bicritério em estudo, começa-se por otimizar o problema monocritério seguinte (P_1):

$$(P_1) \quad \min \quad z_1 = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} y_{ik}$$

s. a: (3.3)–(3.14)

Representando por z_1^* o valor ótimo obtido, resolve-se, então, o seguinte problema monocritério (P_2):

$$(P_2) \quad \min \quad z_2 = \sum_{t \in T} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K_i} (hmax_i - hv_{it}) x_{itk}$$

s. a: (3.3)–(3.14)

$z_1 = z_1^*$

Capítulo 4 – Testes e resultados computacionais

O modelo foi implementado em linguagem Mosel, utilizando o *software* X-PRESS [24]. Os testes computacionais foram realizados num computador com um processador Intel Core 2 DUO CPU P8700 @2.53GHz, com 4.00GB de Memória (RAM). O modelo foi testado com dados reais disponibilizados pela TAP M&E.

4.1 - Resultados

Como indicado anteriormente, o problema bicritério é resolvido usando o método de otimização lexicográfica. Inicialmente, é minimizada a soma das diferenças entre o dia de potencial máximo de voo e o dia da inspeção (3.1). De seguida, é minimizada a soma das diferenças entre o número máximo de horas de voo e o número de horas de voo acumuladas à data de inspeção (3.2), adicionando uma restrição com o valor ótimo obtido anteriormente para a primeira função objetivo. Considera-se como relevante o período de tempo decorrente entre a data de operação e as cinco semanas seguintes, pois, historicamente, é esse o horizonte temporal utilizado pela TAP para planear e preparar as inspeções futuras.

O processo foi desenvolvido em duas etapas hierárquicas:

Na primeira etapa, o modelo (P_1) é otimizado de acordo com a função objetivo de minimização da soma das diferenças entre o dia de potencial máximo de voo e o dia da inspeção (3.1). Guarda-se o valor ótimo obtido que será usado seguidamente como restrição.

Na segunda etapa, adiciona-se a restrição com o valor ótimo da primeira função objetivo. De seguida, o modelo (P_2) é otimizado de acordo com a função objetivo de minimização da soma das diferenças entre o número máximo de horas de voo - 750 para os aviões do tipo *narrow body* e 800 para os aviões do tipo *wide body* - e o número de horas de voo à data de inspeção (3.2), para um horizonte temporal de cinco semanas subsequentes à data de operação.

Esta abordagem foi testada com cinco instâncias reais para cada um dos dois tipos de avião (*narrow body* e *wide body*). Estas instâncias consideram como dia de operação as cinco datas seguintes, relativas ao ano de 2015: 15 Março, 22 Março, 29 Março, 5 Abril e 12 de Abril. Neste capítulo, as instâncias serão referidas pela correspondente data de operação.

Os valores ótimos obtidos nos problemas (P_1) e (P_2) (z_1 e z_2 , respetivamente) e o tempo computacional (em segundos) estão sumariados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Resultados computacionais

Tipo de avião		<i>Narrow body</i>		<i>Wide body</i>	
Otimização		z_1	z_2	z_1	z_2
15-mar	Valor ótimo	451	663	190	172
	Tempo (seg)	2,1	8,4	2,3	3,0
22-mar	Valor ótimo	429	706	187	123
	Tempo (seg)	7,6	9,1	2,0	2,0
29-mar	Valor ótimo	521	545	243	212
	Tempo (seg)	2,9	8,0	1,9	1,9
05-abr	Valor ótimo	715	453	397	463
	Tempo (seg)	10,5	70,6	3,2	2,1
12-abr	Valor ótimo	609	598	408	641
	Tempo (seg)	3,0	7,4	2,6	3,8
Média	Valor ótimo	545	593	285	322,2
	Tempo (seg)	5,22	20,7	2,4	2,56

4.2 - Análise de resultados

De modo a avaliar a qualidade dos resultados do modelo, na ótica de utilidade para a TAP, é necessário conhecer a situação real, utilizada pela TAP, para os mesmos períodos.

Na análise dos resultados do modelo, foram considerados dois critérios de comparação, que são analisados apenas relativamente ao intervalo de tempo relevante (cinco semanas): número de inspeções nas cinco semanas seguintes ao dia de operação e o número médio de horas de voo à data das inspeções, nas cinco semanas subsequentes à data da operação. O primeiro critério de comparação - número de inspeções - procura minimizar o número de inspeções, pois quando o avião está em manutenção não se encontra disponível para operar e, como tal, não é objeto gerador de receita. Outro motivo para ser comparado o número de inspeções é o facto de cada inspeção ter um custo elevado e, portanto, reduzir o número de inspeções a longo prazo significa reduzir também o custo associado à manutenção dos aviões. O segundo critério de comparação pretende que os aviões sejam imobilizados para inspeção com o maior número possível de horas de voo, de modo a rentabilizar o intervalo entre cada duas inspeções. Os dois critérios de comparação estão relacionados do seguinte modo: quanto menor for número de inspeções, maior será o número de horas de voo entre inspeções; quanto maior for o número de inspeções, menor será o número de horas de voo entre inspeções.

O planeamento feito pela TAP, para as semanas em análise, encontra-se indicado na Figura 4.1.

Data	Tipo de avião	2ªf	3ªf	4ªf	5ªf	6ªf	2ªf	3ªf	4ªf	5ªf	6ªf	2ªf	3ªf	4ªf	5ªf	6ªf	2ªf	3ªf	4ªf	5ªf	6ªf	
15-mar	Narrow body																					
	Wide body																					
22-mar	Narrow body																					
	Wide body																					
29-mar	Narrow body																					
	Wide body																					
05-abr	Narrow body																					
	Wide body																					
12-abr	Narrow body																					
	Wide body																					

Figura 4.1 - Planejamento TAP

No dia 15 de março, considerando um horizonte temporal de cinco semanas, foram planeadas 23 inspeções para aviões do tipo *narrow body* e 11 inspeções para aviões do tipo *wide body*. O número médio de horas de voo foi 698 e 737 para os aviões de tipo *narrow body* e *wide body*, respetivamente.

No dia 22 de março, planearam-se, para as cinco semanas seguintes, 24 inspeções para aviões do tipo *narrow body*, com um número médio de horas de voo de 700. No caso dos aviões do tipo *wide body*, foram planeadas 9 inspeções com 717 horas de voo, em média.

No dia 29 de março, foram planeadas 23 inspeções de tipo A para aviões do tipo *narrow body* e 9 destas inspeções para aviões do tipo *wide body*, para as cinco semanas seguintes. O número médio de horas de voo estimadas foram 710 e 716, respetivamente.

No dia 5 de abril foram planeadas 22 inspeções para aviões do tipo *narrow body*, com uma média de 705 horas de voo, e para aviões do tipo *wide body* foram planeadas 9 inspeções deste tipo, com 722 horas de voo, em média.

Finalmente, no dia 12 de abril, o planeamento para as cinco semanas seguintes contempla 21 inspeções do tipo A para aviões do tipo *narrow body* e 13 inspeções deste tipo para aviões do tipo *wide body*. O número médio de horas de voo é 702 e 718, respetivamente.

A Tabela 4.2 apresenta o número de inspeções e o número médio de horas de voo do planeamento TA, para este período.

Tabela 4.2 – Número de inspeções e número médio de horas de voo para o planeamento TAP

Tipo de avião	<i>Narrow body</i>		<i>Wide body</i>	
	Número de inspeções	Horas voo média	Número de inspeções	Horas voo média
15-mar	23	698	11	737
22-mar	24	700	9	717
29-mar	23	710	9	716
05-abr	22	705	10	722
12-abr	21	702	14	718
Média	22,6	703,0	10,6	722,0

Fazendo uma análise aos resultados obtidos pelo modelo, é possível concluir o seguinte:

No dia 15 de março, considerando como horizonte temporal as cinco semanas seguintes, foram planeadas 21 inspeções para aviões do tipo *narrow body* e 8 inspeções do tipo *wide body*. O número médio de horas de voo foi 718 e 779 para os aviões de tipo *narrow body* e *wide body*, respetivamente

No dia 22 de março, planearam-se, para as cinco semanas seguintes, 20 inspeções de tipo A para aviões do tipo *narrow body* com uma média de 715 horas de voo. Já nos aviões de tipo *wide body*, foram planeadas 7 inspeções com 782 horas de voo, em média.

No dia 29 de março, para aviões do tipo *narrow body*, foram planeadas 20 inspeções de tipo A, para as cinco semanas seguintes, com 723 horas voo, em média. Para os aviões do tipo

wide body, foram planeadas 6 inspeções, para as cinco semanas seguintes, com o número médio de horas de voo de 765.

No dia 5 de abril, o planeamento para as cinco semanas seguintes, para aviões de tipo *narrow body* contempla 19 inspeções e o número médio de horas de voo é de 726. Para os aviões de tipo *wide body*, planearam-se 9 inspeções com 749 horas de voo, em média.

No dia 12 de abril, foram consideradas 19 inspeções para *narrow body*, e o número médio de horas de voo foi 719. Para aviões do tipo *wide body*, planearam-se 11 inspeções, com 742 horas de voo, em média.

A Tabela 4.3 faz um sumário dos resultados obtidos pelo modelo, de acordo com os dois critérios de comparação.

Tabela 4.3 – Número de inspeções e número médio de horas de voo para o planeamento obtido com o modelo

Tipo de avião	<i>Narrow body</i>		<i>Wide body</i>	
	Número de inspeções	Horas voo média	Número de inspeções	Horas voo média
15-mar	21	718,4	8	778,5
22-mar	20	714,7	7	782,4
29-mar	20	722,8	6	764,7
05-abr	19	726,2	9	748,6
12-abr	19	718,5	11	741,7
Média	19,8	720,1	8,2	763,2

Na Figura 4.2 está indicado o planeamento obtido pelo modelo, para as semanas em análise.

Data	Tipo de avião	2af	3af	4af	5af	6af	2af	3af	4af	5af	6af	2af	3af	4af	5af	6af	2af	3af	4af	5af	6af	
15-mar	Narrow body																					
	Wide body																					
22-mar	Narrow body																					
	Wide body																					
29-mar	Narrow body																					
	Wide body																					
05-abr	Narrow body																					
	Wide body																					
12-abr	Narrow body																					
	Wide body																					

Figura 4.2 - Planejamento obtido pelo modelo

Para quantificar a qualidade dos resultados propostos pelo modelo, é necessário compará-los com o que foi feito efetivamente usando o processo atual de planeamento na TAP.

As Tabelas 4.4 e 4.5 apresentam uma comparação entre o planeamento da TAP e o planeamento proposto pelas soluções obtidas pelo modelo, quanto ao número de inspeções e quanto ao número médio de horas de voo, respetivamente. Para calcular a variação relativa, dividiu-se a diferença entre o valor proposto pelas soluções obtidas pelo modelo e o correspondente valor no planeamento da TAP pelo correspondente valor no planeamento da TAP, isto é, $(\text{Modelo} - \text{TAP}) / \text{TAP}$.

Tabela 4.4 - Planeamento TAP versus modelo: número de inspeções

Tipo de avião	Narrow body			Wide body		
	Planeamento TAP	Modelo	Variação	Planeamento TAP	Modelo	Variação
15-mar	23	21	-8,7%	11	8	-27,3%
22-mar	24	20	-16,7%	9	7	-22,2%
29-mar	23	20	-13,0%	9	6	-33,3%
05-abr	22	19	-13,6%	9	9	0,0%
12-abr	21	19	-9,5%	13	11	-15,4%
Média	22,6	19,8	-12,4%	10,2	8,2	-19,6%

Tabela 4.5 - Planeamento TAP versus Modelo: número médio de horas de voo

Tipo de avião	Narrow body			Wide body		
	Planeamento TAP	Modelo	Variação	Planeamento TAP	Modelo	Variação
15-mar	698	718,4	2,9%	737	778,5	5,6%
22-mar	700	714,7	2,1%	717	782,4	9,1%
29-mar	710	722,8	1,8%	716	764,7	6,8%
05-abr	705	726,2	3,0%	722	748,6	3,7%
12-abr	702	718,5	2,4%	718	741,7	3,3%
Média	703,0	720,1	2,4%	722,0	763,2	5,7%
Diferença para o limite	47,0	29,9	-36,4%	78,0	36,8	-52,8%

Como se pode observar nas Tabelas 4.4 e 4.5, as soluções do modelo apresentam uma diminuição no número médio de inspeções de cerca de 12,4% para os aviões do tipo *narrow body* e de 19,6% no caso dos aviões de tipo *wide body*. O número médio de horas de voo à data de inspeção aumenta, em média, 2,4% para os aviões do tipo *narrow body* e 5,7% no caso dos aviões de tipo *wide body*, relativamente aos planos implementados pela TAP M&E. Caso se considere a diferença entre o número de horas de voo à data de inspeção e o número máximo de horas de voo possível, 750 e 800 horas para aviões do tipo *narrow body* e *wide body*, respetivamente, obtém-se um redução de 36,4% para os aviões do tipo *narrow body* passando de 47 para 29,9. Para os aviões do tipo *wide body*, esta diferença sofre uma redução de 52,8%, passando de 78 para 36,8 horas.

Considerando os dois tipos de avião em análise, a abordagem desenvolvida neste trabalho possibilita a diminuição do número de inspeções de tipo A, e o aumento do número médio de horas de voo à data da inspeção de cerca de 15% e 4%, respectivamente.

Os valores mostrados nas tabelas anteriores foram obtidos utilizando a um horizonte temporal de cinco semanas, e os valores das tabelas correspondem à média para as cinco instâncias em teste. Fazendo uma extrapolação para as 52 semanas correspondentes a um ano, pode concluir-se que:

1. Para os aviões de tipo *narrow body*, o número de inspeções resultante do planeamento da TAP, num ano, é, aproximadamente, 235. Utilizando os resultados propostos pelo modelo é possível reduzir para 206 inspeções; em termos absolutos, corresponde a menos 29 inspeções.
2. Para os aviões de tipo *wide body*, o número de inspeções resultante do planeamento da TAP, num ano, é cerca de 106 inspeções; aplicando a abordagem desenvolvida neste projeto, é possível atingir 85 inspeções de tipo A, o que corresponde a menos 21 inspeções por ano.

Capítulo 5 – Conclusões e trabalho futuro

5.1 - Conclusões

O presente trabalho de projeto foi desenvolvido no âmbito da TAP Manutenção e Engenharia, na área de Processos e Melhoria Contínua. O desafio inicialmente proposto para o projeto era criar um modelo que permitisse facilitar e automatizar o planeamento das inspeções periódicas de manutenção das aeronaves da frota TAP. Primeiramente, foram estudadas e identificadas algumas variáveis que influenciam a tomada de decisão. Foi necessário analisar a disponibilidade existente de recursos para realizar inspeções (aeronaves, espaço de hangar e recursos humanos) e quais os dados que determinam quando é que uma inspeção deve ser realizada – número de horas de voo, número de ciclos e espaço temporal entre inspeções.

Após a análise dos dados e das variáveis, foi criado um modelo em programação linear inteira com o objetivo de otimizar a utilização dos recursos disponíveis e aumentar a disponibilidade das aeronaves para voo. Consideraram-se, neste projeto, as inspeções de tipo A dos aviões Airbus da frota TAP. Para ir ao encontro dos objetivos pretendidos pela TAP e após alguns testes iniciais, foi considerada uma segunda função objetivo, pelo que foi desenvolvido um modelo em programação linear inteira bicritério e foi utilizada uma abordagem lexicográfica.

Foram realizados vários testes, utilizando dados reais, que possibilitaram a obtenção de conclusões sobre o impacto da implementação do modelo desenvolvido no desempenho do planeamento das inspeções de tipo A dos aviões Airbus da frota TAP.

Este trabalho de projeto evidencia um potencial de melhoria nos processos atualmente utilizados pela TAP M&E. Mostrou-se que, utilizando recursos da área de Investigação Operacional, é possível aumentar a disponibilidade das aeronaves para voar, assim como reduzir o número de inspeções de tipo A realizadas pelas 61 aeronaves Airbus da frota TAP.

Indiretamente, estes dois pontos potenciam uma redução significativa dos custos operacionais da TAP M&E, assim como um aumento da disponibilidade de recursos humanos e de espaço de hangar, que possibilitam a opção de vender serviços adicionais a atuais e novos clientes.

5.2 - Trabalho futuro

Este projeto encontra-se em aberto, havendo vários aspetos possíveis de desenvolvimento futuro.

Um dos aspetos que não foi explorado neste projeto relaciona-se com a estimativa das horas de voo no futuro. Para o número de horas e ciclos de voo futuros, o modelo foi testado usando dados reais e não estimativas, isto só foi possível porque a data a que foram corridos os testes computacionais era posterior ao dia de operação: Os testes foram realizados a partir de Junho e as datas de operação são de Março e Abril. Desta forma, foi possível ter dados reais. Preferiu-se esta abordagem (dados reais em vez de estimativas) devido à complexidade em criar um modelo de estimação de horas e ciclos de voo para os aviões TAP. Desta forma, há margem para a criação de um modelo que replica o número de horas e ciclos de voo realizados pelas aeronaves da frota TAP.

Outro aspeto que pode ser explorado está relacionado com a função objetivo a ser considerada no modelo, nomeadamente a possibilidade de ser usada uma única função objetivo para formular os interesses da TAP e, assim, modelar o problema através de otimização com um único critério. Desta forma, o modelo fica mais simples e mais fácil para o utilizador. Uma opção que começou a ser analisada, mas para a qual não foram obtidas conclusões úteis, foi a consideração, na função objetivo, unicamente o número de horas à data de inspeção. Em situações reais, muito raramente a primeira condicionante a ser considerada para forçar o avião a ir para a inspeção é o número de ciclos de voo. Como o modelo impede que o número de dias e o número de ciclos entre duas inspeções seja inferior ou igual ao limite legal, não existe o problema da solução obtida não poder ser concretizada.

Bibliografia

- [1] Jorne Van den Bergh, Philippe De Bruecker, Jeroen Beliën, Jonas Peeters (2013). Aircraft maintenance operations: state of art. Research Paper 2013/09, Faculty of Economics and Business, HUBrussel.
- [2] Jeroen Beliën, Erik Demeulemeester, Philippe De Bruecker, Jorne Van den Bergh, Brecht Cardoen (2013). Integrated staffing and scheduling for an aircraft line maintenance problem. *Computers & Operations Research* 40(4): 1023-1033.
- [3] Hesham K. Alfares (1999). Aircraft maintenance workforce scheduling: a case study. *Journal of Quality in Maintenance Engineering* 5(2): 78-89.
- [4] Airbus. Airbus-FAST-special-edition-Oct2015, consultado em www.airbus.com a 30 de Junho de 2016.
- [5] Thomas A. Feo, Jonathan F. Bard (1989). Flight scheduling and maintenance base planning. *Management Science* 35(12): 1415-1432.
- [6] Andreas Gavranis, George Kozanidis (2015). An exact solution algorithm for maximizing the fleet availability of a unit of aircraft subject to flight and maintenance requirements. *European Journal of Operational Research* 242(2): 631-643.
- [7] Hanif D. Sherali, Ebru K. Bish, Xiaomei Zhu (2006). Airline fleet assignment concepts, models, and algorithms. *European Journal of Operational Research* 172(1): 1-30.
- [8] Manoj Lohatepanont (2002). Airline fleet assignment and schedule design: integrated models and algorithms. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- [9] Yaohua Li, Na Tan (2013). Study on fleet assignment problem model and algorithm. *Mathematical Problems in Engineering* 2013: 1-5.
- [10] Suaibatul Aslamiah, Siti R. Simamora, Tan Kim Hek, Novin M. Sarina, Edi L. Harahap, Malem Karina (2010). Integer programming model for operational aircraft maintenance routing problem with side constraints. *Proceedings of the 6th IMT-GT Conference on Mathematics, Statistics and its Applications*. Kuala Lumpur, Malásia.
- [11] Zhe Liang, Wanpracha Art Chaovalitwongse, Huei Chuen Huang, Ellis L. Johnson (2010). On a new rotation tour network model for aircraft maintenance routing problem. *Transportation Science* 45(1): 109-120.

- [12] Atoosa Kasirzadeh, Mohammed Saddoune, François Soumis (2015). Airline crew scheduling: models, algorithms, and data sets. *EURO Journal on Transportation and Logistics*. Article in Press.
- [13] Hatice Tekiner, Ş. İlker Birbil, Kerem Bülbül (2009). Robust crew pairing for managing extra flights. *Computers & Operations Research* 36(6): 2031-2048.
- [14] Alexander Grigoriev, Joris van de Klundert, Frits C. R. Spijksma (2006). Modeling and solving the periodic maintenance problem. *European Journal of Operational Research* 172(3): 783-797.
- [15] George Kozanidis, Andreas Gavranis, Eftychia Kostarelou (2012). Mixed integer least squares optimization for flight and maintenance planning of mission aircraft. *Naval Research Logistics* 59(3-4): 212-229.
- [16] Mohamed Haouari, Najla Aissaoui, Farah Zeghal Mansour (2009). Network flow-based approaches for integrated aircraft fleet and routing. *European Journal of Operational Research* 193(2): 591-599.
- [17] Oliver Weide, David Ryan, Matthias Ehrgott (2010). An iterative approach to robust and integrated aircraft routing and crew scheduling. *Computers & Operations Research* 37(5): 833-844.
- [18] Nikolaos Papadakos (2009). Integrated airline scheduling. *Computers & Operations Research* 36(1): 176-195.
- [19] Anne Mercier, François Soumis (2007). An integrated aircraft routing, crew scheduling and flight retiming model. *Computers & Operations Research* 34(8): 2251-2265.
- [20] Marcial Lapp, Amy Cohn (2012). Modifying lines-of-flight in the planning process for improved maintenance robustness. *Computers & Operations Research* 39(9): 2051-2062.
- [21] Mehmet Başdere, Ümit Bilge (2014). Operational aircraft maintenance routing problem with remaining time consideration. *European Journal of Operational Research* 235(1): 315-328.
- [22] Yann Collette, Patrick Siarry (2003). *Multiobjective optimization: principles and case studies*. Springer, Alemanha.
- [23] João Namorado Clímaco, Carlos Henggeler Antunes, Maria João Gomes Alves (2003). *Programação linear multiobjetivo: do modelo de programação linear clássico à consideração explícita de várias funções objetivo*. Imprensa da Universidade de Coimbra.
- [24] FICO. Guia de utilização FICO Xpress-Mosel, consultado em http://www.maths.ed.ac.uk/hall/Xpress/FICO_Docs/mosel/mosel_lang/dhtml/moselref.html a 30 de Junho de 2016.