



Lisbon School
of Economics
& Management
Universidade de Lisboa

MESTRADO EM
MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO
ECONÓMICA E EMPRESARIAL

TRABALHO FINAL DE MESTRADO

TRABALHO DE PROJETO

ESCALONAMENTO DA FORMAÇÃO DE TRIPULANTES
UM CASO PRÁTICO

MARIANA TEODORO MOREIRA

ORIENTAÇÃO:

LEONOR ALMEIDA LEITE SANTIAGO PINTO

BRUNO JOSÉ LOURENÇO MARQUES

DOCUMENTO ESPECIALMENTE ELABORADO PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

OUTUBRO – 2024

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus orientadores, Prof. Leonor Santiago Pinto e Bruno Marques, pelo incansável apoio e orientação ao longo de todo o projeto que foram fundamentais para o desenvolvimento do mesmo.

Agradeço também ao José Passos, pela sua disponibilidade na contribuição para o presente projeto

Por último, mas não menos importante, quero agradecer à minha família e amigos, cujo apoio e incentivo foram importantes durante esta jornada.

Resumo

Este trabalho visa desenvolver uma solução otimizada para o escalonamento da formação de tripulantes numa empresa de aviação executiva. O principal objetivo é propor métodos que melhorem a eficiência do planeamento das formações, minimizando o impacto nas operações da empresa e respeitando restrições operacionais, como a sequência de cursos e a disponibilidade de *slots*.

Para resolver o problema, são propostas duas abordagens: uma formulação em PLI para encontrar soluções ótimas e uma heurística construtiva para encontrar soluções aproximadas para instâncias de grande dimensão. Além disso, foi construída uma aplicação com os métodos desenvolvidos. Esta permite a introdução de dados e a geração automática de um escalonamento das formações. Por fim, a leitura da solução e sua análise podem ser realizadas através de um relatório em *Power BI*.

O principal objetivo do trabalho foi atingido, ambas as abordagens resultaram em soluções que agradaram à empresa. O modelo PLI forneceu a melhor solução em tempo reduzido. A heurística, embora aproximada, também forneceu resultados satisfatórios.

No geral, as soluções propostas provaram ser úteis para otimizar o planeamento de formações dos tripulantes, melhorando a eficiência do processo, facilitando a gestão e reduzindo a carga operacional associada ao planeamento manual, oferecendo assim uma base sólida para melhorias futuras.

Palavras-chave: escalonamento, formação de tripulantes, Programação Linear Inteira, heurística, otimização

Abstract

This thesis aims to develop an optimised solution for crew training planning in a commercial airline. The main objective is to propose methods that improve the efficiency of training planning, minimising the impact on the company's operations, while respecting operational constraints such as course sequence and slot availability.

Two approaches are proposed to address the problem: an Integer Linear Programming (ILP) formulation to find optimal solutions and a constructive heuristic to find approximate but feasible solutions for larger scale problems. In addition, an application has been developed using the proposed methods. This application allows data input and automatically generates a training plan. Finally, the solution can be reviewed and analysed through a Power BI report.

The primary objective of the work was achieved, with both approaches resulting in solutions that met the company's expectations. The ILP model provided the best solution in a short time. The heuristic, although approximate, also provided satisfactory results.

Overall, the proposed solutions proved useful in optimising crew training planning, improving process efficiency, facilitating management and reducing the operational burden associated with manual planning, thereby providing a solid foundation for future improvements.

Keywords: Scheduling, crew training, Integer Linear Programming, heuristic, optimization

Índices

Índice de Tabelas	vii
Índice de Figuras	ix
Lista de Abreviaturas.....	x
Capítulo 1. Introdução.....	0
Capítulo 2. Enquadramento teórico.....	2
Capítulo 3. Contextualização do problema	5
3.1 A empresa.....	5
3.2 A Formação de tripulações	5
Capítulo 4. Metodologia.....	7
4.1 Definição do problema	7
4.2 Formulação em PLI	9
4.3 Heurística.....	15
Capítulo 5. Resultados.....	17
5.1 Instância de teste.....	17
5.2 Solução manual	21
5.3 Modelo PLI.....	24
5.4 Heurística.....	28
5.5 Comparação de Resultados.....	31
Capítulo 6. Conclusão, Limitações e Trabalhos futuros	33
Referências Bibliográficas.....	34
Anexos.....	35
Anexo A1 – Solução do modelo PLI.....	36
Anexo A2 – Solução da Heurística.....	38
Anexo A3 – Guia de utilizador - Aplicação	40
Anexo A4 – Terminologia.....	48

Índice de Tabelas

Tabela 3.1- Sequência de tipos de curso por tipo de formação	6
Tabela 4.1- Formações do tipo New Hire.....	7
Tabela 4.2- Formações do tipo Fleet Change	8
Tabela 4.3- Formações do tipo Fleet Change + Upgrade	8
Tabela 4.4 - Capacidades dos tipos de curso	9
Tabela 5.1 - Tripulantes e suas formações	18
Tabela 5.2 - Conjunto de tripulantes e a respetiva data mais cedo de início de formação	19
Tabela 5.3 - Conjunto de tripulantes e os respetivos slots pré-definidos	19
Tabela 5.4 - Regularidade de ocorrência dos slots dos cursos	20
Tabela 5.5 - Slots do tipo de curso SIM	20
Tabela 5.6 - Tripulação mensal desejável por tipo de aeronave e tipo de tripulante.....	21
Tabela 5.7 - Tripulação mínima exigida mensal por tipo de aeronave e tipo de tripulante	21
Tabela 5.8 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC E dada pela solução manual	22
Tabela 5.9 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC E dada pela solução manual	22
Tabela 5.10 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC G dada pela solução manual	23
Tabela 5.11 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC G dada pela solução manual	23
Tabela 5.12 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC C dada pela solução manual	24
Tabela 5.13 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC C dada pela solução manual	24

Tabela 5.14 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC E dado pelo modelo PLI	25
Tabela 5.15 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC E dado pelo modelo PLI	25
Tabela 5.16 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC G dado pelo modelo PLI	26
Tabela 5.17 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC G dado pelo modelo PLI	26
Tabela 5.18 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC C dado pelo modelo PLI	27
Tabela 5.19 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC C dado pelo modelo PLI	27
Tabela 5.20 - Tempo de execução e valor das soluções por nº de iterações	28
Tabela 5.21 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC E dada pela Heurística	28
Tabela 5.22 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC E dada pela Heurística	28
Tabela 5.23 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC G dada pela Heurística	29
Tabela 5.24 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC G dada pela Heurística	29
Tabela 5.25 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC C dada pela Heurística	30
Tabela 5.26 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC C dada pela Heurística	30
Tabela 5.27 - Duração média do tempo de formação por método	31
Tabela 5.28 - soma das diferenças entre o número de tripulantes desejável e o dado pela solução, por categoria de tripulação em cada método	31
Tabela 5.29 – Duração de execução e qualidade das soluções por método	32

Índice de Figuras

Figura 1 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave E segundo o modelo PLI....	36
Figura 2 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave C segundo o modelo PLI....	36
Figura 3 – Formações dos tripulantes do tipo de aeronave G segundo o modelo PLI ...	37
Figura 4 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave E segundo a Heurística	38
Figura 5 – Formações dos tripulantes do tipo de aeronave C segundo a Heurística	38
Figura 6 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave G segundo a Heurística.....	39
Figura 7- Botão Inicial da aplicação.....	40
Figura 8 - Menu Inicial.....	40
Figura 9 – Menu Introdução de dados	41
Figura 10 - Menu Inserir Tripulantes	41
Figura 11 - Questionário para inserir um novo tripulante	41
Figura 12 - Questionário para inserir um tripulante artificial.....	41
Figura 13 - Questionário para inserir um conjunto de tripulantes	42
Figura 14 - Menu Inserir Slots.....	42
Figura 15 - Questionário para inserir novo slot.....	42
Figura 16 - Questionário para inserir um conjunto de slots	43
Figura 18 - Aba Menu	44
Figura 19 – Aba filtros	44
Figura 17 – Página Inicial do relatório	44
Figura 20 – Página do relatório "Ficha Tripulante"	45
Figura 21 - Página do relatório "Ficha Slot"	45
Figura 22 - Página do relatório "Tripulação"	46
Figura 23 - Página do relatório " Taxa de Ocupação"	47

Lista de Abreviaturas

PLI – Programação Linear Inteira

PIC – *Pilot in Command*

SIC – *Second in Command*

NH– *New Hire*

UPG – *Upgrade*

FC – *Fleet Change*

Capítulo 1. Introdução

A formação de tripulantes é um elemento fundamental na operação de empresas de aviação executiva, que dependem de equipas altamente treinadas e certificadas para garantir o mais elevado nível de segurança e qualidade dos seus serviços. A empresa em estudo opera com uma frota diversificada de aeronaves, atende clientes exigentes e enfrenta o desafio constante em escalonar a formação dos seus pilotos e copilotos, respeitando restrições operacionais e disponibilidade de recursos. Esta complexidade crescente no planeamento e na alocação de cursos motiva o desenvolvimento de soluções otimizadas, que permitam minimizar o impacto das formações na operação regular da empresa e maximizar a utilização dos recursos disponíveis.

O problema abordado neste trabalho envolve o escalonamento da formação de tripulantes, uma tarefa desafiadora, dada a necessidade de garantir que os tripulantes passem por uma sequência específica de cursos, com intervalos de tempo mínimos entre eles, sem comprometer a operação diária da empresa. Assim, a empresa precisa de garantir que, mesmo durante os períodos de formação, o número de tripulantes disponíveis em cada categoria seja suficiente para atender à procura mínima exigida.

A motivação principal deste trabalho é melhorar a eficiência do processo de escalonamento das formações, procurando soluções que garantam não apenas o cumprimento das restrições operacionais, mas também minimizem o tempo médio de formação e mantenham ao serviço, tanto quanto possível, tripulação em quantidade desejável para manter a operação. Para atingir estes objetivos, o trabalho propõe duas abordagens: um modelo em Programação Linear Inteira (PLI) e uma heurística construtiva. A primeira visa encontrar soluções ótimas, enquanto a segunda procura soluções aproximadas que sejam viáveis em problemas de grande escala, onde a solução exata pode ser computacionalmente impraticável. Ambas as metodologias serão comparadas com o método manual atualmente utilizado pela empresa, de forma a avaliar a eficácia e a eficiência das soluções propostas.

A estrutura deste relatório está organizada da seguinte forma: o Capítulo 2 apresenta o enquadramento, referindo a literatura sobre problemas de escalonamento e as técnicas de otimização mais relevantes para o contexto deste estudo. No Capítulo 3, o problema

específico da empresa em estudo é contextualizado, detalhando-se as suas operações, a tipologia da frota e as particularidades do processo de formação de tripulantes. Seguidamente, o Capítulo 4, define o problema e as abordagens desenvolvidas, incluindo a formulação em PLI e a heurística construtiva.

No Capítulo 5, são apresentados os resultados obtidos com a aplicação das metodologias desenvolvidas. Estes resultados são comparados com a solução manual utilizada pela empresa, com foco na qualidade das soluções, no tempo de execução e na capacidade de cada método em minimizar o impacto das formações nas operações regulares da empresa. Por fim, no Capítulo 6, são discutidas as conclusões do trabalho, incluindo as limitações encontradas nas metodologias aplicadas e sugestões para trabalhos futuros, com vista a melhorar ainda mais o processo de escalonamento de formações.

O presente trabalho oferece uma contribuição significativa para o processo de gestão de formações em empresas de aviação executiva, proporcionando ferramentas que podem otimizar o planeamento e reduzir a carga operacional associada ao escalonamento manual das formações.

Capítulo 2. Enquadramento

O presente projeto visa o escalonamento anual da formação dos membros da tripulação (pilotos e copilotos) de uma empresa de aviação executiva. A empresa dispõe de informação precisa sobre a formação que cada tripulante necessita. Isto é, são conhecidos os cursos que cada tripulante tem de realizar e a ordem pela qual os deve fazer. Por outro lado, a empresa tem ao seu dispor várias possibilidades de horários (*slots*) para os diversos cursos.

A atribuição dos *slots* a cada membro da tripulação deve respeitar uma série de condicionantes, nomeadamente as necessidades de tripulações no ativo para a frota que é composta por diferentes tipologias de aeronaves e restrições de tempo entre a realização de cursos.

Neste sentido estamos perante um problema de escalonamento da formação da tripulação. Os problemas de escalonamento são problemas de decisão cujo objetivo é alocar as operações aos recursos disponíveis durante um determinado período-de-tempo, satisfazendo todas as restrições, quer as das operações, quer as dos recursos (Devassia, Salazar-Aguilar, & Boyer, 2018).

Estes problemas são amplamente estudados em diferentes áreas devido à sua aplicação na otimização de processos industriais e sistemas computacionais. Para a comunidade científica, estes problemas são exemplos de problemas NP-difíceis, o que significa que não se conhecem algoritmos exatos capazes de garantidamente determinar soluções ótimas para instâncias de grande dimensão em tempo útil. Para atender a situações práticas, recorre-se a métodos heurísticos para obter soluções admissíveis em tempo aceitável (Pinedo, 2016). Esta necessidade motiva desenvolvimentos teóricos e algoritmos que não só abordam problemas de escalonamento, mas também contribuem para o avanço do conhecimento em áreas como otimização combinatória e complexidade computacional (Garey & Johnson, 1979).

Para as empresas, os problemas de escalonamento são importantes na otimização de operações e na maximização da eficiência dos recursos. Em ambientes industriais, a capacidade de escalonar tarefas de forma eficiente pode significar a diferença entre cumprir ou não prazos de produção, o que impacta diretamente na competitividade das

empresas. Além disso, em setores como logística, manufatura e serviços, um escalonamento eficaz ajuda a reduzir custos operacionais, minimizar tempos de inatividade e melhorar a utilização de máquinas e equipamentos. Estudos mostram que melhorias no escalonamento podem resultar em economias significativas e no aumento da produtividade, o que é vital para a sobrevivência e crescimento das empresas em mercados competitivos (Pinedo, 2016) (Framinan, Perez-Gonzalez, Ruiz-Hernaiz, & Leisten, 2019).

Os problemas de escalonamento possuem diversas variantes, cada uma com características e desafios distintos. No escalonamento de máquinas paralelas, as tarefas são atribuídas a múltiplas máquinas operando simultaneamente, com o objetivo de minimizar o tempo total de conclusão ou o tempo médio de execução das tarefas. Este problema é amplamente estudado devido à sua aplicabilidade em ambientes de produção (Pinedo, 2016). O *Job Shop Scheduling* exige que cada tarefa passe por uma sequência específica de operações em diferentes máquinas. A complexidade surge ao tentar otimizar a ordem das tarefas para minimizar o tempo total de conclusão ou outros critérios (Brucker, 2007). Outra variante é o escalonamento com dependências, onde as tarefas têm uma ordem fixa baseada nas suas interdependências, é importante para processos como a produção em cadeia ou programação de *software*. O objetivo é minimizar o tempo de inatividade ou os atrasos acumulados (Graham, Lawler, Lenstra, & Rinnooy Kan, 1979). Por fim, no escalonamento com prazos, cada tarefa deve ser concluída dentro de um prazo específico, e o desafio é maximizar o número de tarefas concluídas a tempo ou minimizar o atraso total, sendo relevante para sistemas de tempo real e serviços onde a pontualidade é crítica (Johnson, 1954).

Para resolver este problema, existem vários métodos exatos, heurísticos e metaheurísticos. Os métodos exatos como a Programação Linear Inteira (PLI) modelam o problema com equações lineares e são eficazes para problemas de pequena dimensão, mas podem ser impraticáveis para problemas de grande dimensão devido à complexidade computacional (Pinedo, 2016). Um método exato é o método *Branch and Bound* que divide o problema em subproblemas e explora o espaço de soluções sistematicamente, oferecendo precisão, mas enfrentando dificuldades com problemas de grande escala (Brucker, 2007).

Por outro lado, métodos heurísticos e metaheurísticos fornecem soluções boas em tempos mais curtos, mas não garantem obtenção de uma solução ótima. A Regra de Johnson (Johnson, 1954) e o *List Scheduling* (Graham, Lawler, Lenstra, & Rinnooy Kan, 1979) são heurísticas que abordam casos específicos e simplificam a implementação, porém podem não oferecer a melhor solução em todos os cenários. Metaheurísticas como os Algoritmos Genéticos (Holland, 1975), *Simulated Annealing* (Krikpatrick, Gelatt, & Vercchi, 1983), ou Algoritmos de Colônia de Formigas (Dorigo & Stützle, 2004) exploram o espaço de soluções de forma mais flexível e são eficazes para problemas complexos e grandes, oferecendo uma boa exploração do espaço de soluções.

Capítulo 3. Contextualização do problema

3.1 A empresa de aviação executiva

Por questões de confidencialidade, utilizaremos o exemplo de uma empresa fictícia de aviação executiva. Esta empresa destaca-se pelo forte compromisso com a segurança, resultado de um rigoroso programa de manutenção e de uma equipa de elevada qualidade, garantindo assim os mais exigentes padrões de segurança para os seus passageiros.

A tripulação é composta por dois tipos de profissionais: o piloto em comando (PIC - *Pilot in Command*), responsável pela operação e segurança do voo; e o copiloto (SIC - *Second in Command*), que auxilia o PIC na preparação da aeronave, na realização de inspeções e verificações de segurança, além do controlo de monitorização.

A empresa opera uma frota diversificada com mais de 1000 aeronaves, que variam entre jatos leves a jatos de cabine grande, assegurando que os clientes possam escolher a aeronave ideal para as suas necessidades. A frota é composta por sete tipos de aeronaves, agrupadas em três categorias consoante a sua complexidade.

O primeiro grupo inclui aeronaves menores e mais simples de dois tipos, os modelos A e B. O segundo grupo é constituído pelas aeronaves por quatro tipos: C, D, E e F, grupo mais exigente que o primeiro grupo em termos de experiência e formação da tripulação. O terceiro grupo é composto exclusivamente pelas aeronaves do tipo G, que apresentam o maior nível de complexidade.

Os tripulantes são categorizados de acordo com a função que desempenham (SIC, PIC) e o tipo de aeronave (A, B, C, D, E, F e G) em que operam.

3.2 A Formação de tripulações

Anualmente, a empresa realiza um levantamento de necessidades da quantidade de tripulantes por tipo de aeronave e por tipo de tripulante para o ano seguinte. Este levantamento tem em consideração os novos aviões que vão ser adquiridos e, conseqüentemente, a nova tripulação a contratar e a tripulação que irá mudar de categoria.

Um novo tripulante inicia a sua carreira como SIC em uma das tipologias de aeronave de nível fácil ou intermédio. Os outros tripulantes com carreira na empresa podem mudar de tipo de aeronave em atuação para um tipo de aeronave de complexidade mais elevado, bem como fazer um *upgrade* passando de SIC para PIC.

Desta forma, existem quatro tipos de formação: *New Hire* (NH) para novos tripulantes, *Fleet Change* (FC) para mudança de tipo de aeronave, *Upgrade* (UPG) para promoção de SIC para PIC, e *Fleet Change + Upgrade* (FC+UPG), que combina mudança de tipo de aeronave e o aumento de responsabilidade em comando. Cada formação inclui um conjunto específico de cursos, ilustradas na

Tabela 3.1.

Tipo de formação	Sequência de tipos de curso					
Tipo de formação	Sequência de tipos de curso					
NH (New Hire)	INDOC	SIM	BT	LIFUS	LIFUS	LIFUS
	SIM					
FC (Fleet Change)	SIM	BT	LIFUS	LIFUS	LIFUS	
UPG (In Fleet Upgrade)	UPG	LIFUS	LIFUS	LIFUS		
	UPG				LIFUS	LIFUS
FC + UPG (Fleet Change + Upgrade)	UPG	SIM	BT	LIFUS	LIFUS	LIFUS

Tabela 3.1- Sequência de tipos de curso por tipo de formação

Os tipos de curso a sombreado são específicos para cada tipo de aeronave e os restantes são de carácter geral. Os cursos de cada formação são sequenciais com um intervalo de tempo mínimo pré-definido entre eles.

A listagem de todas as formações e cursos atendendo à especificidade do tipo de aeronave e sequências encontram-se descritas no ponto seguinte.

Cada curso pode ser frequentado em *slots* alternativos que se encontram ao dispor da empresa. Assim, cada *slot* tem associado um curso específico, uma data de início, uma data de fim, uma capacidade máxima e mínima.

O objetivo é atribuir aos tripulantes *slots* de forma a compor a sua formação, isto é, a cumprir a sequência de cursos prevista na formação do tripulante.

Capítulo 4. Metodologia

4.1 Definição do problema

A calendarização das formações dos tripulantes é uma tarefa recorrente, que impacta significativamente tanto no funcionamento dos serviços da empresa como na sua viabilidade económica. Assim, e com o intuito de otimizar esta tarefa, o principal objetivo deste trabalho é obter uma solução, em tempo útil, como sugestão para o escalonamento das formações dos tripulantes, isto é, sugerir os *slots* cada tripulante que deve frequentar.

No presente trabalho optou-se por não trabalhar com as formações (sequências de cursos) e os cursos do tipo UPG devido à sua complexidade. Assim, no total serão consideradas 40 formações e 22 cursos.

As formações são codificadas considerando o tipo de formação (NH, FC e FC+UPG), o tipo de tripulante (SIC, PIC) e o tipo de aeronave (A, B, C, D, E, F e G) atuais e finais, da seguinte forma: {tipo de formação} _ {tipo de tripulante inicial} _ {tipo de aeronave em atuação inicial} _ {tipo de tripulante final} _ {tipo de aeronave em atuação final}.

Nas tabelas, Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3, encontram-se detalhadas as formações, isto é, as sequências de cursos, bem como o número mínimo de dias de intervalo entre cursos, do tipo de formação New Hire, Fleet Change e Fleet Change + Upgrade respetivamente.

Tabela 4.1- Formações do tipo New Hire

Formação	1º curso	2º curso	3º curso	4º curso	5º curso	6º curso
NH_A	INDOC	7 SIM_A	7 BT_A	60 LIFUS_A	0 LIFUS_A	0 LIFUS_A
NH_B	INDOC	7 SIM_B	7 BT_B	60 LIFUS_B	0 LIFUS_B	0 LIFUS_B
NH_C	INDOC	7 SIM_C	7 BT_C	60 LIFUS_C	0 LIFUS_C	0 LIFUS_C
NH_D	INDOC	7 SIM_D	7 BT_D	60 LIFUS_D	0 LIFUS_D	0 LIFUS_D
NH_E	INDOC	7 SIM_E	7 BT_E	60 LIFUS_E	0 LIFUS_E	0 LIFUS_E
NH_F	INDOC	7 SIM_F	7 BT_F	60 LIFUS_F	0 LIFUS_F	0 LIFUS_F

Tabela 4.2- Formações do tipo Fleet Change

Formação	1º curso	2º curso	3º curso	4º curso	5º curso	6º curso
FC_SIC_A_SIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_SIC_B_SIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_SIC_C_SIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_SIC_D_SIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_SIC_E_SIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_SIC_F_SIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_PIC_A_PIC_C	SIM_C	7 BT_C	60 LIFUS_C	0 LIFUS_C	0 LIFUS_C	
FC_PIC_A_PIC_D	SIM_D	7 BT_D	60 LIFUS_D	0 LIFUS_D	0 LIFUS_D	
FC_PIC_A_PIC_E	SIM_E	7 BT_E	60 LIFUS_E	0 LIFUS_E	0 LIFUS_E	
FC_PIC_A_PIC_F	SIM_F	7 BT_F	60 LIFUS_F	0 LIFUS_F	0 LIFUS_F	
FC_PIC_A_PIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_PIC_B_PIC_C	SIM_C	7 BT_C	60 LIFUS_C	0 LIFUS_C	0 LIFUS_C	
FC_PIC_B_PIC_D	SIM_D	7 BT_D	60 LIFUS_D	0 LIFUS_D	0 LIFUS_D	
FC_PIC_B_PIC_E	SIM_E	7 BT_E	60 LIFUS_E	0 LIFUS_E	0 LIFUS_E	
FC_PIC_B_PIC_F	SIM_F	7 BT_F	60 LIFUS_F	0 LIFUS_F	0 LIFUS_F	
FC_PIC_B_PIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_PIC_C_PIC_D	SIM_D	7 BT_D	60 LIFUS_D	0 LIFUS_D	0 LIFUS_D	
FC_PIC_C_PIC_E	SIM_E	7 BT_E	60 LIFUS_E	0 LIFUS_E	0 LIFUS_E	
FC_PIC_C_PIC_F	SIM_F	7 BT_F	60 LIFUS_F	0 LIFUS_F	0 LIFUS_F	
FC_PIC_C_PIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_PIC_D_PIC_E	SIM_E	7 BT_E	60 LIFUS_E	0 LIFUS_E	0 LIFUS_E	
FC_PIC_D_PIC_F	SIM_F	7 BT_F	60 LIFUS_F	0 LIFUS_F	0 LIFUS_F	
FC_PIC_D_PIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_PIC_E_PIC_F	SIM_F	7 BT_F	60 LIFUS_F	0 LIFUS_F	0 LIFUS_F	
FC_PIC_E_PIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	
FC_PIC_650_PIC_G	SIM_G	7 BT_G	60 LIFUS_G	0 LIFUS_G	0 LIFUS_G	

Tabela 4.3- Formações do tipo Fleet Change + Upgrade

Formação	1º curso	2º curso	3º curso	4º curso	5º curso	6º curso
FC+UPG_SIC_D_PIC_A	SIM_A	7 BT_A	60 LIFUS_A	0 LIFUS_A	0 LIFUS_A	
FC+UPG_SIC_D_PIC_B	SIM_B	7 BT_B	60 LIFUS_B	0 LIFUS_B	0 LIFUS_B	
FC+UPG_SIC_E_PIC_A	SIM_A	7 BT_A	60 LIFUS_A	0 LIFUS_A	0 LIFUS_A	
FC+UPG_SIC_E_PIC_B	SIM_B	7 BT_B	60 LIFUS_B	0 LIFUS_B	0 LIFUS_B	
FC+UPG_SIC_F_PIC_A	SIM_A	7 BT_A	60 LIFUS_A	0 LIFUS_A	0 LIFUS_A	
FC+UPG_SIC_F_PIC_B	SIM_B	7 BT_B	60 LIFUS_B	0 LIFUS_B	0 LIFUS_B	
FC+UPG_SIC_G_PIC_A	SIM_A	7 BT_A	60 LIFUS_A	0 LIFUS_A	0 LIFUS_A	
FC+UPG_SIC_G_PIC_B	SIM_B	7 BT_B	60 LIFUS_B	0 LIFUS_B	0 LIFUS_B	

Para cada curso existem vários *slots*. Por sua vez, cada *slot* tem associados um curso, uma data de início e uma de término, além de uma capacidade e de um número mínimo de inscritos para que funcione.

Tabela 4.4 - Capacidades dos tipos de curso

Tipo de curso	cap. mínima	cap. máxima
INDOC	6	30
SIM	2	2
BT	2	6
LIFUS	0	4

Como a empresa continua a operar durante os períodos de formação é essencial garantir que a tripulação que fica ao serviço, é suficiente para assegurar a prestação dos serviços. Um tripulante é considerado indisponível durante todo o seu período de formação.

Nem todos os tripulantes podem estar em formação ao mesmo tempo dadas as necessidades da empresa. Designaremos por *tripulação desejável ao serviço*, o número de tripulantes que é desejável que esteja no ativo e por *tripulação mínima exigida*, o número de tripulantes mínimo que deve estar ao serviço.

Além disso, devem ser consideradas algumas exceções comuns, como a existência de *slots* já associados a tripulantes ou a necessidade de um tripulante iniciar a sua formação apenas após uma determinada data.

A empresa pretende soluções que minimizem o tempo médio de formação da tripulação e a diferença entre a tripulação desejável ao serviço e o número de tripulantes ao serviço, por categoria de tripulante.

4.2 Formulação em PLI

A abordagem inicial para a resolução do problema em mãos foi através da sua formulação em programação linear inteira.

Para esta formulação foi usada a seguinte notação:

Conjuntos

J : Conjunto de identificadores de sequências distintas de cursos de formação, $j \in J = \{1, \dots, 40\}$

$J = \{1 = NH_A, 2 = NH_B, 3 = NH_C, 4 = NH_D, 5 = NH_E, 6 = NH_F, 7 = FC_SIC_A_SIC_G, 8 = FC_SIC_B_SIC_G, 9 = FC_SIC_C_SIC_G, 10 = FC_SIC_D_SIC_G, 11 = FC_SIC_E_SIC_G, 12 = FC_SIC_F_SIC_G, 13 = FC_PIC_A_PIC_C, 14 = FC_PIC_A_PIC_D, 15 = FC_PIC_A_PIC_E, 16 = FC_PIC_A_PIC_F, 17 = FC_PIC_A_PIC_G, 18 = FC_PIC_B_PIC_C, 19 = FC_PIC_B_PIC_D, 20 = FC_PIC_B_PIC_E, 21 = FC_PIC_B_PIC_F, 22 = FC_PIC_B_PIC_G, 23 = FC_PIC_C_PIC_D, 24 = FC_PIC_C_PIC_E, 25 = FC_PIC_C_PIC_F, 26 = FC_PIC_C_PIC_G, 27 = FC_PIC_D_PIC_E, 28 = FC_PIC_D_PIC_F, 29 = FC_PIC_D_PIC_G, 30 = FC_PIC_E_PIC_F, 31 = FC_PIC_E_PIC_G, 32 = FC_PIC_E_PIC_G, 33 = FC + UPG_SIC_D_PIC_A, 34 = FC + UPG_SIC_D_PIC_B, 35 = FC + UPG_SIC_E_PIC_A, 36 = FC + UPG_SIC_E_PIC_B, 37 = FC + UPG_SIC_F_PIC_A, 38 = FC + UPG_SIC_F_PIC_B, 39 = FC + UPG_SIC_G_PIC_A, 40 = FC + UPG_SIC_G_PIC_B \}$

K : Conjunto de categorias de tripulantes, $k \in K = \{1, \dots, 14\}$

$K = \{1 = SIC_A, 2 = SIC_B, 3 = SIC_C, 4 = SIC_D, 5 = SIC_E, 6 = SIC_F, 7 = SIC_G, 8 = PIC_A, 9 = PIC_B, 10 = PIC_C, 11 = PIC_D, 12 = PIC_E, 13 = PIC_F, 14 = SIC_G \}$

P : Conjunto de tripulantes que necessitam de formação

$P^j \subseteq P$: Conjunto de tripulantes que necessitam da sequência de cursos de formação j ; $j \in J$

$P_{k,l} \subseteq P^j$: Conjunto de tripulantes que transitam da categoria k para a categoria l ; $k, l \in K$

$P_e \subseteq P$: Conjunto de tripulantes que têm restrições relativas à data de começo da sua formação

T : Conjunto de cursos, $|T| = 22$

$T = \{1 = INDOC, 2 = SIM_A, 3 = SIM_B, 4 = SIM_C, 5 = SIM_D, 6 = SIM_E, 7 = SIM_F, 8 = SIM_G, 9 = BT_A, 10 = BT_B, 11 = BT_C, 12 = BT_D, 13 = BT_E, 14 = BT_F, 15 = BT_G, 16 = LIFUS_A, 17 = LIFUS_B, 18 = LIFUS_C, 19 = LIFUS_D, 20 = LIFUS_E, 21 = LIFUS_F, 22 = LIFUS_G\}$

M : Conjunto de meses, $m \in M = \{1, \dots, 12\}$

A : Conjunto de *slots*

$A_u \subseteq A$: Conjunto dos *slots* que oferecem o curso u , $u \in T$

S_j : Sequências de cursos que compõem a formação (sequência de cursos) j ; $j \in J$

$S_j = (s_j(1), s_j(2), \dots, s_j(|S_j|))$, designando $|S_j|$ a dimensão do vetor S_j

Exemplo: $S_1 = (s_1(1) = INDOC, s_1(2) = SIM_A, s_1(3) = BT_A, s_1(4) = LIFUS_{A_1}, s_1(5) = LIFUS_{(A_2)}, s_1(6) = LIFUS_{(A_3)})$. Todas as sequências estão descritas nas tabelas: Tabela 4.3- Formações do tipo Fleet Change + Upgrade Tabela 4.1, Tabela 4.2 e Tabela 4.3.

Parâmetros

$n = |P|$: Número de tripulantes que necessita de formação

I_i : Data de início do *slot* i ; $i \in A$

F_i : Data de fim do *slot* i ; $i \in A$

Q_i^{min} Número mínimo de tripulantes para que o *slot* i funcione; $i \in A$

Q_i^{max} Número máximo de tripulantes que pode frequentar o *slot* i ; $i \in A$

L_v^u : Tempo mínimo de intervalo entre os cursos u e v , para os cursos u "e" v que sejam consecutivos pela ordem (u, v) numa sequência S_j ; $u, v \in S_j$ com $j \in J$

C_m^k : nº de tripulantes (de $p \in P$), na categoria k (no mês m) que é desejável ter ao serviço no dia 1 do mês m ; $k \in K, m \in M$

U_m^k : nº mínimo de tripulantes (de $p \in P$), na categoria k (no mês m) ao serviço no dia 1 do mês m ; $k \in K, m \in M$

D_p : Data mais cedo de início da formação do tripulante p ; $p \in P$

Variáveis de decisão

$$x_{pi} = \begin{cases} 1, & \text{se o tripulante } p \text{ frequenta o slot } i \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} ; p \in P, i \in A$$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } i \text{ é utilizado} \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} ; i \in A$$

Função Objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min } z = & \frac{1}{n} \sum_{p \in J} \sum_{p \in P^j} \left[x_{p j(|S_j|)} F_{j(|S_j|)} - x_{p j(1)} I_{j(1)} \right] \\ & + \sum_{l \in K} \sum_{m \in M} \left[C_m^l \right. \\ & \left. + \left(\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^j: j \in P_{kl}^j} \sum_{i \in j(|S_j|): F_i \leq m-1} x_{pi} - \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^j: j \in P_{lk}^j} \sum_{i \in j(1): F_i \leq m} x_{pi} \right) \right] \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i \in A_{j(t)}} x_{pi} \cdot F_i + L_{j(t)}^{j(t+1)} \leq \sum_{i \in A_{j(t+1)}} x_{pi} \cdot I_i \quad \begin{array}{l} p \in P^j, j \in J, \\ t = \{1, \dots, |S_j| - 1\} \end{array} \quad (2)$$

$$\sum_{u \in A_{j(t)}} x_{pi} \cdot I_i \leq \sum_{u \in A_{j(t+1)}} x_{pi} \cdot I_i \quad \begin{array}{l} p \in P^j, j \in J, \\ t = \{1, \dots, |S_j| - 1\} \end{array} \quad (3)$$

$$\sum_{k \in A_u} x_{pk} = 1 \quad p \in P^j, u \in S_j, j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P^j} \sum_{i \in S^j} x_{pi} \leq y_i \cdot Q_i^{\max} \quad i \in A \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P^j} \sum_{i \in S^j} x_{pi} \geq y_j \cdot Q_j^{\min} \quad i \in A \quad (6)$$

$$\sum_{i \in A} x_{pi} = |S_j| \quad p \in P^j, j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P^j: j \in P_{kl}^j} \sum_{i \in j(|S_j|): F_i \leq m-1} x_{pi} \quad \begin{array}{l} l \in K, m \in M \\ + \sum_{k \in K} \sum_{p \in P^j: j \in P_{lk}^j} \sum_{i \in j(1): F_i \leq m} x_{pi} \geq U_m^l \end{array} \quad (8)$$

$$\sum_{u \in T} \sum_{i \in A_u, l_i \leq D_{p-1}} x_{pi} = 0 \quad p \in Pe \quad (9)$$

$$x_{pi} \leq y_i \quad p \in P, i \in A \quad (10)$$

$$x_{pi} \in \{0,1\} \quad p \in P, i \in A \quad (11)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad i \in A \quad (12)$$

A função objetivo (1) minimiza duas componentes: a duração média da formação dos tripulantes e a diferença entre o número de tripulantes desejável e o número de tripulantes ao serviço, dado pela solução. O número de tripulantes ao serviço da categoria l no início do mês m é dado pela soma do número de tripulantes que sendo de outra categoria completaram antes do mês m a sua formação para passar à categoria l com o número de tripulantes que vão sair da categoria l mas ainda não iniciaram a sua formação.

Os conjuntos de restrições de (2) a (7) dizem respeito às características das formações. Pelas restrições (2) garante-se o espaçamento de tempo mínimo exigido entre cursos de uma sequência de cursos da formação. As (3) garantem a sequência de cursos da formação. Pelas (4) impõe ao tripulante que frequente os cursos exigidos pela sequência de cursos da respetiva formação. Pelos conjuntos de restrições (5) e (6) garante-se as capacidades máximas e mínimas dos *slots*, respetivamente. As restrições (7) impõem que cada tripulante não realiza mais cursos do que aqueles de que a sua formação necessita.

Seguidamente, as restrições (8) garantem a quantidade mínima exigida de tripulantes por categoria no início de cada mês m e as restrições (9) que a formação de um tripulante não inicia anteriormente à sua data mais cedo de início de formação, sendo esta restrição apenas abrangida ao conjunto de tripulantes que têm esta particularidade.

As restantes restrições dizem respeito à natureza das variáveis de decisão. As restrições (10) estabelecem a relação entre as variáveis de decisão, onde um tripulante apenas

frequenta *slots* que serão utilizados e nas restrições (11) e (12) é definido o domínio das variáveis de decisão.

Assume-se que o número de tripulantes cumpre sempre o mínimo exigido, e que o número de tripulantes por tipo de aeronave é par. Caso o número de tripulantes por tipo de aeronave for ímpar é adicionado um tripulante artificial.

4.3 Heurística

Outra abordagem para resolver o problema em mãos é o desenvolvimento de uma heurística construtiva.

A heurística desenvolvida, à semelhança do modelo PLI apresentado tem como objetivo alocar os tripulantes aos cursos que compõem a formação associada de forma eficiente e adequada. Para tal, o primeiro passo da heurística é atribuir uma data inicial de formação para cada tripulante. De seguida atribui-se aos tripulantes os *slots* necessários, de modo a tentar minimizar conflitos e garantir todos os requisitos de disponibilidade dos *slots* e de formação. Se algum critério não for cumprido a solução é considerada inválida. Se no final, a solução for considerada válida, é calculado o valor da solução.

É de ressaltar que, através da Tabela 4.4 é possível observar que os cursos do tipo SIM têm a mesma capacidade mínima e máxima, devido à escassez destes *slots*, pelo que é importante serem utilizados na sua capacidade máxima. Um problema que advém desta característica está associado ao número de tripulantes em formação, pois, no caso de este ser ímpar seria impossível apresentar uma solução admissível do problema. Para resolver esta lacuna, um tripulante artificial do tipo SS_ {tipo de aeronave associada} é inserido no planeamento sempre que o número de tripulantes em formação por tipo de aeronave for ímpar.

Um slot é considerado em estado latente, quando este não cumpre a sua capacidade mínima no momento, pelo que a sua utilização por outro tripulante é prioritária.

Passos básicos da Heurística:

Passo 1: Atribuição de datas de início de formação pseudoaleatórias aos tripulantes

Passo 2: Verificar se as datas atribuídas em Passo 1 são válidas, caso contrário ajustar através da data de início de formação mais cedo

Passo 3: Ordenar os tripulantes por ordem crescente das datas de início de formação

Passo 4: Associar os tripulantes aos *slots* pré-definidos correspondentes

Passo 5: Para cada curso $u \in T$

Passo 5.1: Para cada tripulante $p \in P$ que precisa do curso $u \in T$

Passo 5.1.1: Se houver algum *slot* em estado latente, associar o *slot* ao tripulante, caso contrário, procurar o *slot* disponível com a data mais favorável para o tripulante, e associar ao mesmo

Passo 5.1.2: Se o *slot* utilizado não cumprir os requisitos mínimos, o *slot* fica em estado latente

Passo 5.2: Se algum *slot* estiver inválido, então a solução é inválida, fim

Passo 6: Verificar se todos os tripulantes estão afetos aos cursos que são necessários para a sua formação, caso contrário a solução não é válida, fim

Passo 7: Calcular a valor da solução, fim

Este procedimento é repetido um número de vezes, definido previamente, dando como resultado a solução com melhor qualidade, isto é, a solução válida com menor valor.

O valor de solução é avaliado como na função objetivo do modelo PLI.

Capítulo 5. Resultados

5.1 Instância de teste

A fim de testar e analisar os métodos desenvolvidos e explicados anteriormente, usamos uma instância real para a qual é conhecida uma solução encontrada de forma manual.

Esta instância tem 36 tripulantes que precisam de formação e refere-se apenas às aeronaves do tipo C, E e G.

Alguns dos tripulantes, já se encontram alocados a determinados *slots*, outros têm data mais cedo de início de formação pré-definida.

Na Tabela 5.1 encontra-se a descrição dos tripulantes e da respetiva formação que necessitam.

Tabela 5.1 - Tripulantes e suas formações

Nome	Tipo de formação	Categoria Inicial	Categoria Final	Formação
Crew #1	New Hire		SIC E	NH_SIC_E
Crew #2	New Hire		SIC E	NH_SIC_E
Crew #3	New Hire		SIC E	NH_SIC_E
Crew #4	New Hire		SIC E	NH_SIC_E
Crew #5	New Hire		SIC E	NH_SIC_E
Crew #6	New Hire		SIC E	NH_SIC_E
Crew #7	New Hire		SIC C	NH_SIC_C
Crew #8	New Hire		SIC C	NH_SIC_C
Crew #9	New Hire		SIC C	NH_SIC_C
Crew #10	New Hire		SIC C	NH_SIC_C
Crew #11	Fleet Change	PIC C	PIC E	FC_PIC_C_PIC_E
Crew #12	Fleet Change	PIC B	PIC E	FC_PIC_B_PIC_E
Crew #13	Fleet Change	PIC B	PIC E	FC_PIC_B_PIC_E
Crew #14	Fleet Change	PIC B	PIC E	FC_PIC_B_PIC_E
Crew #15	Fleet Change	PIC B	PIC E	FC_PIC_B_PIC_E
Crew #16	Fleet Change	PIC B	PIC E	FC_PIC_B_PIC_E
Crew #17	Fleet Change	PIC D	PIC G	FC_PIC_D_PIC_G
Crew #18	Fleet Change	PIC D	PIC G	FC_PIC_D_PIC_G
Crew #19	Fleet Change	PIC D	PIC G	FC_PIC_D_PIC_G
Crew #20	Fleet Change	PIC C	PIC G	FC_PIC_C_PIC_G
Crew #21	Fleet Change	PIC C	PIC G	FC_PIC_C_PIC_G
Crew #22	Fleet Change	PIC C	PIC G	FC_PIC_C_PIC_G
Crew #23	Fleet Change	PIC B	PIC G	FC_PIC_B_PIC_G
Crew #24	Fleet Change	SIC A	SIC G	FC_SIC_A_SIC_G
Crew #25	Fleet Change	SIC A	SIC G	FC_SIC_A_SIC_G
Crew #26	Fleet Change	SIC B	SIC G	FC_SIC_B_SIC_G
Crew #27	Fleet Change	SIC B	SIC G	FC_SIC_B_SIC_G
Crew #28	Fleet Change	SIC B	SIC G	FC_SIC_B_SIC_G
Crew #29	Fleet Change	SIC A	SIC G	FC_SIC_A_SIC_G
Crew #30	Fleet Change	SIC A	SIC G	FC_SIC_A_SIC_G
Crew #31	Fleet Change	SIC A	SIC G	FC_SIC_A_SIC_G
Crew #32	Fleet Change	SIC A	SIC G	FC_SIC_A_SIC_G
Crew #33	Fleet Change	SIC B	SIC G	FC_SIC_B_SIC_G
Crew #34	Fleet Change	SIC B	SIC G	FC_SIC_B_SIC_G
Crew #35	Upgrade + Fleet Change	SIC F	PIC C	UPG+FC_SIC_F_PIC_C
Crew #36	Upgrade + Fleet Change	SIC E	PIC C	UPG+FC_SIC_E_PIC_C

Na Tabela 5.2 encontram-se as datas mais cedo de início de formação para os tripulantes associados e na Tabela 5.3 estão descritos os *slots* pré-definidos e os respectivos tripulantes.

Tabela 5.3 - Tripulantes e data mais cedo de início de formação

Tripulante	Data mais cedo
Crew #1	01/08/2024
Crew #2	01/08/2024
Crew #3	01/08/2024
Crew #4	01/08/2024
Crew #5	01/08/2024
Crew #6	01/08/2024
Crew #7	01/08/2024
Crew #8	01/08/2024
Crew #9	01/08/2024
Crew #10	01/08/2024
Crew #11	01/09/2024
Crew #18	01/09/2024
Crew #19	01/09/2024
Crew #20	01/09/2024
Crew #21	01/09/2024
Crew #22	01/09/2024
Crew #23	01/09/2024
Crew #24	01/09/2024
Crew #25	01/09/2024
Crew #26	01/09/2024
Crew #27	01/09/2024
Crew #28	01/09/2024

Tabela 5.2 - Tripulantes e slots pré-definidos

Tripulante	Curso	Início	Fim
Crew #29	SIM_G	15/07/2024	12/08/2024
Crew #30	SIM_G	15/07/2024	12/08/2024
Crew #31	SIM_G	19/09/2024	15/10/2024
Crew #32	SIM_G	19/09/2024	15/10/2024
Crew #33	SIM_G	25/08/2024	23/09/2024
Crew #34	SIM_G	25/08/2024	23/09/2024

Os cursos do tipo SIM, têm disponibilidades específicas pois utilizam recursos externos, enquanto nos restantes cursos iremos considerar que existe uma regularidade na ocorrência dos *slots*, mensalmente ou semanalmente.

Na Tabela 5.4 encontram-se as descrições dos *slots* dos cursos que não dependem de recursos externos. No caso do curso INDOC será disponibilizado um número de *slots* correspondente à quantidade de segundas-feiras que existirem no período considerado. Isso ocorre porque, a partir da data de início, 01/05/2024, será iniciado um novo *slot* toda a segunda-feira com término 30 dias após o seu início.

Tabela 5.4 - Regularidade de ocorrência dos slots dos cursos

Curso	Ocorrência	Duração	Data início
INDOC	Todas as segundas	30 dias	01/05/2024
BT_C	Todas as quartas- feiras	2 dias	03/06/2024
BT_G	Todas as quartas- feiras	2 dias	03/06/2024
BT_E	Todas as quartas- feiras	2 dias	03/06/2024
LIFUS_C	Todas as segundas	7 dias	01/05/2024
LIFUS_G	Todas as segundas	7 dias	01/05/2024
LIFUS_E	Todas as segundas	7 dias	01/05/2024

Na Tabela 5.5 encontram-se as descrições dos *slots* disponíveis do curso SIM, com data de início e término associadas.

Tabela 5.5 - Slots do tipo de curso SIM

Curso	Início	Término
SIM_C	09/09/2024	27/09/2024
SIM_C	30/09/2024	24/10/2024
SIM_C	30/09/2024	22/10/2024
SIM_C	21/10/2024	08/11/2024
SIM_C	04/11/2024	22/11/2024
SIM_C	04/11/2024	26/11/2024
SIM_C	04/11/2024	27/11/2024
SIM_C	02/12/2024	19/12/2024
SIM_G	15/07/2024	12/08/2024
SIM_G	19/09/2024	15/10/2024
SIM_G	25/08/2024	23/09/2024
SIM_G	07/10/2024	01/11/2024
SIM_G	07/10/2024	01/11/2024
SIM_G	07/10/2024	01/11/2024
SIM_G	14/10/2024	09/11/2024
SIM_G	14/10/2024	06/11/2024
SIM_G	25/11/2024	20/12/2024
SIM_G	25/11/2024	20/12/2024
SIM_G	25/11/2024	20/12/2024
SIM_E	01/09/2024	30/09/2024
SIM_E	01/10/2024	30/10/2024
SIM_E	01/10/2024	30/10/2024
SIM_E	01/10/2024	30/10/2024
SIM_E	21/11/2024	20/12/2024
SIM_E	21/11/2024	20/12/2024

Por fim, na Tabela 5.6 encontram-se os dados referentes à tripulação desejável ao serviço, que indicam a quantidade necessária de tripulantes, distribuídos por tipo de tripulantes e por tipo de aeronave. E na Tabela 5.7, a tripulação mínima exigida, que é também considerada como requisito a ser cumprido.

Tabela 5.6 - Tripulação mensal desejável por tipo de aeronave e tipo de tripulante

		Tripulação Desejável										
Tripulante	Aeronave	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
PIC	C	97	100	100	100	103	103	103	103	103	107	107
SIC	C	59	61	61	61	63	63	63	63	63	65	65
PIC	E	38	35	35	35	35	31	31	31	31	28	28
SIC	E	22	20	20	20	20	19	19	19	19	17	17
PIC	G	61	61	66	66	66	66	66	70	70	70	70
SIC	G	34	34	36	36	36	36	36	39	39	39	39

Tabela 5.7 - Tripulação mínima exigida mensal por tipo de aeronave e tipo de tripulante

		Tripulação Mínima										
Tripulante	Aeronave	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
PIC	C	54,37	54,37	54,37	54,37	54,37	54,37	54,37	54,37	54,37	54,37	54,37
SIC	C	27,32	27,32	27,32	27,32	27,32	27,32	27,32	27,32	27,32	27,32	27,32
PIC	E	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95	11,95
SIC	E	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52	8,52
PIC	G	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75	31,75
SIC	G	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99	16,99

É importante destacar que o cálculo da quantidade de tripulantes é realizado tendo em conta as horas de trabalho disponíveis. Assim, um tripulante não corresponde necessariamente a um valor unitário na contagem.

Atualmente, em junho, a tripulação está distribuída da seguinte forma: 108,74 tripulantes da categoria PIC C, 54,64 SIC C, 23,9 PIC E, 17,04 SIC E, 63,5 PIC G e 33,98 SIC G.

5.2 Solução manual

A solução proposta pela empresa ao problema tem uma forte componente manual e demorou cerca de 4 horas a ser construída.

Esta solução tem o valor de 287,97, sendo que em média, um tripulante demora 143 dias a completar a sua formação e a soma das diferenças entre o número de tripulantes desejável e o dado pela solução é de 144,64.

As movimentações dos tripulantes pelos tipos de aeronaves em análise resultantes da solução manual, isto é, obtidas com base na solução manual estão ilustradas nas tabelas abaixo. Cada tabela traduz as movimentações de tripulantes ocorridas em cada categoria de tripulante, onde é possível observar o número de tripulantes desejável e o dado pela solução no primeiro dia de cada mês. Também é possível verificar o respectivo mês em que os novos tripulantes iniciam a sua formação e terminam.

Tabela 5.9 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC E dada pela solução manual

		PICE										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	38	35	35	35	35	31	31	31	31	28	28
	Solução	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	25,9	25,9	29,9
	Início de formação				2		4					
	Término de formação								2		4	
	Saídas											

Tabela 5.8 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC E dada pela solução manual

		SICE										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	22	20	20	20	20	19	19	19	19	17	17
	Solução	17,04	17,04	17,04	17,04	17,04	17,04	16,04	16,04	16,04	22,04	22,04
	Início de formação					6						
	Término de formação									6		
	Saídas						1					

Nas tabelas, Tabela 5.8 e Tabela 5.9, encontra-se o cenário resultante da solução manual para o tipo de aeronave E, onde existem doze novos tripulantes, seis do tipo PIC e seis do tipo SIC, além de uma saída de um tripulante do tipo SIC.

Relativamente aos tripulantes PIC E, dois iniciam a formação em setembro e terminam em janeiro, resultando assim no acréscimo de duas unidades na quantidade de tripulação disponível a partir do mês de fevereiro. Outros quatro tripulantes começam a formação em novembro e finalizam em março, o que adiciona quatro unidades à quantidade de tripulação disponível a partir de abril.

No caso dos tripulantes SIC E, um mudará de tipologia de aeronave a partir de novembro e, conseqüentemente deixará de estar disponível. Gerando um decréscimo de uma unidade na quantidade de tripulação disponível a partir do mês de dezembro, visto que a contagem reflete a disponibilidade no primeiro dia de cada mês. Por outro lado, seis novos tripulantes SIC E iniciarão a formação em outubro e concluirão em fevereiro resultando em um acréscimo de seis unidades à quantidade de tripulação disponível a partir de março.

Tabela 5.11 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC G dada pela solução manual

		PICG										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
	Desejável	61	61	66	66	66	66	66	70	70	70	70
	Solução	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	69,5	70,5
Entradas	Início de formação					7						
	Término de formação									6	1	
	Saídas											

Tabela 5.10 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC G dada pela solução manual

		SICG										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
	Desejável	34	34	36	36	36	36	36	39	39	39	39
	Solução	33,98	33,98	33,98	33,98	33,98	33,98	35,98	37,98	39,98	40,98	44,98
Entradas	Início de formação		2	2	2	1	4					
	Término de formação						2	2	2	1	4	
	Saídas											

Nas tabelas, Tabela 5.11 e Tabela 5.10, encontra-se o cenário resultante da solução manual para o tipo de aeronave G, onde existem dezoito novos tripulantes: sete do tipo PIC e onze do tipo SIC.

Os tripulantes PIC G iniciam a formação em outubro, sendo que seis finalizam o treinamento em fevereiro, resultando em um acréscimo de seis unidades na quantidade de tripulação disponível a partir deste mês. O restante tripulante conclui a formação em março, o que adiciona uma unidade à quantidade de tripulação disponível em abril.

Quanto aos tripulantes SIC G, dois começam a formação em julho e terminam em novembro, gerando um acréscimo de duas unidades na quantidade de tripulação disponível a partir do mês de dezembro. Outros dois iniciam em agosto e terminam em dezembro, acrescentando mais duas unidades à tripulação disponível a partir de janeiro. Adicionalmente, dois tripulantes começam a formação em setembro e concluem em janeiro, resultando no acréscimo de mais duas unidades disponíveis no mês de fevereiro. Um tripulante inicia o treinamento em outubro e finaliza em fevereiro, resultando no acréscimo de uma unidade à tripulação disponível a partir do mês seguinte. Por fim, os quatro tripulantes restantes começam a formação em novembro e concluem em março, o que resulta no acréscimo de quatro unidades à tripulação disponível a partir de abril.

Tabela 5.12 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC C dada pela solução manual

		PICC										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Desejável		97	100	100	100	103	103	103	103	103	107	107
Solução		108,7	108,7	108,7	108,7	108,7	105,7	104,7	104,7	104,7	104,7	106,7
Entradas	Início de formação						2					
	Término de formação										2	
	Saídas					3	1					

Tabela 5.13 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC C dada pela solução manual

		SICC										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Desejável		59	61	61	61	63	63	63	63	63	65	65
Solução		54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	58,64	58,64	58,64	58,64
Entradas	Início de formação			4								
	Término de formação							4				
	Saídas											

Nas tabelas, Tabela 5.12 e Tabela 5.13, encontra-se o cenário resultante da solução manual para o tipo de aeronave C, existem seis novos tripulantes: dois do tipo PIC e quatro do tipo SIC, além de quatro saídas, todas de tripulantes PIC.

Os tripulantes PIC C começam a formação em novembro e estarão disponíveis no final de março, resultando no acréscimo de duas unidades à tripulação disponível no mês seguinte. Quanto às saídas, três ocorrem em outubro e uma em novembro, assim, a quantidade de tripulantes disponíveis será reduzida em três unidades a partir de novembro e sofrerá uma nova redução de uma unidade a partir de dezembro.

Já os quatro novos tripulantes SIC C iniciam a formação em agosto e a conclusão será em dezembro, pelo que constaram na cotagem de tripulação disponível a partir de janeiro.

5.3 Modelo PLI

Através do software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio e da formulação apresentada na seção 4.2, é possível encontrar a melhor solução para o problema. Para facilitar a utilização, foi desenvolvida uma simples aplicação para auxiliar a inserção de dados e a visualização e análise da solução. Esta aplicação encontra-se detalhada no Anexo A3 – Guia de utilizador - Aplicação.

Este método retorna a melhor solução para o problema em mãos. No entanto, pode se tornar inviável quando aplicado a um número elevado de tripulantes em formação, pois pode não conseguir resolver o problema em tempo útil.

No âmbito do caso prático, é possível encontrar a melhor solução para o problema em 34 segundos, sendo este composto por 25 308 variáveis, todas binárias, e 30 842 restrições, com um valor da função objetivo de 281,37.

A formação de um tripulante tem a duração média de 137,17 dias, conforme a solução e a soma das diferenças entre o número de tripulantes desejável e o dado pela solução é de 144,2.

As movimentações dos tripulantes nos tipos de aeronaves em análise resultantes da solução do modelo PLI são descritas adiante.

Tabela 5.14 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC E dado pelo modelo PLI

		PICE										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	38	35	35	35	35	31	31	31	31	28	28
	Solução	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	25,9	25,9	29,9
	Início de formação				2		4					
	Término de formação								2		4	
	Saídas											

Tabela 5.15 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC E dado pelo modelo PLI

		SICE										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	22	20	20	20	20	19	19	19	19	17	17
	Solução	17,04	17,04	17,04	17,04	16,04	16,04	16,04	16,04	16,04	22,04	22,04
	Início de formação			6								
	Término de formação									6		
	Saídas				1							

Nas tabelas, Tabela 5.14 e Tabela 5.15, encontra-se o cenário resultante da solução dada pelo modelo PLI para o tipo de aeronave E.

Entre os novos tripulantes PIC E, dois iniciarão a formação em setembro e terminam em janeiro, enquanto os outros quatro começam em novembro, concluindo em março. Assim a quantidade de tripulantes disponíveis sofrerá um acréscimo de duas unidades a partir de fevereiro e um novo aumento de quatro unidades a partir de abril.

Quanto aos tripulantes da categoria SIC E, os seis novos tripulantes iniciarão a formação em agosto concluindo em fevereiro, resultando num acréscimo de seis unidades à

tripulação disponível a partir do mês de março. Um tripulante mudará de tipologia de aeronave em setembro, ficando assim indisponível, gerando um decréscimo de uma unidade à tripulação disponível a partir de outubro.

Tabela 5.17 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC G dado pelo modelo PLI

		PIC G										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	61	61	66	66	66	66	66	70	70	70	70
	Solução	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	66,5	70,5	
	Início de formação					4	3					
	Término de formação									3	4	
Saídas												

Tabela 5.16 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC G dado pelo modelo PLI

		SIC G										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	34	34	36	36	36	36	36	39	39	39	39
	Solução	33,98	33,98	33,98	33,98	33,98	33,98	35,98	37,98	39,98	42,98	44,98
	Início de formação		2	2	2	4	1					
	Término de formação						2	2	2	3	2	
Saídas												

Nas tabelas, Tabela 5.16 e Tabela 5.17, encontra-se o cenário resultante da solução dada pelo modelo PLI para o tipo de aeronave G.

Quanto aos tripulantes PIC G, quatro começam a sua formação em outubro, com três finalizando em fevereiro e um em março, resultando num acréscimo de três unidades a partir de março e de outro acréscimo de uma unidade a partir de abril em relação à quantidade de tripulação disponível. Outros três PIC G começam a sua formação em novembro com conclusão em março, assim existe um novo aumento da quantidade de tripulação disponível a partir de abril de três unidades.

Quanto aos SIC G, dois iniciam em julho, finalizando em novembro, dois em agosto com término em dezembro, dois em setembro que finalizam em janeiro, quatro em outubro, do qual três terminam em fevereiro e um em março, e por fim um tripulante SIC G inicia em novembro, finalizando em março.

Os tripulantes SIC G, dois iniciarão a formação no mês de julho e concluirão em novembro, sendo contabilizados como tripulantes disponíveis a partir de dezembro. Outros dois começarão a formação em agosto, finalizando em dezembro, gerando um acréscimo de duas unidades à tripulação disponível a partir de janeiro. Dois tripulantes

iniciarão o seu treinamento em setembro e concluirão em janeiro, sendo contabilizados como tripulantes disponíveis a partir de fevereiro.

Quatro tripulantes SIC G iniciarão a formação em outubro, sendo que três concluirão o treinamento ao final de fevereiro, ficando disponíveis a partir de março, e o quarto finalizará em março, resultando no acréscimo de três unidades a partir de março e outra unidade a partir de abril em relação à quantidade de tripulação disponível. Por fim, um último tripulante SIC G começará a formação em novembro e concluirá o treinamento ao final de março, sendo contabilizado como tripulante disponível a partir do mês de abril.

Tabela 5.18 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC C dado pelo modelo PLI

		PICC										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Desejável		97	100	100	100	103	103	103	103	103	107	107
Solução		108,74	108,74	108,74	108,74	108,74	108,74	104,74	104,74	106,74	106,74	106,74
Entradas	Início de formação				2							
	Término de formação							2				
	Saídas						4					

Tabela 5.19 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC C dado pelo modelo PLI

		SICC										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Desejável		59	61	61	61	63	63	63	63	63	65	65
Solução		54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	58,64	58,64	58,64
Entradas	Início de formação			4								
	Término de formação							4				
	Saídas											

Nas tabelas, Tabela 5.18 e Tabela 5.19, encontra-se o cenário resultante da solução dada pelo modelo PLI para o tipo de aeronave C.

Os novos tripulantes PIC C começam a formação em setembro e concluem em janeiro, as saídas ocorrem todas no mês de novembro, gerando assim um acréscimo de duas unidades à tripulação disponível a partir de fevereiro e um decréscimo de quatro unidades a partir de dezembro.

Os quatro novos tripulantes SIC C iniciam a formação em agosto com término em janeiro, sendo contabilizados para o indicador de tripulação disponível a partir de fevereiro.

A solução do método PLI está detalhada no Anexo A1 – Solução do modelo PLI.

5.4 Heurística

A heurística foi implementada em Microsoft Visual Basic for Applications, onde é possível encontrar várias soluções para o problema consoante o número de iterações considerado. Em semelhança ao método anterior, existe uma aplicação de apoio ao utilizador pormenorizada no Anexo A3 – Guia de utilizador - Aplicação.

Foram realizados vários testes considerando diferentes números de iterações, ilustrados na Tabela 5.20. Desta forma é possível verificar que o aumento do número de iterações considerado na heurística, resulta no aumento de tempo de processamento, em segundos, e no decréscimo do valor da solução, como seria de esperar.

Tabela 5.20 - Tempo de execução e valor das soluções por nº de iterações

nº Iterações	2500	5000	7000	10 000
Tempo (segundos)	12	24	34	46
Valor da solução	309,81	301,36	300,39	296,56

Considerando a melhor solução dada pela heurística para o caso prático, um tripulante realiza a sua formação, em média, durante 146,36 dias e a soma das diferenças entre o número de tripulantes desejável e o dado pela solução é de 150,2.

As movimentações dos tripulantes nos tipos de aeronaves em análise resultantes da solução obtida pela Heurística foram as seguintes.

Tabela 5.21 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC E dada pela Heurística

		PICE										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	38	35	35	35	35	31	31	31	31	28	28
	Solução	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	23,9	25,9	26,9	29,9
	Início de formação				2	1	3					
	Término de formação							2	1	3		
Saídas												

Tabela 5.22 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC E dada pela Heurística

		SICE										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	22	20	20	20	20	19	19	19	19	17	17
	Solução	17,04	17,04	17,04	17,04	16,04	16,04	16,04	16,04	16,04	21,04	22,04
	Início de formação		6									
	Término de formação								5	1		
Saídas					1							

Nas tabelas, Tabela 5.21 e Tabela 5.22, encontra-se o cenário resultante da solução dada pela heurística para o tipo de aeronave E.

Segundo a solução, nas aeronaves E, dois tripulantes PIC E iniciam a formação em setembro e estarão disponíveis após janeiro, um inicia em outubro e termina em fevereiro e os restantes três tripulantes começam em novembro, finalizando em março. Desta forma o indicador de tripulação disponível sofre diversos aumentos: duas unidades a partir de fevereiro, uma unidade a partir de março e por último três unidades a partir de abril.

No caso dos tripulantes SIC E, um tripulante mudará de tipologia de aeronave em setembro, pelo que deixará de ser contabilizado como tripulante disponível a partir de outubro. Seis novos tripulantes SIC E iniciarão a formação em julho, no qual cinco terminam em fevereiro e um em março, gerando um acréscimo de cinco unidades a partir de março e um novo acréscimo de uma unidade a partir de abril associado à tripulação disponível.

Tabela 5.24 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC G dada pela Heurística

		PICG										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Desejável		61	61	66	66	66	66	66	70	70	70	70
Solução		63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	63,5	67,5	70,5
Entradas	Início de formação					5	2					
	Término de formação									4	3	
	Saídas											

Tabela 5.23 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC G dada pela Heurística

		SICG										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Desejável		34	34	36	36	36	36	36	39	39	39	39
Solução		33,98	33,98	33,98	33,98	33,98	33,98	35,98	37,98	37,98	41,98	44,98
Entradas	Início de formação		2	2	2	3	2					
	Término de formação						2	2		4	3	
	Saídas											

Nas tabelas, Tabela 5.23 e Tabela 5.24, encontra-se o cenário resultante da solução dada pela heurística para o tipo de aeronave G.

Cinco tripulantes PIC G iniciam a formação em outubro, com quatro finalizando em fevereiro e um em março. Os dois restantes iniciam em novembro e estarão prontos em março. Desta forma o indicador de tripulação disponível irá sofrer um aumento de quatro unidades a partir de março e outro aumento de três unidades a partir de abril.

Quanto aos SIC G, dois começam em julho e terminam em novembro, dois em agosto e finalizam em dezembro, dois em setembro com término em fevereiro, três em outubro, finalizando dois em fevereiro e um em março, e dois restantes começam em novembro, com término em março. Gerando assim, as seguintes alterações no indicador referente à tripulação disponível: acréscimo de duas unidades a partir de dezembro, acréscimo de mais duas unidades a partir de janeiro, aumento de quatro unidades a partir de março e por fim o aumento de três unidades a partir de abril.

Tabela 5.25 - Movimentações dos tripulantes de categoria PIC C dada pela Heurística

		PICC										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	97	100	100	100	103	103	103	103	103	107	107
	Solução	108,74	108,74	108,74	108,74	108,74	104,74	104,74	104,74	106,74	106,74	106,74
	Início de formação				2							
	Término de formação							2				
Saídas						4						

Tabela 5.26 - Movimentações dos tripulantes de categoria SIC C dada pela Heurística

		SICC										
		Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr
Entradas	Desejável	59	61	61	61	63	63	63	63	63	65	65
	Solução	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	54,64	58,64	58,64	58,64
	Início de formação		4									
	Término de formação							4				
Saídas												

Nas tabelas, Tabela 5.25 e Tabela 5.26, encontra-se o cenário resultante da solução dada pela heurística para o tipo de aeronave C.

Os tripulantes PIC C iniciam a formação em setembro e concluirão em janeiro, pelo que serão contabilizados no indicador de tripulação disponível a partir de fevereiro. Quanto às saídas, estas ocorrem todas em outubro, resultando no decréscimo de quatro unidades à tripulação disponível a partir de novembro.

Os quatro novos tripulantes SIC C iniciam a formação em julho terminando em janeiro, gerando um acréscimo de quatro unidades à tripulação disponível a partir do mês de fevereiro.

A solução em detalhe encontra-se no Anexo A2 – Solução da Heurística.

5.5 Comparação de Resultados

Para resolver o caso prático, foram utilizados três métodos distintos: formulação PLI, heurística construtiva e solução manual, resultando em três respostas diferentes para o problema. Para comparar as soluções, foram considerados três indicadores principais: o tempo de processamento de cada método, a duração média da formação dos tripulantes (em dias) e a diferença entre o número de tripulantes desejável e o dado pela solução.

Na Tabela 5.27 encontra-se a duração média da formação dos tripulantes, em dias, por método, onde o método PLI apresenta o menor tempo, com 137 dias. A heurística, por sua vez, tem o maior tempo de formação, com 146 dias. O método manual tem uma média de 143 dias, posicionando-se entre o modelo PLI e a heurística. Embora seja melhor do que a heurística, ainda é inferior ao modelo PLI. Portanto, o modelo PLI é o método mais eficiente, com uma vantagem de 9 dias em relação à heurística e 6 dias em relação ao método manual. Essas diferenças podem ser significativas dependendo da escala do problema.

Tabela 5.27 - Duração média do tempo de formação por método

	Modelo PLI	Heurística	Manual
Duração média (dias)	137	146	143

O indicador da diferença entre o número de tripulantes desejável em serviço e o fornecido pela solução é essencial para identificar tendências entre os tipos de aeronaves e determinar os modelos que melhor atendem essa carência. Na Tabela 5.28 encontra-se o indicador por método utilizado e por categoria de tripulante. O valor sombreado corresponde ao melhor resultado do indicador por categoria de tripulantes.

Tabela 5.28 - Soma das diferenças entre o número de tripulantes desejável e o dado pela solução, por categoria de tripulação em cada método

	PICE	SICE	PICG	SICG	PICC	SICC	Total
Modelo PLI	85,10	19,56	23,50	-1,78	-56,14	73,96	144,20
Heurística	84,10	20,56	22,50	1,22	-52,14	73,96	150,20
Manual	85,10	17,56	20,50	0,22	-48,70	69,96	144,64

No método PLI, há uma tendência de gerar excedentes de tripulação, como observado em SIC G e PIC C, onde os resultados foram melhores em comparação com as outras soluções. A heurística, por outro lado, obteve o melhor resultado apenas em PIC E. A

solução manual apresentou os melhores valores em metade das combinações tipo de aeronave e categoria de tripulante analisadas: SIC E, PIC G e SIC C.

Portanto, considerando o total de diferenças, o modelo PLI apresenta a menor soma total de diferenças (144,20). No entanto, o método manual, apesar de seu valor total ser ligeiramente superior, ele mostra-se mais consistente em algumas categorias, com menores desvios em relação ao desejável. O método da heurística mostra a maior soma total, sendo assim o método onde existem os maiores desvios em relação ao desejável.

Por fim, é importante analisar a relação tempo despendido e qualidade da solução, sendo esta última uma combinação dos dois indicadores analisados anteriormente. Na Tabela 5.29 encontram-se os indicadores, duração de execução e qualidade da solução, por método utilizado.

Tabela 5.29 – Duração de execução e qualidade das soluções por método

Método	Modelo PLI	Heurística				Manual
		nº iterações				
		2500	5000	7000	10 000	
Duração (segundos)	34	12	24	34	46	14 400
Valor da solução	281,37	309,81	301,36	300,39	296,56	287,97

A solução resultante do modelo PLI, é a melhor solução ao nível da qualidade da solução e apresenta um tempo de execução de apenas 34 segundos. A Heurística apresenta dados de vários testes realizados, o teste com melhor qualidade, tem uma diferença de 5% em relação à melhor solução, no entanto esta demora 46 segundos o que significa um aumento de 12 segundos em relação ao da melhor solução. A execução mais rápida da heurística, com 12 segundos e 2500 iterações apresenta uma solução de valor 10% inferior ao da melhor solução.

A solução manual, apresenta o valor estimado de 287,97, apenas 2% abaixo da melhor solução, mas com um tempo de execução significativamente maior, 4 horas.

A heurística também apresenta boas soluções com tempos de execução reduzidos. Já o método manual, embora produza uma solução de alta qualidade, requer um tempo significativamente maior em comparação aos outros métodos.

Capítulo 6. Conclusão, Limitações e Trabalhos futuros

Ao longo deste projeto foram elaborados dois métodos que visam realizar o escalonamento da formação de tripulantes. No primeiro método, é exato, consistiu na formulação de um modelo em PLI, e recorrer ao software IBM ILOG CPLEX Optimization Studio. O segundo método, sendo aproximado, consistiu no desenvolvimento de uma heurística construtiva em *Visual Basic for Application (VBA)*. Ambos os métodos têm o auxílio de uma aplicação desenvolvida em VBA para facilitar a introdução de dados e de um relatório desenvolvido em *Power BI* para visualizar e analisar a solução obtida.

Foram elaborados dois métodos porque, apesar de no caso prático analisado, o método exato apresentar um tempo de execução reduzido, é expectável que para um caso com um número elevado de tripulantes este tenha um tempo de execução elevado, nesses casos pode ser favorável utilizar o método aproximado, cujo tempo de execução não irá variar tanto.

No presente trabalho pretendeu-se auxiliar a empresa de aviação executiva no processo de escalonamento das formações de tripulantes por ser um trabalho com uma vertente manual, demorada e por ser uma tarefa recorrente. Contudo, e apesar dos principais objetivos terem sido alcançados, existem algumas limitações e pontos de melhoria, nomeadamente, o trabalho desenvolvido não cobre todas as formações (UPG) e a função objetivo construída na formulação PLI sugere que um dia equivale a uma unidade de diferença entre o nº de tripulantes desejável e o dado pela solução. Assim, pode ser melhorado em trabalhos futuros através da construção de um modelo multiobjectivo. No entanto, o presente trabalho é uma boa base para futuros trabalhos e melhoramentos.

Ainda assim, os métodos desenvolvidos serão uma ótima ferramenta para simular cenários a fim de perceber quais as melhores datas para os cursos e facilitar a elaboração da calendarização das formações de tripulantes, mesmo que a solução dada necessite de alguns ajustes.

Referências Bibliográficas

- Baker, K. R., & Trietsch, D. (2009). *Principles of Sequencing and Scheduling*. Wiley.
- Brucker, P. (2007). *Scheduling Algorithms*. Springer Science & Business Media.
- Devassia, J., Salazar-Aguilar, M., & Boyer, V. (2018). Flexible job-shop scheduling problem with resource recovery constraints. *International Journal of Production Research*, 56(9), 3326-3343.
- Dorigo, M., & Stützle, T. (2004). *Ant Colony Optimization*. MIT Press.
- Framinan, J. M., Perez-Gonzalez, P., Ruiz-Hernaiz, I., & Leisten, R. (2019). Deterministic assembly scheduling problems: A review and classification of concurrent-type scheduling models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 274(3), 799-822.
- Garey, M. R., & Johnson, D. S. (1979). *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. W. H. Freeman and Company.
- Graham, R. L., Lawler, E. L., Lenstra, J. K., & Rinnooy Kan, A. H. (1979). Optimization and approximation in deterministic sequencing and scheduling: a survey. *Annals of Discrete Mathematics*, 5, 287-326.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press.
- Johnson, S. M. (1954). Optimal two-and three-stage production schedules with setup times included. *Naval Research Logistics Quarterly*, 1(1), 61-68.
- Krikpatrick, S., Gelatt, C. D., & Vercchi, M. P. (1983). Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.
- Pinedo, M. (2016). *Scheduling: Theory, algorithms, and systems*. Springer.
- Talbi, E. G. (2009). *Metaheuristics: From Design to Implementation*. John Wiley & Sons.

Anexos

Anexo A1 – Solução do modelo PLI

Solução obtida pelo modelo PLI.



Figura 1 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave E segundo o modelo PLI

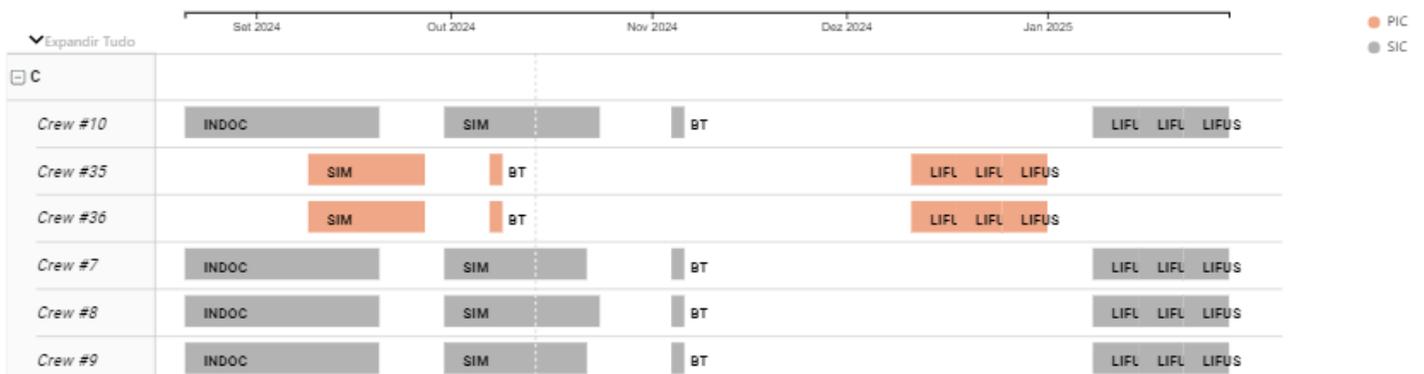


Figura 2 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave C segundo o modelo PLI

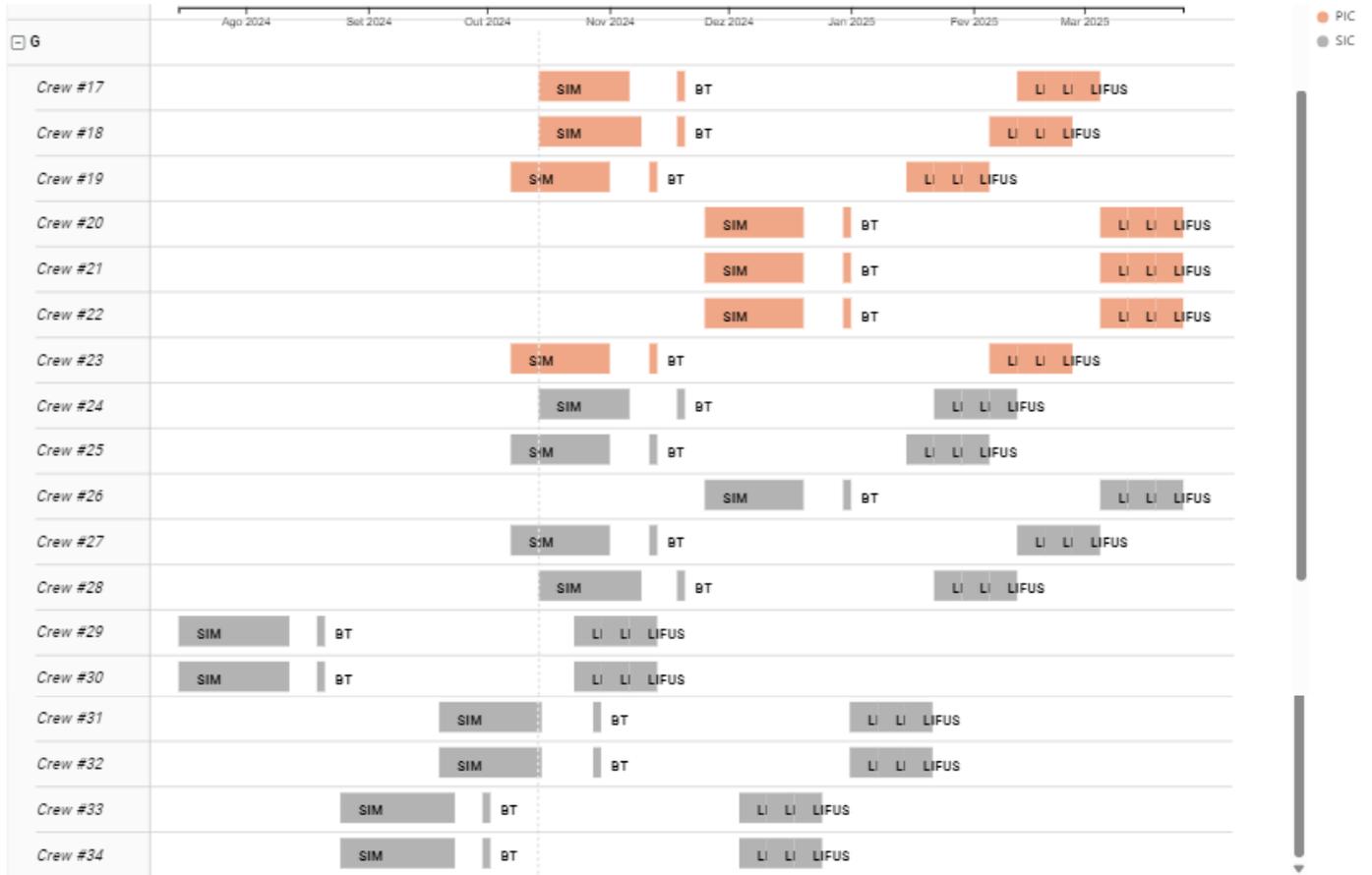


Figura 3 – Formações dos tripulantes do tipo de aeronave G segundo o modelo PLI

Anexo A2 – Solução da Heurística

Solução obtida pelo método da heurística considerando 10 000 iterações.



Figura 4 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave E segundo a Heurística

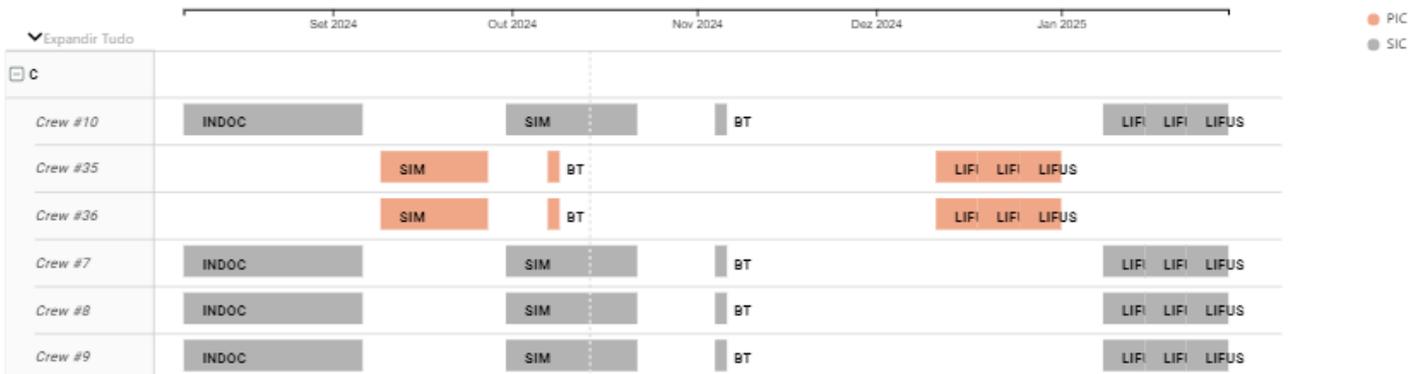


Figura 5 – Formações dos tripulantes do tipo de aeronave C segundo a Heurística

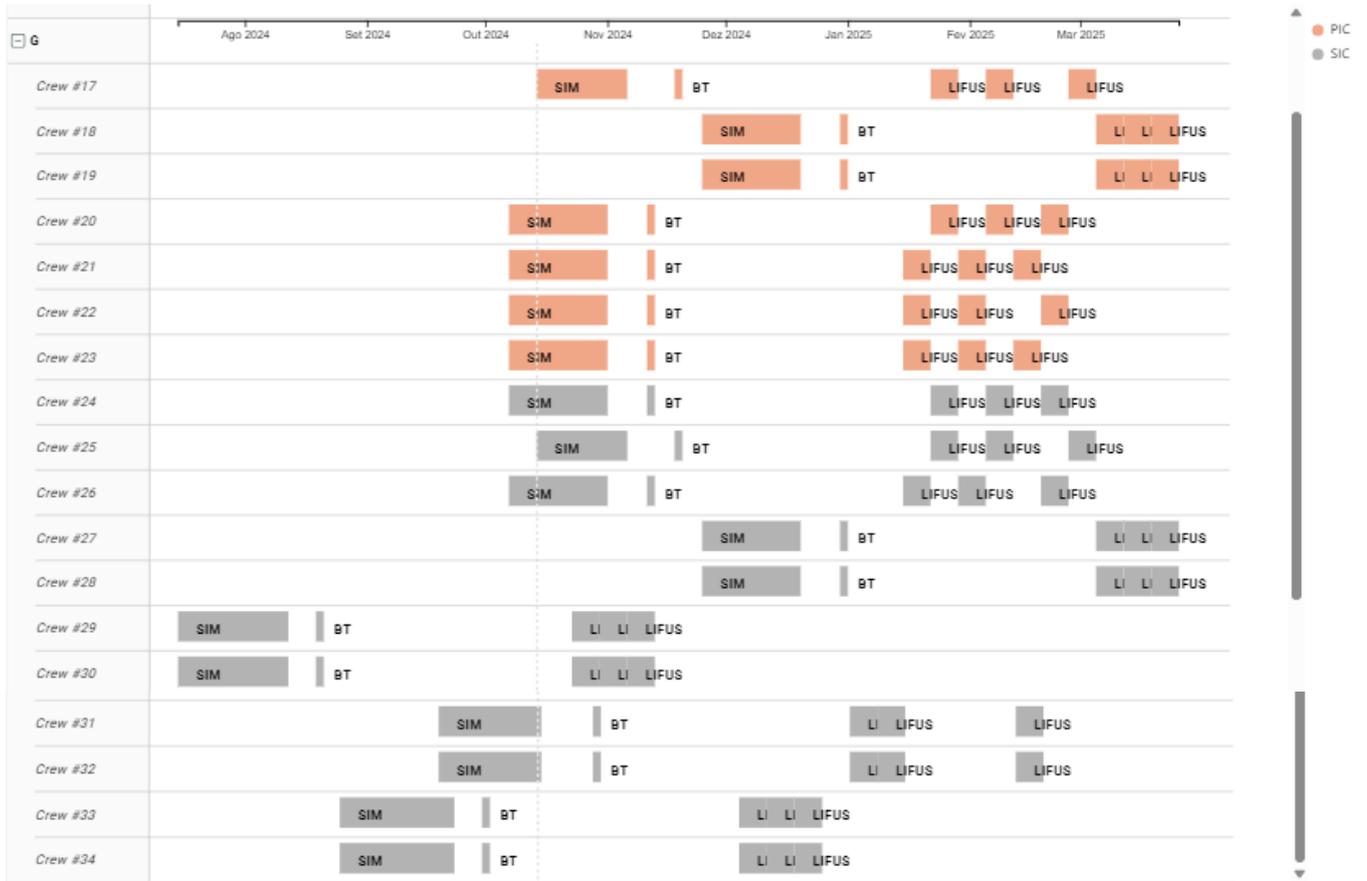


Figura 6 - Formações dos tripulantes do tipo de aeronave G segundo a Heurística

Anexo A3 – Guia de utilizador - Aplicação

Utilizando o software *Visual Basic for Application (VBA)*, foi desenvolvida uma aplicação em *Microsoft Excel* para melhorar o processo e a acessibilidade às ferramentas desenvolvidas.

A aplicação é composta por duas versões, uma para cada método desenvolvido (heurística e modelo PLI). As versões têm ligeiras diferenças associadas à organização dos dados. A versão da aplicação mais completa diz respeito à versão associada à heurística, pelo que é esta a versão que será apresentada.

O acesso à aplicação é realizado pelo botão que consta da primeira folha do ficheiro Excel em que a aplicação se insere (Figura 7). Este botão, por sua vez, direciona o utilizador para o menu (Figura 8). No menu é possível escolher qual a funcionalidade da aplicação que o utilizador pretende utilizar: auxílio em introduzir dados, gerar um escalonamento através da heurística desenvolvida ou realizar para um relatório, em *Power BI*, onde é possível visualizar e analisar a solução do problema.



Figura 7- Botão Inicial da aplicação

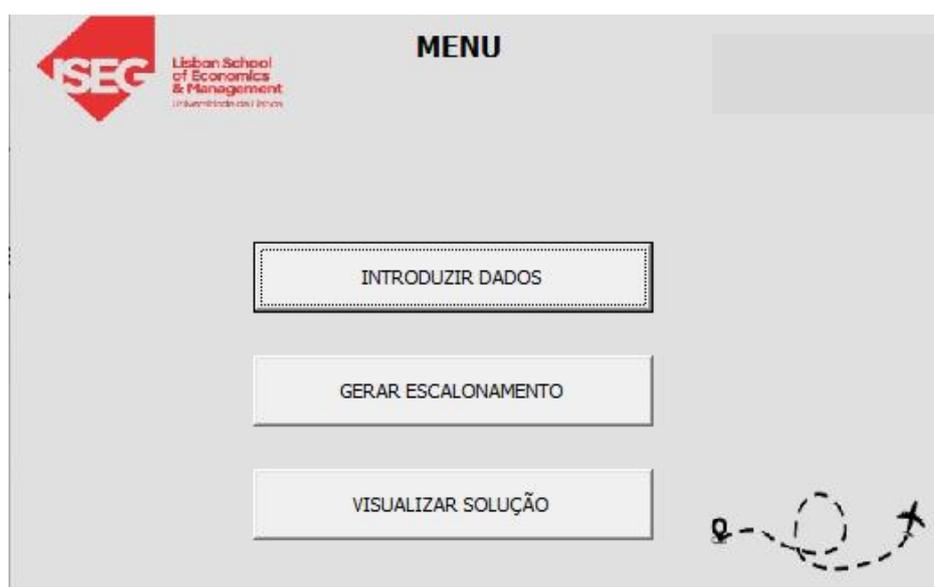


Figura 8 - Menu Inicial

A opção “INTRODUZIR DADOS” gera um submenu onde se permite escolher entre inserir tripulantes ou *slots* (Figura 9). No caso de se pretender inserir tripulação (Figura 10), é possível inserir apenas um tripulante (Figura 11), opção utilizada quando se sabe todas as características do tripulante, inserir um conjunto de tripulantes (Figura 13), quando se pretende inserir um conjunto de tripulantes com as mesmas características, ou inserir um tripulante artificial (Figura 12). Para cada caso, a inserção dos tripulantes é realizada através de um simples questionário.

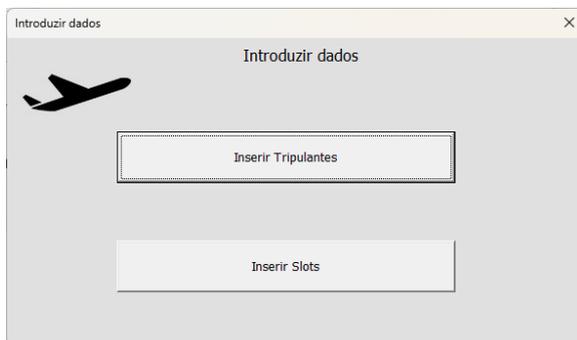


Figura 9 – Menu Introdução de dados



Figura 10 - Menu Inserir Tripulantes

Figura 11 - Questionário para inserir um novo tripulante

Figura 12 - Questionário para inserir um tripulante artificial

Figura 13 - Questionário para inserir um conjunto de tripulantes

No caso de se pretender inserir *slots* (Figura 14), é possível inserir apenas um *slot* de cada vez (Figura 15), ou inserir um conjunto de *slots*, este composto por *slots* do mesmo curso que se repetem ao longo do tempo, semanalmente ou mensalmente (Figura 16). O processo de inserir os *slots* é análogo ao dos tripulantes.

Figura 14 - Menu Inserir Slots

Figura 15 - Questionário para inserir novo slot

Figura 16 - Questionário para inserir um conjunto de slots

No caso de o utilizador seleccionar a opção do menu, “GERAR ESCALONAMENTO”, o método heurístico desenvolvido e explicado ao longo do presente trabalho é executado.

A opção “VISUALIZAR SOLUÇÃO” (Figura 8) encaminha o utilizador para um relatório, desenvolvido em *Power BI*, que permite a visualização e a análise da solução do problema de uma forma clara e intuitiva.

O relatório é composto por cinco páginas. A primeira sendo destinada à visão geral da solução (Figura 19), onde é possível observar toda a tripulação, os *slots* e os tipos de cursos que irão realizar ao longo do tempo. Esta página tem uma aba de filtros de forma a segmentar a pesquisa do utilizador (Figura 18) e um menu que permite navegar entre as páginas (Figura 17).

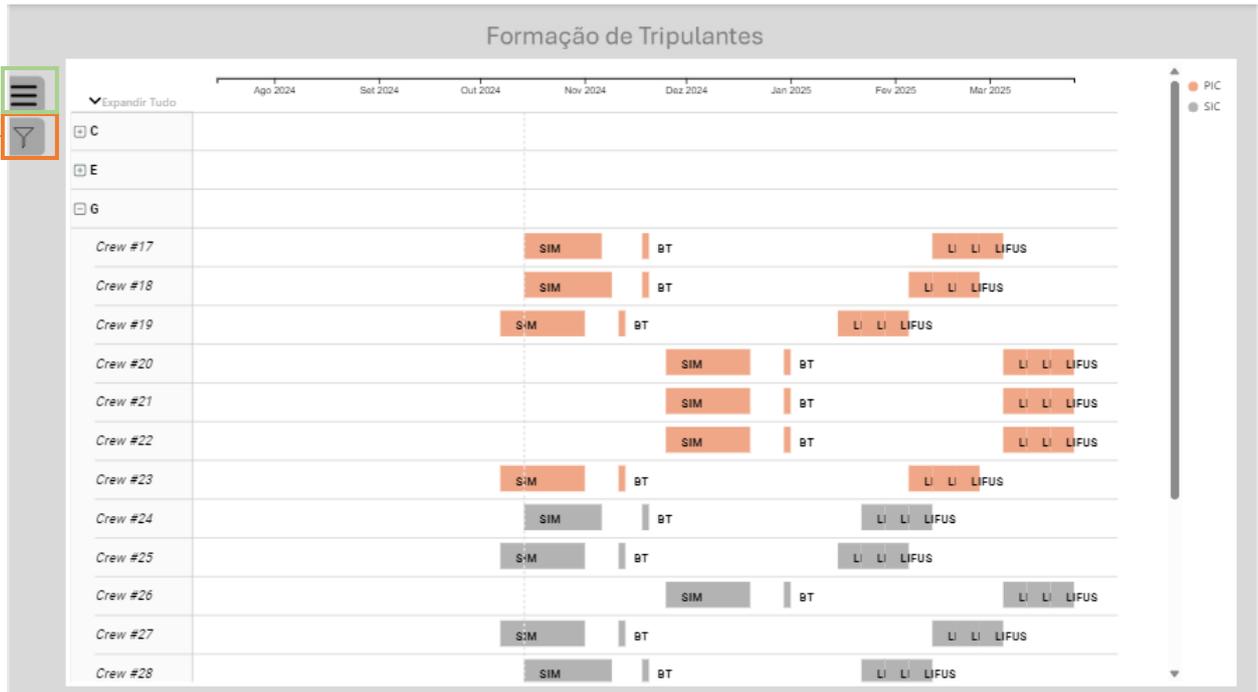


Figura 19 – Página Inicial do relatório

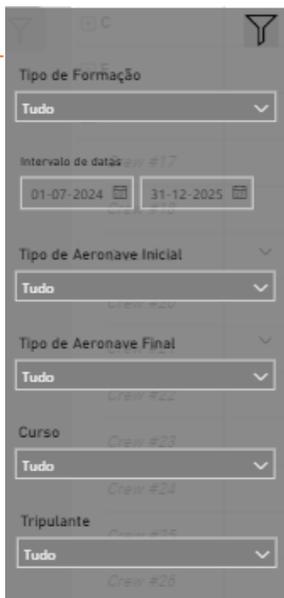


Figura 18 – Aba filtros



Figura 17 - Aba Menu

A aba menu (Figura 17) está presente em todas as páginas do relatório. As seguintes páginas do relatório são mais dedicadas à análise da solução por temas.

A página intitulada como “Ficha Tripulante” (Figura 20) reúne todas as características relativas ao tripulante em análise, bem como a formação do mesmo de forma pormenorizada.

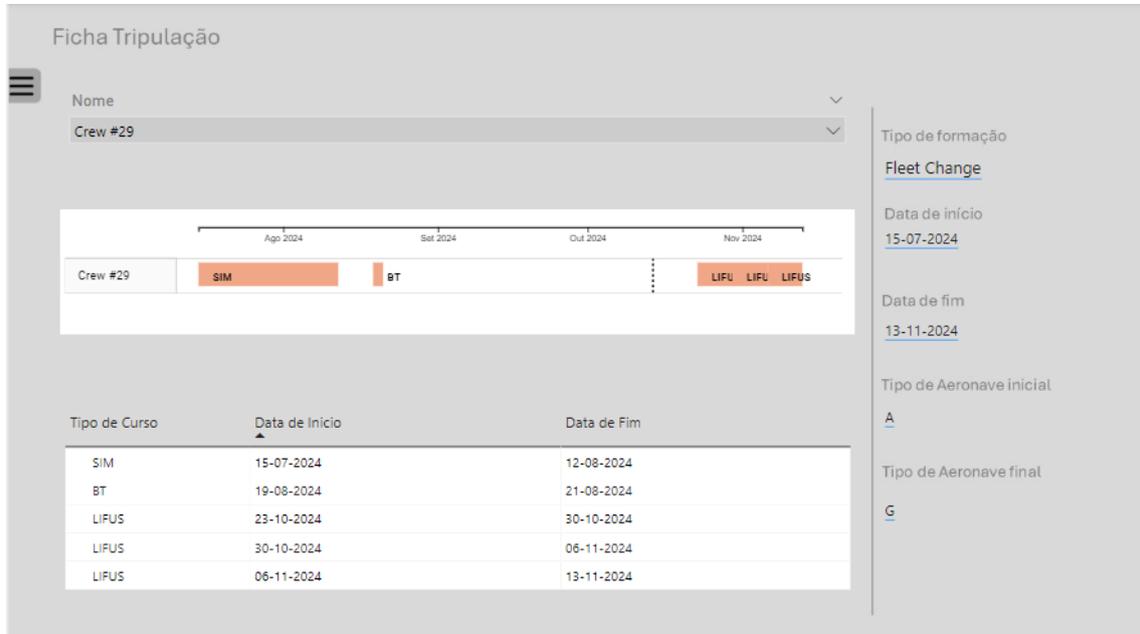


Figura 20 – Página do relatório "Ficha Tripulante"

A página “Ficha Slot” (Figura 21) fornece todas as características sobre o slot em análise.

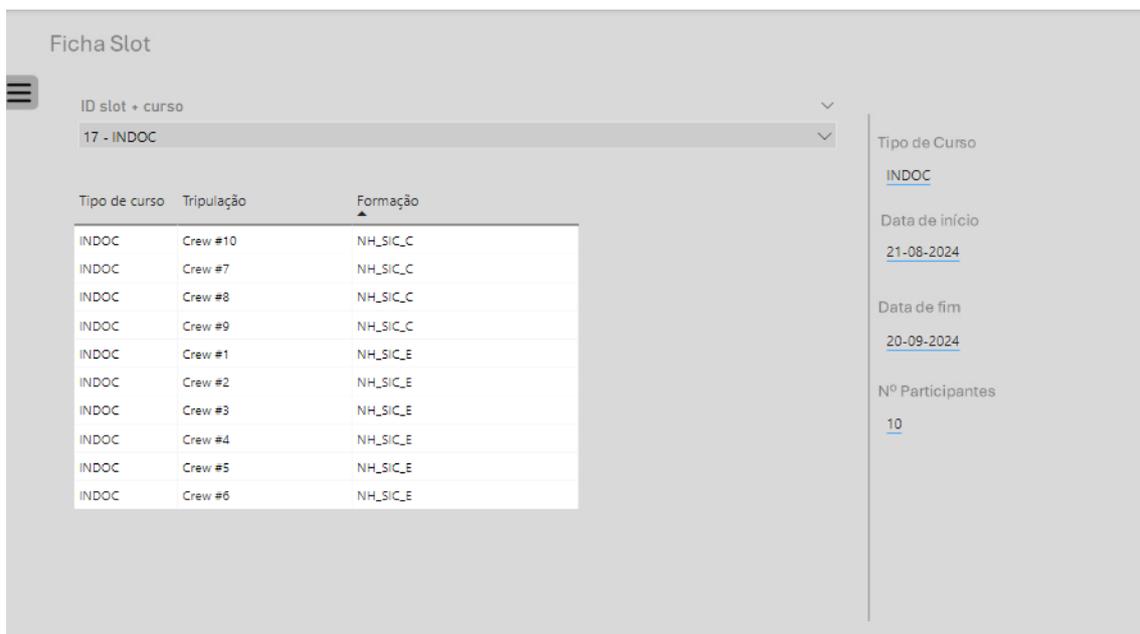


Figura 21 - Página do relatório "Ficha Slot"

A página seguinte (Figura 22) é dedicada à análise da tripulação disponível em relação à tripulação desejável. A página é composta por uma tabela, onde, por tipo de aeronave em análise, é possível observar por mês, o número de tripulantes PIC desejável, o número mínimo de tripulantes PIC exigido, o número de tripulantes PIC existentes, dado pela solução, e a percentagem de tripulantes PIC existentes em relação ao número de tripulantes PIC desejável, seguidamente, a análise análoga é feita para os tripulantes do tipo SIC.

Date	PIC Desejável	PIC Mínimo	PIC Existente	SIC Desejável	SIC Mínimo	SIC Existente		
Junho de 2024	38	19,00	23,90	63%	22	11,00	17,04	77%
Julho de 2024	35	17,50	23,90	68%	20	10,00	17,04	85%
Agosto de 2024	35	17,50	23,90	68%	20	10,00	17,04	85%
Setembro de 2024	35	17,50	23,90	68%	20	10,00	17,04	85%
Outubro de 2024	35	17,50	23,90	68%	20	10,00	17,04	85%
Novembro de 2024	31	15,50	23,90	77%	19	9,50	17,04	90%
Dezembro de 2024	31	15,50	23,90	77%	19	9,50	17,04	90%
Janeiro de 2025	31	15,50	23,90	77%	19	9,50	17,04	90%
Fevereiro de 2025	31	15,50	23,90	77%	19	9,50	17,04	90%
Março de 2025	28	14,00	23,90	85%	17	8,50	17,04	100%
Abril de 2025	28	14,00	23,90	85%	17	8,50	17,04	100%

Figura 22 - Página do relatório "Tripulação"

Por fim, a última página deste relatório é dedicada à análise da ocupação dos cursos (Figura 23). Esta análise é feita por *slot* e por curso.

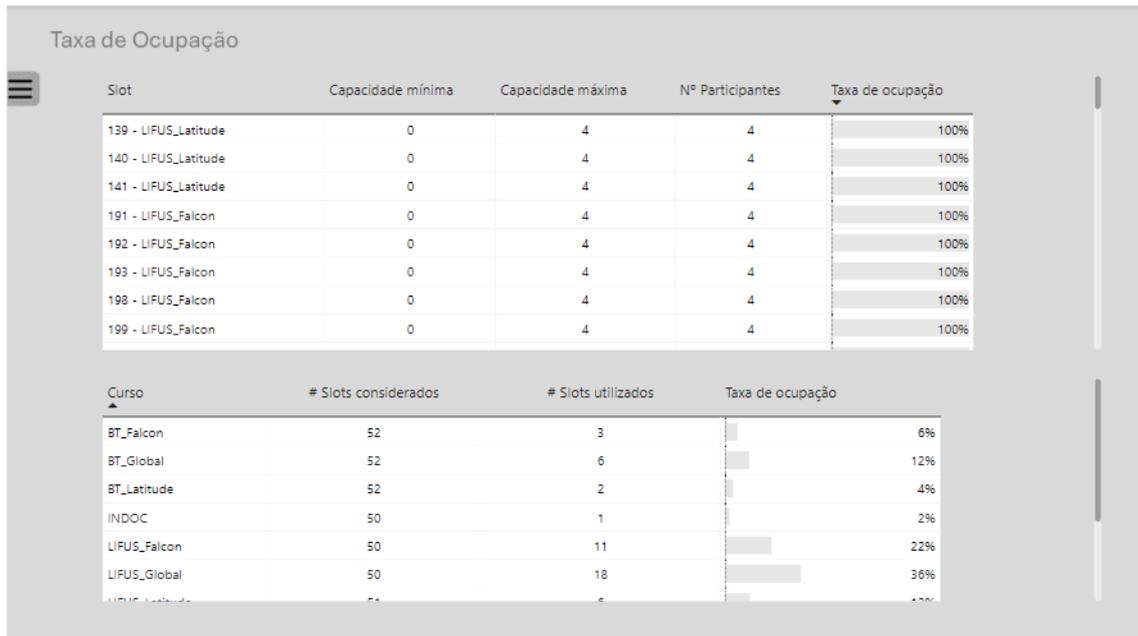


Figura 23 - Página do relatório "Taxa de Ocupação"

Por fim, em relação à outra versão da aplicação, a única diferença prende-se no menu inicial (Figura 8) com a inexistência do botão "GERAR ESCALONAMENTO".

Anexo A4 – Terminologia

Tipo de aeronave: A, B, C, D, E, F e G

Tipo de tripulante: PIC e SIC

Categoria de tripulante (combinação de tipo de aeronave e tipo de tripulante): PIC A, SIC A, PIC B, SIC B, PIC C, SIC C, PIC D, SIC D, PIC E, SIC E, PIC F, SIC F, PIC G e SIC G

Tipo de formação: NH, FC, UPG e FC+UPG

Tipo de cursos: INDOC, SIM, BT e LIFUS

Cursos: INDOC, SIM_A, SIM_B, SIM_C, SIM_D, SIM_E, SIM_F, SIM_G, BT_A, BT_B, BT_C, BT_D, BT_E, BT_F, BT_G, LIFUS_A, LIFUS_B, LIFUS_C, LIFUS_D, LIFUS_E, LIFUS_F e LIFUS_G

Slots: Combinação de curso, data de início e data de término