



Lisbon School  
of Economics  
& Management  
Universidade de Lisboa

**Mestrado em**  
**MÉTODOS QUANTITATIVOS PARA A DECISÃO**  
**ECONÓMICA E EMPRESARIAL**

**Trabalho Final de Mestrado**

RELATÓRIO DE ESTÁGIO

**OTIMIZAÇÃO DO PROCESSO DE FORMAÇÃO DOS TRIPULANTES**  
**UM CASO PRÁTICO**

**MARTIM FAIAS CERQUEIRA**

**Orientação:**

LEONOR ALMEIDA LEITE SANTIAGO PINTO

ANA ISABEL FONSECA DUARTE

DOCUMENTO ESPECIALMENTE ELABORADO PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE

JULHO 2025

## RESUMO

Com a realização deste trabalho, pretende-se encontrar uma solução otimizada do escalonamento da formação dos tripulantes de uma empresa de aviação executiva. Assim, o principal objetivo foca-se em encontrar soluções que melhorem o planeamento de formação, cumprindo todas as restrições operacionais, e mantendo os níveis exigidos de tripulantes no ativo para satisfazer as operações diárias da empresa.

Para resolver este problema, foi desenvolvida uma formulação em programação linear inteira (PLI) com o intuito de se encontrar soluções ótimas com recurso ao *software IBM ILOG CPLEX*.

De forma a atingir o principal objetivo do trabalho, foi necessário utilizar duas instâncias próximas da instância inicial, como alternativas, devido à existência de incompatibilidades nos dados iniciais. Deste modo, foi possível encontrar soluções com uma duração do processo de formação de tripulantes dentro dos valores esperados, no entanto, não foram alcançadas as soluções ótimas.

De uma forma geral, as soluções, embora apenas admissíveis, fornecem bons indicadores de otimização do processo de formação dos tripulantes, conseguindo torná-lo mais eficiente e cumprindo os requisitos existentes. Assim, este trabalho pode servir como ponto de partida para futuras melhorias.

**PALAVRAS-CHAVE:** otimização, formação tripulantes, Programação Linear Inteira

## ABSTRACT

The aim of this work is to find an optimized solution for the scheduling of crew training at a business aviation company. Thus, the main objective is to find solutions that improve training planning while complying with all the operational constraints and maintaining the required levels of active crew to satisfy the company's daily operations.

To solve this problem, an Integer Linear Programming formulation (ILP) was devised to find optimal solutions using IBM ILOG CPLEX software.

To achieve the main objective of the work, it was necessary to find two alternative instances, close to the initial instance, due to the existence of incompatibilities in the initial data set. In this way, it was possible to find solutions with a crew training process duration within the expected values, however, the optimal solutions were not reached.

In general, although the solutions were only admissible, they provide good indicators for optimizing the crew training process, making it more efficient and meeting the existing requirements. This work can therefore serve as a starting point for future improvements.

**KEYWORDS:** optimization, crew training, Integer Linear Programming

## GLOSSÁRIO

FC - *Fleet Change*

NH - *New Hire*

PIC - *Pilot in Command*

PLI - *Programação Linear Inteira*

SIC - *Second in Command*

UPG - *Upgrade*

# ÍNDICE

Resumo .....	i
Abstract.....	ii
Glossário.....	iii
Índice de tabelas .....	v
Agradecimentos .....	vii
1. Introdução.....	1
2. Revisão de literatura .....	3
3. Caso de Estudo .....	7
3.1 Apresentação da empresa.....	7
3.2 Formação de tripulantes.....	9
4. Metodologia.....	11
4.1 Definição do objetivo do trabalho.....	11
4.2 Formulação PLI .....	12
5. Apresentação e análise da base de dados.....	17
5.1 Estrutura da base de dados .....	17
5.2 Detalhes da base de dados.....	20
5.2.1 Formações.....	20
5.2.2 Slots .....	23
5.2.3 Tripulantes .....	26
6. Resultados obtidos.....	34
6.1 Comparação de resultados .....	40
7. Conclusões.....	42
Referências Bibliográficas.....	43
Anexos .....	45
Anexo 1 – Heurística .....	45
Anexo 2 – Soluções do escalonamento .....	47

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tipos de formações e sequência de cursos .....	9
Tabela 2 - Tipos de formação "New Hire" .....	21
Tabela 3 – Tipos de formação “Fleet Change” .....	21
Tabela 4 - Tipos de formação "Fleet Change + UPG" .....	21
Tabela 5 - Tipos de Formação "UPG" .....	22
Tabela 6 - Tipos de saídas "Churn" ou "Retirement" .....	22
Tabela 7 - Capacidades estabelecidas para cada curso.....	23
Tabela 8 - Informações sobre os slots .....	25
Tabela 9 - Tripulantes que necessitam do tipo de formação "New Hire" .....	26
Tabela 10 - Tripulantes que necessitam do tipo de formação "Fleet Change" .....	27
Tabela 11 - Tripulantes que necessitam do tipo de formação "Fleet Change + UPG" ..	27
Tabela 12 - Tripulantes que necessitam do tipo de formação "UPG" .....	27
Tabela 13 - Tripulantes que vão abandonar a empresa .....	28
Tabela 14 - Tripulantes que vão abandonar a empresa e a data da respetiva saída.....	28
Tabela 15 - Tripulantes que apresentam data de início mais cedo .....	29
Tabela 16 - Tripulantes com Slots pré-definidos.....	29
Tabela 17 - Quantidades de tripulantes por função e por período no modelo A.....	30
Tabela 18 - Quantidades de tripulantes por função e por período no modelo B.....	30
Tabela 19 - Quantidades de tripulantes por função e por período no modelo C.....	31
Tabela 20 - Quantidades de tripulantes por função e por período no modelo D.....	31
Tabela 21 - Quantidades de tripulantes por função e por período no modelo E.....	32
Tabela 22 - Quantidades de tripulantes por função e por período no modelo F.....	32
Tabela 23 - Quantidades de tripulantes por função e por período no modelo G.....	32
Tabela 24 - Número de períodos na alternativa A.....	35
Tabela 25 - Desvios em relação à quantidade desejável .....	36
Tabela 26 - Número de períodos na alternativa B.....	37
Tabela 27 - Desvios em relação à quantidade desejável .....	38
Tabela 28 - Soluções obtidas .....	40
Tabela 29 - Comparação das diferenças das médias nas duas alternativas .....	41
Tabela 30 – Soluções do modelo PLI para PIC A.....	47
Tabela 31 – Soluções do modelo PLI para SIC A.....	48

Tabela 32 - Soluções do modelo PLI para PIC B.....	48
Tabela 33 - Soluções do modelo PLI para SIC B.....	48
Tabela 34 - Soluções do modelo PLI para PIC C.....	48
Tabela 35 - Soluções do modelo PLI para SIC C.....	49
Tabela 36 - Soluções do modelo PLI para PIC D.....	49
Tabela 37 - Soluções do modelo PLI para SIC D.....	49
Tabela 38 - Soluções do modelo PLI para PIC E.....	49
Tabela 39 - Soluções do modelo PLI para SIC E.....	50
Tabela 40 - Soluções do modelo PLI para PIC F.....	50
Tabela 41 - Soluções do modelo PLI para SIC F.....	50
Tabela 42 - Soluções do modelo PLI para PIC G.....	50
Tabela 43 - Soluções do modelo PLI para SIC G.....	51
Tabela 44 - Soluções do modelo PLI para PIC A.....	51
Tabela 45 - Soluções do modelo PLI para SIC A.....	51
Tabela 46 - Soluções do modelo PLI para PIC B.....	51
Tabela 47 - Soluções do modelo PLI para SIC B.....	52
Tabela 48 - Soluções do modelo PLI para PIC C.....	52
Tabela 49 - Soluções do modelo PLI para SIC C.....	52
Tabela 50 - Soluções do modelo PLI para PIC D.....	52
Tabela 51 - Soluções do modelo PLI para SIC D.....	53
Tabela 52 - Soluções do modelo PLI para PIC E.....	53
Tabela 53 - Soluções do modelo PLI para SIC E.....	53
Tabela 54 - Soluções do modelo PLI para PIC F.....	53
Tabela 55 - Soluções do modelo PLI para SIC F.....	54
Tabela 56 - Soluções do modelo PLI para PIC G.....	54
Tabela 57 - Soluções do modelo PLI para SIC G.....	54

## AGRADECIMENTOS

Venho por este meio manifestar o meu profundo agradecimento aos meus orientadores, Prof. Leonor Santiago Pinto e Ana Duarte pela enorme ajuda e disponibilidade ao longo de todo o trabalho.

Também quero expressar a minha gratidão ao Bruno Marques pelo seu contributo e disponibilidade no desenvolvimento deste trabalho.

Por fim, mas também muito importante, quero agradecer à minha família por todo o apoio e motivação para completar mais uma etapa no meu percurso académico.

# 1. INTRODUÇÃO

A realização deste Relatório de Estágio surge no âmbito do mestrado do ISEG em Métodos Quantitativos para a Decisão Económica e Empresarial como Trabalho Final de Mestrado. O tema do trabalho foca-se na formação de tripulantes de uma empresa de aviação executiva e é considerado um processo bastante desafiante visto que a empresa apresenta uma frota bastante diversificada e atua num mercado muito exigente. Assim, o principal objetivo deste trabalho é o escalonamento da formação dos tripulantes de modo a alocar os pilotos e copilotos que necessitam de formação aos recursos disponíveis respeitando as restrições operacionais. Também é necessário encontrar um equilíbrio entre os tripulantes ativos para responder às necessidades da empresa e os tripulantes a realizar formação visto que a partir do momento em que um tripulante inicia a sua formação considera-se inativo. Deste modo, pretende-se minimizar o tempo médio de formação.

Este trabalho dá seguimento a um projeto realizado na mesma empresa (Mariana Moreira, 2024) e com o mesmo tema, tendo sido implementadas algumas alterações para tornar o processo o mais idêntico à atualidade da empresa. Para a realização do presente trabalho considerou-se uma amostra com 123 tripulantes a necessitar de formação e 7 modelos de aeronaves existentes. A nível de procedimentos, alterou-se e simplificou-se a função objetivo, definiu-se um novo tempo de espera entre dois cursos específicos, integrou-se a formação *Upgrade* nos tipos de formação, adicionaram-se mais cursos por serem destinados a esta nova formação, simplificou-se a apresentação dos dados e alterou-se o método de contagem dos tripulantes disponíveis ao serviço.

A estrutura deste trabalho encontra-se dividida em capítulos. O Capítulo 2 contém um enquadramento teórico do tema de estudo com a devida revisão de literatura. Inicia-se abordando o meio organizacional e os problemas de escalonamento, de seguida centra-se no setor da aviação e, por fim, aborda os métodos de otimização mais relevantes para este problema. No Capítulo 3 é apresentada a empresa em questão, identificando o seu modelo de negócio e a constituição da sua frota. Também se explica o processo de formação de tripulantes e as suas características. No Capítulo 4 é detalhado o objetivo deste trabalho e apresentada a formulação PLI, visto ser a metodologia desenvolvida para dar resposta

à questão proposta. O Capítulo 5 inicia-se com a explicação dos procedimentos efetuados para estruturar a base de dados e de seguida são apresentadas todas as informações que constam na base de dados e que são necessárias para a resolução do problema, nomeadamente as formações, os *slots* e os tripulantes existentes. No Capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos no processo de escalonamento das formações dos tripulantes de acordo com a metodologia utilizada. Também são comparadas as diferentes soluções tendo em conta a qualidade das soluções obtidas, o tempo de processamento e os impactos nas quantidades necessárias de tripulantes no ativo. Por fim, no Capítulo 7 são analisadas as conclusões do trabalho, as limitações encontradas na implementação dos métodos e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Num contexto empresarial em constante transformação tecnológica, procurar soluções que diferenciem as empresas é um passo cada vez mais determinante para atingir o sucesso. A intensa concorrência global impulsiona as empresas a procurarem soluções que sejam mais eficientes para gerir os seus processos internos. Como refere Reijers (2021), o *Business Process Management* (BPM), inicialmente com um foco operacional, evoluiu no sentido em que passou a ser considerado como uma opção estratégica com a capacidade de melhorar o desempenho e inovação organizacional. Assim, esta evolução está ligada à crescente digitalização e ao papel central que os dados assumem no auxílio para a tomada de decisão.

Desta forma, considera-se a otimização de processos como um dos principais objetivos das empresas. O recurso a métodos estatísticos permite compreender melhor processos complexos e alocar os recursos disponíveis de forma mais eficiente (Del Castillo, 2007). Assim, este processo torna-se essencial no contexto empresarial onde a eficiência operacional resulta em vantagem competitiva. Entre as diversas estratégias existentes para rentabilizar as empresas, a otimização de processos destaca-se pelos benefícios que pode oferecer, como eficiência na produção, um melhor controlo de custos e uma gestão mais flexível e mais eficaz dos recursos utilizados.

Com a evolução da tecnologia e com o aparecimento da Indústria 4.0 através da automação inteligente e digitalização, é de esperar que a introdução de tecnologias digitais seja algo certo no dia-a-dia de uma empresa. Como exemplo disso, através da Internet das Coisas (IoT) e da análise de *Big Data*, observou-se que impactaram as decisões e planeamentos que as empresas adotaram na sua forma de atuar. Estes avanços tecnológicos têm vindo a transformar certos processos, sobretudo os mais complexos, como é o caso do escalonamento de tarefas, onde a automatização é capaz de produzir soluções que auxiliam a tomada de decisão, tornando estes processos mais eficazes (Lasi *et al.*, 2014).

O escalonamento constitui uma das atividades críticas para a eficiência operacional. Estas atividades são utilizadas em vários setores empresariais como escalonamento dos turnos dos trabalhadores na área do retalho, gestão de salas de operações hospitalares ou nas

férias dos trabalhadores. Estas atividades necessitam de ser bem planeadas pois influenciam a produtividade, a satisfação dos trabalhadores e clientes e os custos. Como exemplo disso, Cardoen, Demeulemeester & Belien (2010) apresentaram uma visão direcionada ao setor da saúde sobre o agendamento dos blocos operatórios. Designaram como sendo uma tarefa bastante complicada derivado da complexidade de lidar com recursos limitados, a incerteza quanto à duração de cada procedimento cirúrgico e a procura de um equilíbrio entre a qualidade do serviço prestado e a sua eficiência, resultando num planeamento bastante desafiante. Por outro lado, o escalonamento nem sempre corre como esperado e resulta em consequências menos positivas. Acontece em vários setores, mas ainda na área da saúde, segundo Moz & Pato (2007), se o escalonamento dos turnos de um hospital não for bem-sucedido pode resultar numa carga laboral excessiva resultando em impactos negativos na motivação e bem-estar dos profissionais de saúde. Relativamente a empresas, fábricas e escolas, De Werra (1985) adotou o conceito de *Timetabling*, como sendo um método essencial na alocação de tarefas. Através da modelação matemática é possível verificar as várias restrições que têm de ser adotadas, desde as competências dos trabalhadores, as disponibilidades dos recursos e as limitações das cargas horárias. Num outro contexto, no setor do retalho, Kabak *et al.* (2008) introduziram um modelo de otimização que integra duas etapas para escalonar os turnos de forma eficiente. A primeira etapa serve para definir quantos funcionários são precisos em cada período do dia de acordo com as tendências de afluência dos clientes e a segunda procura definir os turnos de acordo com a primeira etapa. Com a realização destas etapas, os autores demonstram melhorias na flexibilidade e na redução de custos operacionais. Alfares (2004) também estudou algumas abordagens de escalonamento, agrupando-as por tipo de categoria em que se inseriam, como o tipo de setor em questão, os objetivos de otimização e os métodos utilizados. Assim, pode-se verificar que o escalonamento é um tema bastante desafiador, visto que é necessário recorrer a um equilíbrio entre as competências específicas de cada pessoa com as necessidades requeridas por cada tipo de serviço. Deste modo, nestes ambientes empresariais a utilização de processos de otimização com recurso a meios digitais apresentam soluções mais eficazes (Valls, Perez & Quintanilla, 2009).

Após expor exemplos do processo de escalonamento em diferentes contextos, é importante destacar o setor da aviação, visto que é o tema do presente estágio, onde o

escalonamento de tripulantes é um processo bastante importante e dos mais desafiantes a nível de gestão operacional. Neste setor, o desafio do escalonamento de tripulantes exige um compromisso entre os requisitos operacionais e as preferências de cada tripulante. A implementação de tecnologias como *Big Data* permite uma abordagem mais proativa, proporcionando uma melhor deteção de padrões e a antecipação de necessidades futuras (Badea, Zamfiroiu & Boncea, 2018). Segundo Barnhart, Belobaba & Odoni (2003), a aplicação do escalonamento na aviação resolve-se com recurso a técnicas de investigação operacional. Estes autores consideram-no como um dos desafios mais exigentes devido à existência de inúmeras combinações possíveis e múltiplas restrições. Ainda destacam que a utilização deste processo de escalonamento em voos, frotas e em tripulantes apresenta melhorias notáveis na eficiência da empresa. Uma outra visão através de Kohl & Karisch (2004) classifica este problema de escalonamento de tripulantes segundo o tipo de restrições e os principais objetivos. Referem também que os principais métodos utilizados podem ser os métodos exatos como a programação linear inteira ou métodos aproximados como as heurísticas e metaheurísticas. Estes autores mencionam que existem algumas características que se devem ter em conta para uma boa eficiência operacional e para o bem-estar de todos os tripulantes. Destacam-se a atenção às preferências de cada tripulante, a distribuição do trabalho de forma mais equilibrada e a flexibilidade para intervir em situações inesperadas.

As abordagens mais utilizadas e que foram referidas anteriormente são as metaheurísticas e a programação linear inteira. As metaheurísticas, como os algoritmos genéticos, o *simulated annealing*, o *tabu search* e o GRASP são aplicadas quando o problema é demasiado complexo e a obtenção de uma solução ótima pelos métodos exatos não é viável em tempo útil. Conforme exposto por Glover & Kochenberger (2006), estas metodologias analisam de forma estratégica o espaço de soluções, combinando mecanismos de intensificação e diversificação, com o objetivo de identificar soluções admissíveis de elevada qualidade num intervalo temporal reduzido. A outra abordagem consiste em utilizar algoritmos exatos da programação linear inteira. Segundo Hojati & Patil (2011), a adoção da programação linear inteira num problema de escalonamento em que os trabalhadores apresentam competências diferentes, resulta em resultados eficazes para problemas com inúmeras restrições. Também é de salientar que, através do estudo de Nemhauser & Wolsey (1999) onde são explicadas as principais bases para uma boa

utilização de técnicas de otimização, é necessário realizar uma formulação bem estruturada em problemas complexos. Por outro lado, quando se trata de problemas com bastantes dados é necessário encontrar formas de reduzir as dimensões do problema e melhorar a eficiência das soluções. Assim, Brearley, Mitra & Williams (1975) ao analisarem o pré-processamento de modelos matemáticos antes de serem submetidos a *solvers* conseguiram identificar formas eficientes de realizar esse pré-processamento. Essas formas baseavam-se em remover variáveis e restrições redundantes e, reduzir os intervalos de variáveis, ou seja, repararam que existiam restrições e alguns intervalos de variáveis que eram desnecessários visto que existiam outros que salvaguardavam as suas condições. Para além destes métodos, também é importante referir que tem existido uma crescente evolução dos *softwares* que atuam neste domínio. As ferramentas como o CPLEX, têm vindo a evoluir bastante e a ser adotadas na resolução de problemas nas áreas de transporte e logística, por exemplo. Apresentam a particularidade de poderem lidar com instâncias com grandes volumes de variáveis e restrições o que facilita a sua aplicação no meio empresarial (Bixby, 2002).

### 3. CASO DE ESTUDO

#### 3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA

Como referido anteriormente, o estágio decorreu numa empresa de aviação executiva. A empresa em causa dispõe de um vasto prestígio no mundo da aviação, apresentando uma frota de jatos privados diversificada e de grande dimensão. Desta forma, possui a capacidade e as condições para corresponder às exigências dos seus clientes, sendo-lhe reconhecido um forte compromisso entre a segurança e a qualidade do serviço prestado. Por motivos de confidencialidade, a identificação da empresa não será revelada.

De acordo com as informações disponibilizadas no site oficial da empresa, o negócio consiste na oferta de serviços que constituem alternativas à aquisição integral de uma aeronave. Assim, os clientes têm ao seu dispor três opções. A primeira opção proporciona a aquisição de uma fração de uma aeronave específica com uma duração mínima estipulada. Neste caso, o cliente faz um investimento inicial, paga uma mensalidade e ficam igualmente a seu cargo os custos inerentes de cada voo (custos de tripulação, combustível, etc). Na segunda opção, o cliente não tem qualquer tipo de responsabilidade sobre o ativo e tem uma duração mínima estipulada. Esta opção diferencia-se da anterior por não ter o investimento inicial, mas em contrapartida, as mensalidades são mais elevadas. A terceira e última opção é um programa de compra de um determinado número de horas de voo e destina-se a clientes que apenas querem ter uma experiência de curto prazo. Neste caso, há um prazo máximo para uso do programa e tem os custos todos associados no momento da subscrição. Ao adquirir uma destas opções, os clientes usufruem de salas de embarque privadas e calmas nos aeroportos mais movimentados e podem agendar um voo com pouco tempo de antecedência devido à existência de vários centros de serviço de manutenção em todo o mundo que permitem que as aeronaves estejam prontas quando e onde forem necessárias.

A frota é composta por sete modelos distintos de jatos, agrupando-se em três categorias, os mais ligeiros, os intermédios, e por fim, os de cabine grande. A primeira categoria inclui os modelos A e B, sendo os mais simples, de menor dimensão e de menor alcance. A segunda categoria contém os modelos C, D, E e F, sendo jatos um pouco mais

complexos. A última categoria apenas inclui o modelo G, que é o mais complexo, sendo considerado o modelo de longo curso.

Em relação à constituição da tripulação de um jato, esta é composta por um piloto principal (PIC) e um copiloto (SIC). O piloto tem autoridade máxima sendo responsável pelo jato e pela rota, aprovando os planos de voo. O copiloto auxilia o piloto em todas as fases desde a decolagem até à aterragem e na comunicação com a torre de controlo. Cada tripulante tem uma posição atribuída, isto é, opera numa função (PIC ou SIC) e apenas num modelo de jato (A, B, C, D, E, F e G).

## 3.2 FORMAÇÃO DE TRIPULANTES

A formação de tripulantes é um dos aspetos essenciais para manter a elevada qualidade dos serviços prestados numa empresa de aviação. O presente estágio procura contribuir para agilizar o processo de escalonamento da formação dos tripulantes. No escalonamento devem ser observadas várias condicionantes, nomeadamente a garantia de que a empresa tem sempre disponíveis tripulantes para atender aos seus compromissos.

Os tripulantes podem necessitar dos seguintes tipos de formação:

- *New Hire* (NH) – quando se trata de novas contratações;
- *Fleet Change* (FC) – quando há troca de modelo, mas a função é mantida;
- *Upgrade* (UPG) – quando um tripulante passa de SIC para PIC dentro do mesmo modelo;
- *Fleet Change + UPG* – quando um tripulante muda de modelo e passa PIC.

Um novo tripulante (*New Hire*), começa obrigatoriamente como SIC num modelo dentro das duas primeiras categorias, ou seja, nos jatos mais ligeiros ou intermédios.

Cada tipo de formação inclui uma sequência de vários cursos, como consta na Tabela 1.

**TABELA 1 - TIPOS DE FORMAÇÕES E SEQUÊNCIA DE CURSOS**

Tipo de Formação	Sequência dos cursos a serem realizados					
New Hire (NH)	INDOC	SIM	BT	LIFUS	LIFUS	LIFUS_LC
Fleet Change (FC)	SIM	BT	LIFUS	LIFUS	LIFUS_LC	
Upgrade (UPG)	UPG_Ground	SIM_REC	LIFUS	LIFUS	LIFUS_LC	
Fleet Change + UPG	UPG_Ground	SIM	BT	LIFUS	LIFUS	LIFUS_LC

Em cada formação, os cursos devem ser realizados na ordem prevista e, para além disso, precisam de respeitar um tempo mínimo de espera entre cursos da sequência.

As formações apresentadas na Tabela 1 fazem referência ao procedimento geral. No entanto, consoante o modelo de aeronave para o qual a formação se destina, as formações e por sua vez os cursos apresentam especialização para cada modelo de aeronave. Cada curso apresenta várias disponibilidades horárias (*slots*), que seguem uma ocorrência constante, com uma duração estabelecida e apresentam capacidades mínima e máxima definidas. Os *slots* são frequentados pelos tripulantes, de forma a afetá-los aos cursos correspondentes.

Como se mencionou, a empresa opera continuamente no sentido de o escalonamento da formação ser feito de forma a garantir um número suficiente de tripulantes ao serviço. Assim, a empresa realiza anualmente uma recolha de dados para prever a necessidade de tripulantes no ano seguinte. Esta previsão tem em linha de conta a venda e compra de aeronaves e é detalhada por posição, isto é, por função e por frota.

Um tripulante é considerado indisponível desde que inicia a sua formação até começar o seu primeiro bloco do curso LIFUS, ficando ativo enquanto está a realizar os restantes blocos deste curso. O número de tripulantes ao serviço que deve ser observado no início de cada período é determinado pela empresa. Em cada período a tripulação mínima exigida é calculada, isto é, o número de tripulantes que devem estar disponíveis, como uma percentagem da tripulação desejável ao serviço. Este valor correspondente à tripulação desejável ao serviço também é determinado pela empresa.

## 4. METODOLOGIA

O principal objetivo deste trabalho consiste no escalonamento da formação dos tripulantes, respeitando um conjunto de restrições. Este processo é bastante importante para uma gestão adequada dos recursos da empresa.

Neste capítulo encontra-se a metodologia usada para determinar, de forma automática, soluções para o problema do escalonamento da formação de tripulantes. Numa primeira secção define-se o problema e, numa segunda, apresenta-se a formulação em programação linear inteira, com a respetiva notação.

### 4.1 DEFINIÇÃO DO OBJETIVO DO TRABALHO

À priori são conhecidos os tripulantes que necessitam de realizar formação e qual o tipo de formação que cada um deve efetuar. Para cada tripulante sabe-se também a posição que ocupa antes da formação, isto é, em que tipo de aeronave opera e a sua função, e qual a posição que ocupará após a formação. Cada tipo de formação consiste numa sequência de cursos específicos, tendo de respeitar tempos de espera entre cursos. Para cada curso existem várias disponibilidades horárias, ou seja, vários *slots*. Um *slot* tem associado um curso específico, uma data de início, uma data de fim, e ainda o número mínimo e máximo de tripulantes que o podem frequentar.

O escalonamento é feito para um horizonte temporal pré-estabelecido que consites num certo número de períodos. Em cada período sabe-se o número mínimo de tripulantes que devem estar ao serviço, isto é, que não podem estar no processo de formação.

O problema de escalonamento da formação de tripulantes consiste na atribuição de *slots*, cumprindo a sequência de cursos afeta a cada tripulante, de forma a minimizar o tempo médio de formação durante o horizonte temporal. Os *slots* atribuídos devem ser frequentados pelo número de tripulantes exigido e, em cada período, devem existir tripulantes disponíveis para assegurar a operação.

## 4.2 FORMULAÇÃO PLI

Na presente secção apresenta-se a formulação do problema de escalonamento da formação dos tripulantes em programação linear inteira.

Para tal definiram-se:

### Conjuntos:

**$T$** : Conjunto de tripulantes que precisam de realizar formação.

**$J$** : Conjunto de tipos de formação a realizar.

**$T^j \subseteq T$** : Conjunto de tripulantes que necessitam do tipo de formação  $j, j \in J$ .

**$K$** : Conjunto de posições, isto é, possibilidades da função de um tripulante (PIC ou SIC) e respetivo jato de operação.

**$T_k^h$** : Conjunto de tripulantes que transitam da posição  $h$  para a posição  $k$ , com  $h, k \in K$ .

**$T^e \subseteq T$** : Conjunto de tripulantes com restrição na data de início de formação.

**$C$** : Conjunto de cursos existentes.

**$M$** : Conjunto de períodos.

**$L$** : Conjunto de *slots*.

**$L_u$** : Conjunto de *slots* do curso  $u, u \in C$ .

### Sequências:

**$O_j$** : Sequência de cursos que compõem o tipo de formação  $j, j \in J$ .

**$O_j = (O_{j(1)}; O_{j(2)}; \dots; O_{j(|O_j|)})$** , designando  $|O_j|$  a dimensão do vetor  $O_j, j \in J$ .

## Parâmetros

$\mathbf{n} = |\mathbf{T}|$ : Número de tripulantes que necessitam de formação.

$\mathbf{I}_i$ : Data de início do *slot*  $i$ ,  $i \in L$ .

$\mathbf{F}_i$ : Data de conclusão do *slot*  $i$ ,  $i \in L$ .

$\mathbf{Q}_i^{\min}$ : Número mínimo de tripulantes para que o *slot*  $i$  funcione,  $i \in L$ .

$\mathbf{Q}_i^{\max}$ : Número máximo de tripulantes que podem frequentar o *slot*  $i$ ,  $i \in L$ .

$\mathbf{W}_{uv}^t$ : Tempo mínimo de espera do tripulante  $t$  entre os cursos  $u$  e  $v$ , cursos consecutivos na sua sequência de formação,  $t \in T$ ,  $u$  e  $v$  em  $O_j$ .

$\mathbf{N}^k$ : Número total de tripulantes da empresa na posição  $k$  no início do primeiro período do horizonte de planejamento (inclui todos os tripulantes quer necessitem ou não de formação),  $k \in K$ .

$\mathbf{R}_m^k$ : Número mínimo de tripulantes na posição  $k$  ao serviço no início do período  $m$ ,  $k \in K$ ,  $m \in M$ .

$\rho_m^k$ : Número de tripulantes na posição  $k$  que abandonam a empresa no início do período  $m$ ,  $k \in K$ ,  $m \in M$ .

$\mathbf{D}_t$ : Data mais cedo de início da formação do tripulante  $t$ , com  $t \in T^e$ .

$\mathbf{H}_{max}$ : Tempo máximo, em períodos, que um tripulante pode estar em formação.

$\omega_u^j$ : Número de vezes que o curso  $u$  é feito na sequência  $O_j$ ,  $u \in C$ ,  $O_j \in J$ .

## Variáveis de Decisão

- Variáveis binárias:

$$x_{ti} = \begin{cases} 1, & \text{se o tripulante } t \text{ frequenta o slot } i \text{ do curso } (u) \text{ da formação } (j). \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$t \in T^j,$   
 $i \in L_u,$   
 $u \in C,$   
 $j \in J$

$$y_i = \begin{cases} 1, & \text{se o slot } i \text{ está ativo.} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

$, i \in L$

- Variáveis inteiras:

$S_t$ : Início da formação do tripulante  $t$ ,  $t \in T$ .

$E_t$ : Fim da formação do tripulante  $t$ ,  $t \in T$ .

## Função Objetivo

$$\text{Min } z = \frac{1}{|T|} \sum_{t \in T} (E_t - S_t) \quad (0)$$

## Restrições:

$$S_t = \sum_{i \in O_j(1)} x_{ti} \cdot I_i \quad t \in T^j, j \in J \quad (1)$$

$$E_t = \sum_{i \in O_j(|S_j|)} x_{ti} \cdot F_i \quad t \in T^j, j \in J \quad (2)$$

$$E_t \geq S_t \quad t \in T \quad (3)$$

$$E_t - S_t \leq H_{max} \quad t \in T \quad (4)$$

$$x_{ti} \leq y_i \quad t \in T, i \in L \quad (5)$$

$$\sum_{t \in T^j \cap T^e} \sum_{\substack{i \in L_u, u \in O_j \\ I_i < D_t}} x_{ti} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i \in L_u, u \in O_j} x_{ti} = |O_j| \quad t \in T^j, j \in J \quad (7)$$

$$\sum_{t \in T} x_{ti} \geq y_i \cdot Q_i^{min} \quad i \in L \quad (8)$$

$$\sum_{t \in T} x_{ti} \leq y_i \cdot Q_i^{max} \quad i \in L \quad (9)$$

$$\sum_{i \in L_u} x_{ti} = \omega_u^j \quad t \in T^j, j \in J, u \in O_j \quad (10)$$

$$\sum_{i \in L_u} x_{ti} \cdot F_i + W_{uv}^t \leq \sum_{i \in L_v} x_{ti} \cdot I_i \quad t \in T^j, j \in J, u, v \text{ consecutivos em } O_j \quad (11)$$

$$N_k - \rho_m^k - \sum_{\substack{t \in T^j: i \in O_{j(1)}: \\ j \in T_h^k}} \sum_{I_i \leq m} x_{ti} + \sum_{\substack{t \in T^j: i \in O_{j(|S_j-3|)}: \\ j \in T_h^k}} \sum_{I_i \leq m} x_{ti} \geq R_m^k \quad m \in M, k \in K \quad (12)$$

$$x_{ti} \in \{0; 1\} \quad t \in T, i \in L \quad (13)$$

$$y_i \in \{0; 1\} \quad i \in L \quad (14)$$

$$S_t, E_t \geq 0 \qquad t \in T \qquad (15)$$

A função objetivo (0) traduz a minimização do tempo médio de formação dos tripulantes. O tempo de formação de um tripulante decorre desde que inicia o primeiro curso da sua sequência até que termina o último curso.

Os conjuntos de restrições (1) e (2) definem as datas exatas de início do primeiro curso e de fim do último curso para cada tripulante, respetivamente. Através da restrição (3) define-se o critério de não negatividade, em que obriga a data de fim da formação de um tripulante a ser superior à sua data de início. O conjunto (4) estabelece uma duração máxima para a formação de um tripulante. Com (5) garante-se que apenas são atribuídos *slots* ativos. Através da restrição (6) todos os *slots* que se iniciam antes da data que os tripulantes podem iniciar a sua formação são excluídos das opções para os respetivos tripulantes. As restrições (7) obrigam os tripulantes a realizarem a quantidade de cursos estipulada para a sua formação. Os conjuntos de restrições (8) e (9) impõem para cada *slot* as capacidades mínimas e máximas exigidas, respetivamente. Com (10) exige-se que os cursos que integram o tipo de formação necessário sejam realizados o número de vezes pretendido. As restrições (11) estabelecem os tempos mínimos de espera entre cursos consecutivos de uma formação. A quantidade mínima de tripulantes disponíveis para a operação é assegurada pelas condições (12). Por fim, as restrições (13), (14) e (15) estabelecem os domínios das variáveis.

Note-se que, as restrições (3) e (7) foram implementadas porque o *software* usado para desenvolver o trabalho (*IBM ILOG CPLEX*) torna-se mais rápido e eficiente com a sua utilização. No entanto, podem ser retiradas pois são garantidas por outras restrições.

## 5. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DA BASE DE DADOS

De forma a desenvolver o processo de escalonamento da formação dos tripulantes é necessário ter as informações mais relevantes dos tripulantes existentes e da empresa em questão. Este processo requer uma estruturação prévia dos dados necessários e uma boa organização dos mesmos.

Neste capítulo é abordado todo o processo referente à estruturação dos dados. Na primeira secção é apresentado todo o processo de preparação dos dados, desde a receção dos mesmos até à estrutura final. Na segunda secção é apresentada de forma detalhada a estrutura base para implementação do método adotado.

### 5.1 ESTRUTURA DA BASE DE DADOS

Os dados foram fornecidos num ficheiro de EXCEL com três folhas: “Crew Movements”, “Slots” e “FTE”. Da folha “Crew Movements” constavam todos os tripulantes que necessitavam de formação e as suas características. A folha estava organizada da seguinte forma: data a partir da qual o tripulante está disponível para iniciar a sua formação (em alguns casos não apresentam essa limitação, podendo começar em qualquer momento), aeronave de operação antes de iniciar a formação e após conclusão, função (PIC ou SIC) antes de iniciar a formação e após conclusão. Para além dos tripulantes que requerem formação, também continha os tripulantes que se iriam reformar ou sair da empresa, *Retirement* e *Churn* respetivamente. Na segunda folha, “Slots”, estavam identificados os slots de simulador existentes para cada modelo e as suas disponibilidades horárias, isto é, as datas de começo e fim. Também continha informação sobre algumas alocações de tripulantes a slots específicos. A terceira folha “FTE”, referia-se à quantidade necessária de tripulantes para a empresa manter a sua operação, ou seja, contém as quantidades mínimas exigidas para cada mês, valores estes calculados mensalmente, por aeronave e por função (PIC ou SIC). Também foram fornecidos valores de tolerância que são utilizados para definir a quantidade mínima de tripulantes ao serviço.

Assim, foram estes os dados que serviram de base para criar uma base de dados organizada e com todas as informações necessárias para se utilizar no *software IBM ILOG CPLEX*.

Depois da análise dos dados fornecidos, criou-se um ficheiro de Excel com as folhas “Crew”, “Activities”, “Precedências”, “Definidas” e “Needs”. A folha chamada “Crew” tem a listagem de todos os tripulantes fornecidos e com todas as suas características: data em que está disponível para começar a formação (caso tenha essa limitação), tipo de formação, função inicial, modelo inicial, função final, modelo final, codificação do tipo de formação, quantidade de cursos que vai frequentar, “WL” que corresponde ao tempo de espera pela emissão da licença e, por fim, o primeiro e o último curso que vai frequentar.

Na folha “Activities” estão listados os *slots* disponíveis, com o respetivo ID, o nome do respetivo curso, a data de começo e de fim e as suas capacidades mínima e máxima. Foram adicionados vários *slots* para cada curso no horizonte temporal de forma que fossem capazes de responder às necessidades dos tripulantes. Em relação aos cursos de simulador foi necessário adicionar *slots* em alguns modelos devido à existência de mais tripulantes que vagas disponíveis. No simulador do modelo A acrescentaram-se seis *slots* por mês em 2026, no simulador do modelo B acrescentaram-se mais seis *slots* e no simulador do modelo D acrescentaram-se mais nove *slots*. Também se adicionou uma correspondência aos tripulantes que vão sair da empresa (*OUT*) com a respetiva data de saída.

A folha “Precedências” serve como planificação dos cursos de cada formação. Assim, de acordo com o tipo de formação é exibido por linha o curso a frequentar e o que foi realizada anteriormente. Desta forma, é possível saber o número de vezes que cada curso deve ser realizado e o tempo de espera pré-definido entre cursos consecutivos. Também são indicados os tripulantes que saem da empresa com a devida correspondência (*OUT*).

A folha “Definidas” mostra os tripulantes que têm de frequentar *slots* específicos. Também se apresenta os tripulantes que vão abandonar a empresa com a respetiva atividade de saída. Assim, é representada a ligação entre o nome do tripulante e o ID do respetivo *slot*.

Por fim, a folha “Needs” inclui os números atuais e desejáveis de tripulantes em cada período. Contém a data em que se precisa de verificar o número estipulado de tripulantes no ativo, o modelo correspondente, o número inicial de SIC, o número desejável de SIC, o número inicial de PIC, o número desejável de PIC e a tolerância a ser aplicada. Este valor de tolerância incide sobre as quantidades desejáveis de forma a representar a quantidade mínima exigida de tripulantes ao serviço.

## 5.2 DETALHES DA BASE DE DADOS

Esta secção inclui três subsecções. A primeira foca-se na apresentação de todas as informações sobre os tipos de formação e as suas características. Na segunda são apresentadas todas as informações sobre os *slots* disponíveis de cada curso e as suas características. Por fim, na terceira são apresentados todos os tripulantes existentes para a realização do trabalho e as suas características.

### 5.2.1 FORMAÇÕES

A empresa está a deixar de operar com o modelo E e, deste modo, as formações com destino ao modelo E não existem. No entanto, como existiam tripulantes que estavam associados a este modelo, foram consideradas as formações com início no modelo E e destino em outros modelos. Desta forma, foram utilizadas um total de 14 formações e 29 cursos.

As formações são apresentadas identificando o tipo de formação (NH, FC, FC+UPG e UPG) e o tipo de modelo para o qual a formação é direccionada (A, B, C, D, F e G). Independentemente de o tripulante ser da função PIC ou SIC, os cursos que irá frequentar serão os mesmos, daí não haver distinção na codificação da formação em relação à função que operava. Assim, na folha “Crew” cada tripulante apresenta a formação que necessita da seguinte forma: {tipo de formação} \_ {tipo de modelo final}.

De seguida, são apresentados os vários tipos de formação que constam na folha “Precedências” de forma detalhada, com os respetivos cursos necessários para cada formação e o tempo de espera obrigatório entre cursos. Para a elaboração deste trabalho e como uma das principais melhorias relativamente ao trabalho anterior, a transição do curso BT para o curso LIFUS é denominada como “*Waiting for License*” (WL) e é variável pois depende do tipo de nacionalidade do tripulante e se o tripulante tem uma licença temporária ou não. Contudo, considerou-se para o WL um tempo de espera de 30 dias por não ter acesso às informações necessárias para o determinar individualmente. Os restantes tempos de espera são fixos.

Em cada linha das seguintes tabelas estão as formações utilizadas, os respectivos cursos que integram cada formação e os tempos de espera (em dias) entre cursos. Na Tabela 2 estão representados os tipos de formação “*New Hire*” existentes na empresa e a sequência de cursos que deve ser realizada. Os seguintes cursos visam a especialização no tipo de modelo a que se destina a formação.

**TABELA 2 - TIPOS DE FORMAÇÃO "NEW HIRE"**

Formação	1º Curso		2º Curso		3º Curso		4º Curso		5º Curso		6º Curso	
NH_A	INDOC	7	SIM_A	7	BT_A	30	LIFUS_A	7	LIFUS_A	7	LIFUS_A_LC	
NH_B	INDOC	7	SIM_B	7	BT_B	30	LIFUS_B	7	LIFUS_B	7	LIFUS_B_LC	
NH_C	INDOC	7	SIM_C	7	BT_C	30	LIFUS_C	7	LIFUS_C	7	LIFUS_C_LC	
NH_D	INDOC	7	SIM_D	7	BT_D	30	LIFUS_D	7	LIFUS_D	7	LIFUS_D_LC	
NH_F	INDOC	7	SIM_F	7	BT_F	30	LIFUS_F	7	LIFUS_F	7	LIFUS_F_LC	

Na Tabela 3, encontram-se representados os tipos de formações “*Fleet Change*”. Neste caso as formações foram simplificadas a nível de codificação porque independentemente do tipo de modelo inicial e do tipo de função inicial que o tripulante operava, o tripulante terá de frequentar os cursos que se destinam ao modelo final estipulado. Assim sendo, em vez de existirem diversas formações do tipo “*Fleet Change*” para o mesmo modelo final, apenas se criou uma formação para cada modelo final.

**TABELA 3 – TIPOS DE FORMAÇÃO “FLEET CHANGE”**

Formação	1º Curso		2º Curso		3º Curso		4º Curso		5º Curso	
FC_A	SIM_A	7	BT_A	30	LIFUS_A	7	LIFUS_A	7	LIFUS_A_LC	
FC_C	SIM_C	7	BT_C	30	LIFUS_C	7	LIFUS_C	7	LIFUS_C_LC	
FC_D	SIM_D	7	BT_D	30	LIFUS_D	7	LIFUS_D	7	LIFUS_D_LC	
FC_F	SIM_F	7	BT_F	30	LIFUS_F	7	LIFUS_F	7	LIFUS_F_LC	
FC_G	SIM_G	7	BT_G	30	LIFUS_G	7	LIFUS_G	7	LIFUS_G_LC	

Na Tabela 4, são apresentados os tipos de formação “FC+UPG” e, também nestes casos, apenas se considerou o modelo final para o qual a formação se destina. O curso UPG\_Ground é utilizado para formações que necessitam de realizar um upgrade de função.

**TABELA 4 - TIPOS DE FORMAÇÃO "FLEET CHANGE + UPG"**

Formação	1º Curso		2º Curso		3º Curso		4º Curso		5º Curso		6º Curso	
FC+UPG_A	UPG_Ground_A	7	SIM_A	7	BT_A	30	LIFUS_A	7	LIFUS_A	7	LIFUS_A_LC	
FC+UPG_C	UPG_Ground_C	7	SIM_C	7	BT_C	30	LIFUS_C	7	LIFUS_C	7	LIFUS_C_LC	

Por fim, na Tabela 5 está representada a sequência de cursos a ser realizada para se fazer um upgrade de função. O curso SIM\_REC é somente utilizado para este tipo de formação, sendo um simulador específico para a passagem de SIC para PIC. Independentemente do tipo de modelo que o tripulante operava, se o modelo final for o mesmo, todos necessitam da mesma formação.

**TABELA 5 - TIPOS DE FORMAÇÃO "UPG"**

Formação	1º Curso		2º Curso		3º Curso		4º Curso		5º Curso	
UPG_A	UPG_Ground_A	7	SIM_REC_A	7	LIFUS_A	30	LIFUS_A	7	LIFUS_A_LC	
UPG_C	UPG_Ground_C	7	SIM_REC_C	7	LIFUS_C	30	LIFUS_C	7	LIFUS_C_LC	

Por outro lado, existem tripulantes que vão sair da empresa numa data pré-definida, por motivos de reforma, por mudança de emprego, ou outros. Nestes casos, os tripulantes são identificados pelo tipo de função (PIC ou SIC), o modelo que operavam (A, B, C, D, E, F e G) e o tipo de saída (*Churn* ou *Retirement*). Assim, são codificados da seguinte forma: {tipo de função} \_ {tipo de modelo inicial} \_ {tipo de saída}, tal como ilustra a Tabela 6.

**TABELA 6 - TIPOS DE SAÍDAS "CHURN" OU "RETIREMENT"**

Tipo Saída	Destino
SIC_C_CHURN	OUT
PIC_A_RETIREMENT	OUT
PIC_B_RETIREMENT	OUT
SIC_B_RETIREMENT	OUT
PIC_E_RETIREMENT	OUT
PIC_G_RETIREMENT	OUT
SIC_G_RETIREMENT	OUT

### 5.2.2 SLOTS

Relativamente aos cursos a serem frequentados, tal como consta na folha “Activities”, existem várias disponibilidades horárias, às quais se chama *slots*. Cada curso dispõe de diversos *slots* com o objetivo de responder ao elevado número de tripulantes que necessitam de formação. Cada *slot* tem associado um curso específico com uma data de início e uma data de fim. Também apresentam diferentes capacidades mínimas e máximas de tripulantes que o podem frequentar dependendo do tipo de curso, tal como ilustra a Tabela 7.

TABELA 7 - CAPACIDADES ESTABELECIDAS PARA CADA CURSO

Tipo de Curso	Capacidade Mínima	Capacidade Máxima
INDOC	4	30
SIM	2	2
BT	2	6
LIFUS_A	0	6
LIFUS_B	0	7
LIFUS_C	0	8
LIFUS_D	0	5
LIFUS_F	0	4
LIFUS_G	0	7
UPG_Ground	2	2
SIM_REC	2	2

Os cursos encontram-se representados na Tabela 7 com o nome de forma geral sem estar pormenorizado o modelo a que se destina por apresentarem capacidades iguais em todos os modelos, com exceção do curso LIFUS, que está representado individualmente devido às capacidades máximas dependerem do modelo. Assim, quando um curso se destina a um modelo específico, apresenta na sua codificação o nome do modelo para o qual a formação se destina exceto o curso INDOC. Este curso não apresenta especialização porque é um curso introdutório que aborda temas teóricos.

Por outro lado, existem cursos que são comuns a diferentes tipos de formação e, neste caso, podem ser frequentados no mesmo *slot* por tripulantes que estejam a realizar formações diferentes, mas que tenham o mesmo modelo como destino de formação. Por exemplo, um *New Hire* e um *Fleet Change* podem frequentar o mesmo *slot* se corresponder a um curso comum que tenham de frequentar.

O curso INDOC apresenta capacidades mínimas e máximas definidas para cada *slot*. Cada *slot* pode ser integrado por tripulantes que se destinam a diferentes modelos.

Os cursos SIM têm de ser frequentados obrigatoriamente por dois tripulantes e são específicos para cada modelo. Estes cursos apresentam disponibilidades específicas pois dependem de recursos externos.

Os cursos BT apresentam capacidades mínimas e máximas a serem respeitadas, podendo dentro destas capacidades variar a quantidade de tripulantes em cada *slot*. São cursos específicos para cada modelo.

As capacidades máximas do curso LIFUS são calculadas com base no número de instrutores em cada modelo, daí apresentarem capacidades diferentes de modelo para modelo. Os cursos LIFUS\_LC não estão representados na tabela porque apresentam as mesmas capacidades que os cursos LIFUS destinados ao mesmo modelo, apenas apresenta um nome diferente por ser o último bloco de formação para serem aprovados.

O curso UPG\_Ground apresenta capacidades mínimas e máximas iguais por ser necessário um número exato de tripulantes. Este curso apenas é utilizado para as formações FC+UPG e UPG.

Os cursos SIM\_REC apresentam a necessidade de serem frequentados obrigatoriamente por dois tripulantes pois trata-se de um simulador específico destinado a tripulantes que efetuam uma formação do tipo Upgrade.

Todas as informações referentes aos vários *slots* existentes estão listadas na folha “Activities” e pode-se observar a existência de algumas diferenças quanto às disponibilidades e durações de cada curso. Visto que o curso “SIM” é realizado recorrendo a recursos externos, apresenta para cada modelo durações e datas diferentes. Para os restantes cursos, por serem lecionados pela própria empresa normalmente seguem um padrão constante, a não ser que, por algum motivo especial seja preciso alterar. A coluna da “Ocorrência” indica quando se inicia um novo *slot* e a coluna da “Duração” indica a duração de cada *slot*, em dias. Também são apresentadas as datas de início dos primeiros *slots* de cada curso, as datas de conclusão dos últimos *slots* de cada curso e o número de *slots* que foram considerados para cada curso, como mostra a Tabela 8.

**TABELA 8 - INFORMAÇÕES SOBRE OS SLOTS**

Curso	Ocorrência	Duração	Data início 1º slot	Data fim último slot	Nº Slots
INDOC	Todas as segundas-feiras	15 dias	27/01/25	13/10/26	88
BT_A	Todas as quartas-feiras	2 dias	08/01/25	29/01/27	108
BT_B					
BT_C					
BT_D					
BT_F					
BT_G					
LIFUS_A	A cada duas semanas	7 dias	20/01/25	25/01/27	53
LIFUS_B					
LIFUS_C					
LIFUS_D					
LIFUS_F					
LIFUS_G					
SIM_A	Pré definidos	20 dias	24/03/25	17/01/27	42
SIM_B		17-19 dias	03/03/25	04/12/26	13
SIM_C		19-22 dias	07/04/25	19/12/26	14
SIM_D		20-24 dias	03/03/25	15/09/26	24
SIM_F		20-23 dias	13/03/25	26/10/26	12
SIM_G		23-26 dias	10/03/25	31/07/26	11
SIM_REC_A	Todas as segundas-feiras	5 dias	03/03/25	05/07/25	18
SIM_REC_C	Todas as segundas-feiras	5 dias	03/02/25	30/01/27	208
UPG_Ground_A					
UPG_Ground_C	A cada duas semanas	7 dias	20/01/25	25/01/27	53
LIFUS_A_LC					
LIFUS_B_LC					
LIFUS_C_LC					
LIFUS_D_LC					
LIFUS_F_LC					
LIFUS_G_LC					

Note-se que, na Tabela 8, o número de *slots* apresentado diz respeito ao número de *slots* de cada curso para cada modelo, ou seja, não representa a soma dos *slots* do mesmo curso para todos os modelos.

### 5.2.3 TRIPULANTES

Como base para iniciar este processo foi considerada uma instância real com 123 tripulantes a necessitar de formação que se encontra representada na folha “Crew”. Esta instância inclui 28 tripulantes que vão precisar da formação “*New Hire*”, 56 tripulantes que vão precisar da formação “*Fleet Change*”, 12 tripulantes que vão precisar da formação “*Fleet Change + UPG*”, 9 tripulantes que vão precisar da formação “*UPG*” e 18 tripulantes que vão abandonar a empresa. Nesta instância, as formações são direcionadas para os modelos de aeronaves (A, B, C, D, F e G) e o modelo E apenas é considerado como modelo de saída, visto que a empresa vai deixar de o ter na sua frota.

Visto que para alguns destes tripulantes há *slots* pré-definidos, a folha “Definidas” contém essa informação. Por outro lado, existem outros tripulantes que apresentam data de início de formação mais cedo, a partir da qual estão disponíveis para iniciar a sua formação.

Nas tabelas, Tabela 9, Tabela 10, Tabela 11 e Tabela 12 encontram-se os tripulantes e a respetiva formação necessária tal como consta na folha “Crew”.

**TABELA 9 - TRIPULANTES QUE NECESSITAM DO TIPO DE FORMAÇÃO "NEW HIRE"**

Name	TrainingType	ToRank	ToFleet	Training
Crew #1	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #2	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #3	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #4	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #11	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #12	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #17	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #18	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #21	New Hire	SIC	A	NH_A
Crew #22	New Hire	SIC	A	NH_A
Crew #23	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #24	New Hire	SIC	D	NH_D
Crew #5	New Hire	SIC	B	NH_B
Crew #6	New Hire	SIC	B	NH_B
Crew #7	New Hire	SIC	B	NH_B
Crew #8	New Hire	SIC	B	NH_B
Crew #9	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #10	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #13	New Hire	SIC	F	NH_F
Crew #14	New Hire	SIC	F	NH_F
Crew #15	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #16	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #19	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #20	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #25	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #26	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #27	New Hire	SIC	C	NH_C
Crew #28	New Hire	SIC	C	NH_C

**TABELA 10 - TRIPULANTES QUE NECESSITAM DO TIPO DE FORMAÇÃO "FLEET CHANGE"**

Name	TrainingType	FromRank	FromFleet	ToRank	ToFleet	Training
Crew #33	Fleet Change	SIC	E	SIC	G	FC_G
Crew #34	Fleet Change	PIC	C	PIC	G	FC_G
Crew #38	Fleet Change	PIC	E	PIC	F	FC_F
Crew #39	Fleet Change	PIC	E	PIC	F	FC_F
Crew #40	Fleet Change	PIC	E	PIC	G	FC_G
Crew #41	Fleet Change	PIC	E	PIC	G	FC_G
Crew #62	Fleet Change	PIC	B	PIC	F	FC_F
Crew #63	Fleet Change	PIC	B	PIC	F	FC_F
Crew #64	Fleet Change	PIC	B	PIC	F	FC_F
Crew #65	Fleet Change	PIC	B	PIC	F	FC_F
Crew #66	Fleet Change	PIC	B	PIC	F	FC_F
Crew #67	Fleet Change	PIC	B	PIC	F	FC_F
Crew #68	Fleet Change	PIC	B	PIC	F	FC_F
Crew #69	Fleet Change	SIC	E	SIC	F	FC_F
Crew #70	Fleet Change	SIC	E	SIC	F	FC_F
Crew #71	Fleet Change	PIC	A	PIC	F	FC_F
Crew #72	Fleet Change	SIC	B	SIC	G	FC_G
Crew #73	Fleet Change	SIC	B	SIC	G	FC_G
Crew #74	Fleet Change	PIC	E	PIC	G	FC_G
Crew #29	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #30	Fleet Change	PIC	C	PIC	D	FC_D
Crew #31	Fleet Change	PIC	A	PIC	D	FC_D
Crew #32	Fleet Change	PIC	A	PIC	D	FC_D
Crew #75	Fleet Change	PIC	E	PIC	G	FC_G
Crew #76	Fleet Change	PIC	E	PIC	G	FC_G
Crew #35	Fleet Change	PIC	D	PIC	A	FC_A
Crew #36	Fleet Change	PIC	E	PIC	D	FC_D
Crew #37	Fleet Change	PIC	E	PIC	D	FC_D
Crew #77	Fleet Change	PIC	C	PIC	G	FC_G
Crew #78	Fleet Change	PIC	C	PIC	G	FC_G
Crew #79	Fleet Change	SIC	A	SIC	G	FC_G
Crew #80	Fleet Change	SIC	A	SIC	G	FC_G
Crew #42	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #43	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #44	Fleet Change	PIC	C	PIC	D	FC_D
Crew #45	Fleet Change	PIC	C	PIC	D	FC_D
Crew #46	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #47	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #48	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #49	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #50	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #51	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #52	Fleet Change	PIC	B	PIC	D	FC_D
Crew #53	Fleet Change	PIC	E	PIC	D	FC_D
Crew #54	Fleet Change	PIC	E	PIC	D	FC_D
Crew #55	Fleet Change	PIC	E	PIC	D	FC_D
Crew #56	Fleet Change	SIC	E	SIC	D	FC_D
Crew #57	Fleet Change	SIC	E	SIC	D	FC_D
Crew #58	Fleet Change	PIC	A	PIC	D	FC_D
Crew #59	Fleet Change	PIC	A	PIC	D	FC_D
Crew #60	Fleet Change	PIC	A	PIC	D	FC_D
Crew #61	Fleet Change	PIC	A	PIC	D	FC_D
Crew #81	Fleet Change	SIC	A	SIC	G	FC_G
Crew #82	Fleet Change	SIC	E	SIC	C	FC_C
Crew #83	Fleet Change	SIC	E	SIC	C	FC_C
Crew #84	Fleet Change	SIC	E	SIC	C	FC_C

**TABELA 11 - TRIPULANTES QUE NECESSITAM DO TIPO DE FORMAÇÃO "FLEET CHANGE + UPG"**

Name	TrainingType	FromRank	FromFleet	ToRank	ToFleet	Training
Crew #85	Fleet change + UPG	SIC	F	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #86	Fleet change + UPG	SIC	E	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #87	Fleet change + UPG	SIC	E	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #88	Fleet change + UPG	SIC	E	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #89	Fleet change + UPG	SIC	G	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #93	Fleet change + UPG	SIC	F	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #94	Fleet change + UPG	SIC	G	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #95	Fleet change + UPG	SIC	C	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #96	Fleet change + UPG	SIC	C	PIC	A	FC+UPG_A
Crew #90	Fleet change + UPG	SIC	D	PIC	C	FC+UPG_C
Crew #91	Fleet change + UPG	SIC	E	PIC	C	FC+UPG_C
Crew #92	Fleet change + UPG	SIC	E	PIC	C	FC+UPG_C

**TABELA 12 - TRIPULANTES QUE NECESSITAM DO TIPO DE FORMAÇÃO "UPG"**

Name	TrainingType	FromRank	FromFleet	ToRank	ToFleet	Training
Crew #115	UPG	SIC	A	PIC	A	UPG_A
Crew #116	UPG	SIC	A	PIC	A	UPG_A
Crew #117	UPG	SIC	A	PIC	A	UPG_A
Crew #118	UPG	SIC	C	PIC	C	UPG_C
Crew #119	UPG	SIC	C	PIC	C	UPG_C
Crew #120	UPG	SIC	C	PIC	C	UPG_C
Crew #121	UPG	SIC	C	PIC	C	UPG_C
Crew #122	UPG	SIC	C	PIC	C	UPG_C
Crew #123	UPG	SIC	A	PIC	A	UPG_A

Por outro lado, existem tripulantes que por motivos de reforma ou por outros motivos vão sair da empresa. Estes tripulantes também são apresentados na folha “Crew” tal como ilustra a Tabela 13.

**TABELA 13 - TRIPULANTES QUE VÃO ABANDONAR A EMPRESA**

Name	FromRank	FromFleet	ToRank	ToFleet	Training
Crew #97	SIC	C	OUT	CHURN	SIC_C_CHURN
Crew #98	SIC	C	OUT	CHURN	SIC_C_CHURN
Crew #99	PIC	E	OUT	RETIREMENT	PIC_E_RETIREMENT
Crew #100	SIC	G	OUT	RETIREMENT	SIC_G_RETIREMENT
Crew #101	SIC	G	OUT	RETIREMENT	SIC_G_RETIREMENT
Crew #102	PIC	A	OUT	RETIREMENT	PIC_A_RETIREMENT
Crew #103	PIC	G	OUT	RETIREMENT	PIC_G_RETIREMENT
Crew #104	PIC	A	OUT	RETIREMENT	PIC_A_RETIREMENT
Crew #105	PIC	G	OUT	RETIREMENT	PIC_G_RETIREMENT
Crew #106	SIC	G	OUT	RETIREMENT	SIC_G_RETIREMENT
Crew #107	SIC	G	OUT	RETIREMENT	SIC_G_RETIREMENT
Crew #108	PIC	B	OUT	RETIREMENT	PIC_B_RETIREMENT
Crew #109	PIC	E	OUT	RETIREMENT	PIC_E_RETIREMENT
Crew #110	PIC	G	OUT	RETIREMENT	PIC_G_RETIREMENT
Crew #111	PIC	A	OUT	RETIREMENT	PIC_A_RETIREMENT
Crew #112	SIC	B	OUT	RETIREMENT	SIC_B_RETIREMENT
Crew #113	PIC	E	OUT	RETIREMENT	PIC_E_RETIREMENT
Crew #114	PIC	A	OUT	RETIREMENT	PIC_A_RETIREMENT

Visto que estes tripulantes vão abandonar a empresa e é fornecida a data de saída, estes executam uma atividade chamada “OUT” que serve para efeitos de contabilização das saídas. A Tabela 14 mostra os tripulantes e a respetiva data em que abandonam a empresa.

**TABELA 14 - TRIPULANTES QUE VÃO ABANDONAR A EMPRESA E A DATA DA RESPECTIVA SAÍDA**

Name	Data saída	Destino
Crew #97	01/03/25	OUT
Crew #98	01/03/25	OUT
Crew #99	01/03/25	OUT
Crew #100	01/03/25	OUT
Crew #101	01/03/25	OUT
Crew #102	01/03/25	OUT
Crew #103	01/09/25	OUT
Crew #104	01/09/25	OUT
Crew #105	01/12/25	OUT
Crew #106	01/12/25	OUT
Crew #107	01/12/25	OUT
Crew #108	01/01/26	OUT
Crew #109	01/04/26	OUT
Crew #110	01/04/26	OUT
Crew #111	01/05/26	OUT
Crew #112	01/07/26	OUT
Crew #113	01/11/26	OUT
Crew #114	01/12/26	OUT

Também existem tripulantes que têm uma data de início mais cedo estabelecida. Nestes casos, a partir da data estabelecida os tripulantes estão aptos para iniciarem as suas formações, mas nunca podem começar antes. Na Tabela 15 são apresentados os tripulantes com as datas de início mais cedo e o tipo de formação que precisam.

**TABELA 15 - TRIPULANTES QUE APRESENTAM DATA DE INÍCIO MAIS CEDO**

Name	Data mais cedo	TrainingType	Name	Data mais cedo	TrainingType
Crew #1	01/03/25	New Hire	Crew #32	01/03/25	Fleet Change
Crew #2	01/03/25	New Hire	Crew #33	01/03/25	Fleet Change
Crew #3	01/03/25	New Hire	Crew #34	01/03/25	Fleet Change
Crew #4	01/03/25	New Hire	Crew #35	01/03/25	Fleet change
Crew #5	01/03/25	New Hire	Crew #36	01/04/25	Fleet Change
Crew #6	01/03/25	New Hire	Crew #37	01/04/25	Fleet Change
Crew #7	01/03/25	New Hire	Crew #38	01/04/25	Fleet Change
Crew #8	01/03/25	New Hire	Crew #39	01/04/25	Fleet Change
Crew #9	01/03/25	New Hire	Crew #40	01/04/25	Fleet Change
Crew #10	01/03/25	New Hire	Crew #41	01/04/25	Fleet Change
Crew #11	01/03/26	New Hire	Crew #42	01/05/25	Fleet Change
Crew #12	01/03/26	New Hire	Crew #43	01/05/25	Fleet Change
Crew #13	01/03/26	New Hire	Crew #44	01/05/25	Fleet Change
Crew #14	01/03/26	New Hire	Crew #45	01/05/25	Fleet Change
Crew #15	01/03/26	New Hire	Crew #85	01/02/25	Fleet change + UPG
Crew #16	01/03/26	New Hire	Crew #86	01/12/25	Fleet change + UPG
Crew #17	01/04/26	New Hire	Crew #87	01/12/25	Fleet change + UPG
Crew #18	01/04/26	New Hire	Crew #88	01/12/25	Fleet change + UPG
Crew #19	01/04/26	New Hire	Crew #89	01/12/25	Fleet change + UPG
Crew #20	01/04/26	New Hire	Crew #90	01/09/26	Fleet change + UPG
Crew #21	01/04/26	New Hire	Crew #91	01/09/26	Fleet change + UPG
Crew #22	01/04/26	New Hire	Crew #92	01/09/26	Fleet change + UPG
Crew #23	01/05/26	New Hire	Crew #115	01/03/25	UPG
Crew #24	01/05/26	New Hire	Crew #116	01/04/25	UPG
Crew #25	01/05/26	New Hire	Crew #117	01/04/25	UPG
Crew #26	01/05/26	New Hire	Crew #118	01/05/25	UPG
Crew #27	01/05/26	New Hire	Crew #119	01/05/25	UPG
Crew #28	01/05/26	New Hire	Crew #120	01/05/25	UPG
Crew #29	01/03/25	Fleet Change	Crew #121	01/05/25	UPG
Crew #30	01/03/25	Fleet Change	Crew #122	01/05/25	UPG
Crew #31	01/03/25	Fleet Change			

Para além destas restrições de início de formação, também existem tripulantes que são obrigados a frequentar *slots* específicos. Estes *slots* apenas se referem ao curso “SIM” e têm datas estipuladas para o fazerem, como ilustra a Tabela 16.

**TABELA 16 - TRIPULANTES COM SLOTS PRÉ-DEFINIDOS**

Tripulante	Curso	Data Início	Data Fim
Crew #31	SIM_D	03/03/25	25/03/25
Crew #32	SIM_D	03/03/25	25/03/25
Crew #33	SIM_G	10/03/25	02/04/25
Crew #34	SIM_G	10/03/25	02/04/25
Crew #85	SIM_A	24/03/25	13/04/25

Outro aspeto muito importante e que é preciso ter em consideração é a tripulação mínima exigida ao serviço no início de cada período. Visto que um tripulante a partir do momento que inicia a sua formação e até chegar à fase de LIFUS torna-se indisponível para operar no dia a dia da empresa, é necessário gerir os tripulantes disponíveis para responder às necessidades dos clientes.

Na folha “Needs” consta a quantidade de pilotos ativos (PIC\_Inicio) e a quantidade de copilotos ativos (SIC\_Inicio) no início de cada período, que são utilizados como ponto de partida para contabilizar as entradas e saídas. Também é destacado um valor de tripulação desejável ao serviço para cada função, que é representado como (PIC\_expected) e (SIC\_expected). Estes valores não são apresentados como números inteiros porque um tripulante não tem necessariamente que ser contabilizado como uma unidade. O cálculo resulta do número de dias que cada tripulante trabalha por ano e, desta forma um horário full-time é contabilizado como uma unidade, mas noutros casos, a sua contabilização pode variar entre 0.8 e 1.2.

Nas tabelas seguintes, Tabela 17 a Tabela 23 são apresentados estes valores para cada modelo.

**TABELA 17 - QUANTIDADES DE TRIPULANTES POR FUNÇÃO E POR PERÍODO NO MODELO A**

Data	SIC_Inicio	SIC_expected	PIC_Inicio	PIC_expected
01/03/25	61,82	57	94,54	93
...				
01/02/26				
01/03/26	61,82	58	94,54	97
...				
01/12/26				

**TABELA 18 - QUANTIDADES DE TRIPULANTES POR FUNÇÃO E POR PERÍODO NO MODELO B**

Data	SIC_Inicio	SIC_expected	PIC_Inicio	PIC_expected
01/03/25	35,1	37	65,04	61
...				
01/07/26				
01/08/26	35,1	35	65,04	59
01/09/26	35,1	33	65,04	56
01/10/26	35,1	31	65,04	53
01/11/26	35,1	30	65,04	49
01/12/26				

**TABELA 19 - QUANTIDADES DE TRIPULANTES POR FUNÇÃO E POR PERÍODO NO MODELO C**

Data	SIC_Inicio	SIC_expected	PIC_Inicio	PIC_expected
01/03/25	59,92	60	108,4	100
...				
01/10/25	59,92	62	108,4	103
...				
01/09/26				
01/10/26	59,92	64	108,4	106
01/11/26				
01/12/26	59,92	66	108,4	110

**TABELA 20 - QUANTIDADES DE TRIPULANTES POR FUNÇÃO E POR PERÍODO NO MODELO D**

Data	SIC_Inicio	SIC_expected	PIC_Inicio	PIC_expected
01/03/25	26,14	26	40,8	43
01/04/25	26,14	28	40,8	47
01/05/25				
01/06/25	26,14	30	40,8	50
...				
01/08/25				
01/09/25	26,14	32	40,8	53
...				
01/02/26				
01/03/26	26,14	34	40,8	57
01/04/26				
01/05/26	26,14	36	40,8	60
...				
01/10/26				
01/11/26	26,14	38	40,8	63
01/12/26				

**TABELA 21 - QUANTIDADES DE TRIPULANTES POR FUNÇÃO E POR PERÍODO NO MODELO E**

Data	SIC_Inicio	SIC_expected	PIC_Inicio	PIC_expected
01/03/25	17,02	19	26,74	33
...				
01/05/25	17,02	16	26,74	27
...				
01/08/25				
01/09/25	17,02	14	26,74	24
...				
01/11/25				
01/12/25	17,02	12	26,74	21
...				
01/02/26				
01/03/26	17,02	11	26,74	18
...				
01/08/26				
01/09/26	17,02	9	26,74	15
...				
01/11/26				
01/12/26	17,02	7	26,74	12

**TABELA 22 - QUANTIDADES DE TRIPULANTES POR FUNÇÃO E POR PERÍODO NO MODELO F**

Data	SIC_Inicio	SIC_expected	PIC_Inicio	PIC_expected
01/03/25	15,4	11	24,42	18
01/04/25	15,4	13	24,42	22
01/05/25	15,4	15	24,42	26
...				
01/04/26	15,4	17	24,42	29
01/05/26				
...				
01/08/26	15,4	19	24,42	33
01/09/26				
01/12/26				

**TABELA 23 - QUANTIDADES DE TRIPULANTES POR FUNÇÃO E POR PERÍODO NO MODELO G**

Data	SIC_Inicio	SIC_expected	PIC_Inicio	PIC_expected
01/03/25	40,84	40	73,28	72
...				
01/07/26	40,84	43	73,28	77
01/08/26				
...				
01/12/26	40,84	43	73,28	77

Com base nos dados apresentados anteriormente, é calculada a quantidade de tripulação mínima exigida para cada modelo em cada período. Para isso, considerou-se uma tolerância a ser respeitada de 60% para todos os modelos, exceto o modelo E que utiliza uma tolerância de 30%. Neste modelo específico, a tolerância é mais baixa porque como este modelo se encontra de saída da frota, a empresa aceita que em alguns casos, certas aeronaves possam ficar sem tripulação. Desta forma, os valores a serem respeitados no início de cada período resultam da multiplicação da tolerância pelos valores das quantidades desejáveis de tripulantes ao serviço para cada função, nomeadamente “PIC\_expected” e “SIC\_expected”.

## 6. RESULTADOS OBTIDOS

Para a realização deste trabalho foi utilizado um *MacBook Air* com processador *Apple M2*, memória RAM de 8 GB e sistema operativo macOS Sonoma 14.5 e, relativamente ao *software*, foi utilizado o *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio* com a versão 22.1.2.

Com recurso ao *software* e com base na formulação PLI, a utilização da instância real fornecida resultou num problema impossível. Deste modo, verificaram-se incompatibilidades nos dados pela existência de tripulantes sem condições de acesso aos *slots*. Foi necessário partir da instância inicial sem soluções admissíveis e encontrar alternativas próximas desta instância que permitissem obter soluções admissíveis. Obteve-se, assim, recorrendo ao acréscimo do número de *slots* duas alternativas distintas.

Os *Seat Support* são tripulantes auxiliares que são utilizados em *slots* de cursos específicos que necessitam de capacidades fixas. Nestes casos, visto que o número de tripulantes à priori é ímpar, estes frequentam os *slots* para auxiliar na realização dos cursos.

### Alternativa A:

Nesta alternativa foram adicionados quatro *Seat Support* à lista de tripulantes. Estes tripulantes apenas auxiliam em cursos específicos, nomeadamente no simulador (SIM\_REC) do modelo C, no curso (UPG\_Ground) do modelo A e no curso (UPG\_Ground) do modelo C. Neste último curso são utilizados dois *Seat Support* porque se focam em anos diferentes, ou seja, um auxilia os tripulantes que podem iniciar as suas formações em 2025 e o outro auxilia os tripulantes que só podem iniciar as suas formações em 2026. Foram criados desta forma porque caso não existisse este número de *Seat Support*, iriam ser alocados no mesmo *slot* tripulantes com datas de começo muito distantes e assim, um deles não ia ter disponibilidade de *slots* dos cursos seguintes para completar a sua formação.

Neste caso, obteve-se uma solução admissível em 159 segundos e com o valor de 98,31 dias.

Analisando a Tabela 24, pode-se verificar a quantidade de períodos em que o número de tripulantes no ativo difere do número desejável, isto é, número de períodos em que o número de tripulantes está acima do desejável e o número de períodos em que o número de tripulantes está abaixo do desejável.

**TABELA 24 - NÚMERO DE PERÍODOS NA ALTERNATIVA A**

	Acima desejável	Abaixo desejável
PIC A	22	0
SIC A	12	10
PIC B	3	19
SIC B	18	4
PIC C	21	1
SIC C	1	21
PIC D	15	7
SIC D	5	17
PIC E	0	22
SIC E	7	15
PIC F	21	1
SIC F	4	18
PIC G	22	0
SIC G	5	17
<b>Total</b>	<b>156</b>	<b>152</b>

A empresa estipulou um valor de referência para o número desejável, em cada período, de forma a não correr riscos de insuficiência de tripulantes nas operações diárias. Através da Tabela 24, podemos verificar que existem 156 períodos em que o número de tripulantes no ativo está acima dos valores desejáveis e 152 períodos em que o número de tripulantes no ativo está abaixo dos valores desejáveis.

Complementarmente, na Tabela 25, observa-se para cada posição do tripulante, isto é, função e modelo, os desvios em relação à quantidade desejável.

**TABELA 25 - DESVIOS EM RELAÇÃO À QUANTIDADE DESEJÁVEL**

	Acima do desejável			Abaixo do desejável		
	Desvio máximo	Desvio Mínimo	Desvio médio	Desvio máximo	Desvio Mínimo	Desvio médio
PIC A	8,54	0,54	3,95	-	-	-
SIC A	3,82	0,82	1,24	3,18	0,18	1,78
PIC B	4,04	1,04	2,04	13,96	1,96	8,96
SIC B	6,1	0,1	1,27	1,9	1,9	1,90
PIC C	9,4	1,4	5,88	2,6	2,6	2,60
SIC C	0,92	0,92	0,92	9,08	1,08	5,75
PIC D	6,8	0,8	3,73	6,2	1,2	4,20
SIC D	2,14	0,14	0,74	3,86	0,86	2,45
PIC E	-	-	-	11,26	0,26	5,53
SIC E	2,02	0,02	0,88	4,98	0,98	3,11
PIC F	6,42	0,42	3,23	1,58	1,58	1,58
SIC F	2,4	0,4	0,90	3,6	1,6	1,77
PIC G	6,28	1,28	3,23	-	-	-
SIC G	0,84	0,84	0,84	2,16	0,16	1,87

Na Tabela 25 são apresentados os valores dos desvios máximos, mínimos e médios para cada posição de tripulantes. Pode-se observar que, o maior desvio nos casos em que o número de tripulantes no ativo está acima do desejável é de mais 9,4 tripulantes que o desejável. Por outro lado, nos casos em que o número de tripulantes no ativo está abaixo das quantidades desejáveis, verifica-se um valor de menos 13,96 tripulantes que o desejável.

### Alternativa B:

Nesta segunda alternativa foram adicionados dois *Seat Support* à lista de tripulantes e aumentou-se o número de *slots* do curso SIM\_REC para cada modelo. Um dos *Seat Support* é utilizado para auxiliar no curso SIM\_REC no modelo C e o outro é utilizado para auxiliar no curso UPG\_Ground no modelo A. Para além disto, foi necessário adicionar mais *slots* do curso SIM\_REC visto que o curso UPG\_Ground exige que seja sempre frequentado por dois tripulantes. Alguns tripulantes estavam a ser alocados em *slots* com outros tripulantes com datas de início de formação muito mais tardias, ou seja, só iriam começar o curso quando ambos pudessem. Assim, quando transitavam para o curso SIM\_REC observava-se falta de *slots* neste curso para os tripulantes que estavam aptos para iniciar a sua formação na sua data, mas tiveram de aguardar pelo outro tripulante.

Neste caso, obteve-se uma solução admissível em 280 segundos e com o valor de 99,864 dias.

Na Tabela 26, pode-se verificar o número de períodos em que os números de tripulantes no ativo são diferentes das quantidades desejáveis, isto é, número de períodos em que o número de tripulantes está acima do desejável e número de períodos em que o número de tripulantes está abaixo do desejável.

**TABELA 26 - NÚMERO DE PERÍODOS NA ALTERNATIVA B**

	Acima desejável	Abaixo desejável
PIC A	21	1
SIC A	12	10
PIC B	3	19
SIC B	18	4
PIC C	21	1
SIC C	1	21
PIC D	15	7
SIC D	5	17
PIC E	0	22
SIC E	7	15
PIC F	21	1
SIC F	4	18
PIC G	22	0
SIC G	6	16
Total	156	152

Neste caso, comparando com a Tabela 25, pode-se verificar que os valores são iguais em ambas as alternativas. Observa-se 156 períodos em que o número de tripulantes no ativo está acima dos valores desejáveis e 152 períodos em que o número de tripulantes no ativo está abaixo dos valores desejáveis.

De seguida, na tabela seguinte, observa-se para cada posição do tripulante, isto é, função e modelo, os desvios em relação à quantidade desejável.

**TABELA 27 - DESVIOS EM RELAÇÃO À QUANTIDADE DESEJÁVEL**

	Acima desejável			Abaixo desejável		
	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio médio	Desvio máximo	Desvio mínimo	Desvio médio
PIC A	8,54	0,54	3,68	0,46	0,46	0,46
SIC A	3,82	0,82	1,24	3,18	0,18	1,78
PIC B	4,04	2,04	2,71	12,96	1,96	8,22
SIC B	6,10	0,10	1,27	1,9	1,9	1,9
PIC C	9,40	0,40	5,80	2,6	2,6	2,60
SIC C	1,92	1,92	1,92	8,08	0,08	4,79
PIC D	6,80	0,80	3,73	6,2	1,2	4,20
SIC D	2,14	0,14	0,74	3,86	0,86	2,45
PIC E	-	-	-	11,26	0,26	5,53
SIC E	2,02	0,02	0,88	4,98	0,98	3,11
PIC F	6,42	0,42	3,23	1,58	1,58	1,58
SIC F	3,40	0,40	1,15	3,6	1,6	1,77
PIC G	6,28	1,28	3,23	-	-	-
SIC G	0,84	0,84	0,84	2,16	1,16	1,85

Na Tabela 27 são apresentados os valores dos desvios máximos, mínimos e médios para cada posição de tripulantes. Pode-se observar que o maior desvio nos casos em que o número de tripulantes no ativo está acima do desejável é de mais 9,4 tripulantes que o desejável. Por outro lado, nos casos em que o número de tripulantes no ativo está abaixo do desejável, verifica-se um valor de menos 12,96 tripulantes.

Note se que, através do computador utilizado não foi possível encontrar soluções ótimas em ambas as alternativas, no entanto foi realizado um teste com uma máquina mais potente. Utilizou-se a seguinte máquina: *ADM Ryzen Threadripper 3960X (24 – core) with 64 GB, Run in a multithread mode.* com a versão 20.1.0.0 do *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. Neste caso, na alternativa A também não se obteve solução ótima, enquanto na alternativa B obteve-se uma solução ótima em 6606 segundos com o valor de 95,832 dias.

No Anexo 2 pode-se encontrar as tabelas referentes às soluções do escalonamento da formação dos tripulantes por tipo de função e por tipo de modelo de aeronave. Nestas tabelas são apresentadas todas as informações sobre os inícios de formação, fim de formação, saídas e os valores obtidos nas quantidades de tripulantes no ativo por período.

## 6.1 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS

Para a resolução do caso prático, foram utilizadas as duas alternativas mencionadas anteriormente, a alternativa A e a alternativa B. Ambas são instâncias próximas da instância real, mas com algumas alterações nos dados. Para comparar as soluções, foram considerados os valores das soluções do tempo médio de formação dos tripulantes, o tempo de processamento e as médias das diferenças entre o número de tripulantes desejáveis e o número obtido pela solução.

Na Tabela 28, encontram-se os valores das soluções da duração média da formação dos tripulantes, em dias, e a duração do processamento obtidas através do método PLI. Da observação das soluções pode-se concluir que a alternativa A apresenta melhor resultado embora bastante próximo da alternativa B, todavia relativamente ao tempo de processamento, esta foi a mais eficiente pois requer menos 121 segundos que a alternativa B.

TABELA 28 – VALORES DAS SOLUÇÕES OBTIDAS

	Solução admissível (dias)	Duração (s)
Alternativa A	98,31	159
Alternativa B	99,864	280

De outro modo, analisar o indicador das médias das diferenças entre o número de tripulantes observados na solução e os valores desejáveis é bastante útil pois permite observar as movimentações nas posições dos tripulantes, isto é, por função e por modelo de aeronave. Na Tabela 29 apresentam-se estes valores para cada alternativa.

**TABELA 29 - COMPARAÇÃO DAS DIFERENÇAS DAS MÉDIAS NAS DUAS ALTERNATIVAS**

	Alternativa A		Alternativa B	
	Média acima	Média abaixo	Média acima	Média abaixo
PIC A	3,95	-	3,52	0,46
SIC A	1,24	1,78	1,24	1,78
PIC B	2,04	8,96	2,71	8,22
SIC B	1,27	1,90	1,27	1,90
PIC C	5,88	2,60	5,88	2,60
SIC C	0,92	5,75	1,92	4,79
PIC D	3,73	4,20	3,73	4,20
SIC D	0,74	2,45	0,74	2,45
PIC E	-	5,53	-	5,53
SIC E	0,88	3,11	0,88	3,11
PIC F	3,23	1,58	3,23	1,58
SIC F	0,90	1,77	1,15	1,77
PIC G	3,23	-	3,23	-
SIC G	0,84	1,87	0,84	1,85
Média total	3,00	4,10	2,94	3,87

Verifica-se que em várias posições os indicadores apresentam valores iguais devido às instâncias serem bastante próximas. Na alternativa A, pode-se observar uma maior discrepância nos valores obtidos. Nos períodos em que se verifica que o número de tripulantes no ativo é superior ao desejável, observa-se que a média ponderada é de 3,00 tripulantes, ou seja, existem, por período, em média, mais 3,00 tripulantes no ativo que o valor desejável. Nos períodos em que se verifica que o número de tripulantes no ativo é inferior ao desejável, observa-se que a média ponderada é de 4,10 tripulantes, ou seja, existem, por período, em média, menos 4,10 tripulantes no ativo que o valor desejável. Desta forma, verifica-se uma alocação excessiva dos tripulantes em alguns períodos e, pelo contrário, uma alocação reduzida de tripulantes em outros períodos, concluindo-se assim, a existência de uma maior oscilação nas quantidades de tripulantes no ativo ao longo dos períodos comparativamente ao valor desejável.

Na alternativa B, verifica-se uma melhor e mais equilibrada distribuição dos tripulantes. Nos períodos em que se verifica que o número de tripulantes no ativo é superior ao desejável, observa-se que a média ponderada é de 2,94 tripulantes, ou seja, existem, por período, em média, mais 2,94 tripulantes no ativo que o valor desejável. Nos períodos em que se verifica que o número de tripulantes no ativo é inferior ao desejável, observa-se que a média ponderada é de 3,87 tripulantes, ou seja, existem, por período, em média, menos 3,87 tripulantes no ativo que o valor desejável. Deste modo, conclui-se que nesta alternativa se verificam menores desvios em relação aos valores pretendidos pela empresa.

## 7. CONCLUSÕES

O escalonamento da formação dos tripulantes realizado no presente trabalho, foi feito recorrendo à formulação do problema em programação linear inteira.

O modelo em PLI foi resolvido com o *software IBM ILOG CPLEX*. Foi necessário realizar alguns ajustamentos para encontrar instâncias com soluções admissíveis. Nestas novas instâncias não foi possível encontrar, em tempo útil, soluções ótimas pelo que foram obtidas soluções apenas admissíveis. Pode ser interessante uma abordagem heurística, prescindindo da garantia de obtenção do valor ótimo, mas com o propósito de encontrar uma solução razoável, em tempo reduzido. No presente trabalho esboçou-se uma heurística construtiva, no entanto, esta consta nos anexos, uma vez que não foi implementada por falta de tempo e por ser considerado prioritário o modelo PLI, ficando assim como uma sugestão para um futuro trabalho.

Neste trabalho procurou-se melhorar o processo de escalonamento das formações dos tripulantes da empresa de aviação pois é uma tarefa bastante complexa e sendo bem otimizada tem grande impacto nas operações da empresa. Embora o trabalho desenvolvido tenha alcançado os principais objetivos, há certos pontos a melhorar. Neste trabalho considerou-se o curso UPG\_Ground como sendo específico para cada modelo, mas num futuro trabalho, deve-se tentar implementar este curso com sendo geral, isto é, podendo conter tripulantes de diversos modelos no mesmo *slot* de forma a tentar alinhar com a realidade da empresa.

De uma forma geral, este método, apesar de demorado para instâncias muito complexas, é uma ferramenta essencial para a empresa poder escalonar e calendarizar as formações, compreendendo as melhores datas e *slots* para cada tripulante a necessitar de formação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfares, H. K. (2004). Survey, categorization, and comparison of recent tour scheduling literature. *Annals of Operations Research*, 127(1), 145-175. <https://link.springer.com/article/10.1023/B:ANOR.0000019088.98647.e2>
- Badea, V. E., Zamfiroiu, A., & Boncea, R. (2018). Big data in the aerospace industry. *Informatica Economica*, 22(1), 17-24. <https://pdfs.semanticscholar.org/00c4/467d318b999b38cf8bb604c31032167be7e5.pdf>
- Barnhart, C., Belobaba, P., & Odoni, A. R. (2003). Applications of operations research in the air transport industry. *Transportation Science*, 37(4), 368-391. <https://doi.org/10.1287/trsc.37.4.368.23276>
- Bixby, R. E. (2002). Solving real-world linear programs: A decade and more of progress. *Operations Research*, 50(1), 3-15. <https://doi.org/10.1287/opre.50.1.3.17780>
- Brearley, A. L., Mitra, G., & Williams, H. P. (1975). Analysis of mathematical programming problems prior to applying the simplex algorithm. *Mathematical Programming*, 8(1), 54-83. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF01580428>
- Cardoen, B., Demeulemeester, E., & Beliën, J. (2010). Operating room planning and scheduling: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 201(3), 921-932. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2009.04.011>
- de Werra, D. (1985). An introduction to timetabling. *European Journal of Operational Research*, 19(2), 151-162. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(85\)90167-5](https://doi.org/10.1016/0377-2217(85)90167-5)
- Del Castillo, E. (2007). *Process optimization: a statistical approach* (Vol. 105). Springer Science & Business Media. [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-71435-6\\_9](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-0-387-71435-6_9)
- Ólafsson, S. (2006). Metaheuristics. *Handbooks in operations research and management science*, 13, 633-654. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)13021-2](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)13021-2)

- Hojati, M., & Patil, A. S. (2011). An integer linear programming-based heuristic for scheduling heterogeneous, part-time service employees. *European Journal of Operational Research*, 209(1), 37-50. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2010.09.004>
- Kabak, Ö., Ülengin, F., Aktaş, E., Önsel, Ş., & Topcu, Y. I. (2008). Efficient shift scheduling in the retail sector through two-stage optimization. *European Journal of Operational Research*, 184(1), 76-90. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.10.039>
- Kohl, N., & Karisch, S. E. (2004). Airline crew rostering: Problem types, modeling, and optimization. *Annals of Operations Research*, 127(1), 223–257. <https://link.springer.com/article/10.1023/b:anor.0000019091.54417.ca>
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). Industry 4.0. *Business & information systems engineering*, 6(4), 239–242. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>
- Moz, M., & Pato, M. V. (2007). A genetic algorithm approach to a nurse rostering problem. *Computers & Operations Research*, 34(3), 667-691. <https://doi.org/10.1016/j.cor.2005.03.019>
- Nemhauser, G. L., & Wolsey, L. A. (1999). *Integer and Combinatorial Optimization*. Wiley-Interscience. [https://books.google.pt/books?hl=pt-BR&lr=&id=vvm4DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA203&dq=Nemhauser,+G.+L.,+%26+Wolsey,+L.+A.+\(1999\).+Integer+and+Combinatorial+Optimization.+Wiley-Interscience.+&ots=K4ya-SIZdk&sig=rII0euB235d8nCWPdnri31hM3RQ&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.pt/books?hl=pt-BR&lr=&id=vvm4DwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA203&dq=Nemhauser,+G.+L.,+%26+Wolsey,+L.+A.+(1999).+Integer+and+Combinatorial+Optimization.+Wiley-Interscience.+&ots=K4ya-SIZdk&sig=rII0euB235d8nCWPdnri31hM3RQ&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)
- Reijers, H. A. (2021). Business Process Management: The evolution of a discipline. *Computers in Industry*, 126, 103404. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103404>
- Valls, V., Pérez, Á., & Quintanilla, S. (2009). Skilled workforce scheduling in service centres. *European Journal of Operational Research*, 193(3), 791-804. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2007.11.008>

## ANEXOS

### ANEXO 1 – HEURÍSTICA

Outro método que pode ser utilizado neste tipo de problemas é a construção de uma heurística construtiva. Este método garante soluções viáveis que respeitem as restrições existentes, mas não garante que seja uma solução ótima. Embora tenha sido desenvolvida uma heurística, esta acabou por não ser implementada.

**Passo 1:**

Ordenar os tripulantes por ordem crescente da data de início mais cedo (StartAfter).

**Passo 2:**

Ordenar os tripulantes que não têm data de início mais cedo por frota que operam atualmente, começando de A para G.

**Passo 3:**

Atribuir os *slots* pré-definidos aos tripulantes correspondentes e, nos casos em que os cursos pré-definidos não correspondam ao primeiro curso da sequência, alocar os tripulantes nesse curso anterior na data mais cedo que possa entrar segundo a sua disponibilidade, tendo em consideração o tempo de espera estabelecido entre cursos.

**Passo 4:**

Preencher as restantes vagas dos *slots* pré-definidos com os primeiros tripulantes que aparecerem na lista ordenada com disponibilidade para os frequentarem e com a necessidade do mesmo curso. Preencher também os *slots* com os cursos anteriores estipulados pela empresa.

**Passo 4.1:**

Caso os *slots* pré-definidos não respeitem as capacidades, solução impossível, fim. Se respeitarem as capacidades, excluir os *slots* das opções.

**Passo 5:**

Preencher os *slots* dos cursos anteriores que estão em estado latente com novos tripulantes que necessitam do mesmo curso e que têm disponibilidade para o frequentar.

**Passo 6:**

Verificar se os *slots* do passo 5 respeitam as capacidades estipuladas.

**Passo 6.1:**

Se respeitam, excluir os *slots* das opções.

**Passo 6.2:**

Caso não respeitem, voltar ao passo 3 e atribuir o *slot* seguinte do curso em questão.

**Passo 6.3:**

Se não houver nenhum *slot* do curso anterior que respeite as necessidades, solução impossível, fim.

**Passo 7:**

Atribuir os restantes *slots* de outros cursos aos tripulantes, começando pelo início da lista e respeitando os tempos de espera entre cursos e as capacidades dos *slots*.

**Passo 8:**

Verificar se todos os tripulantes estão alocados aos cursos que compõem as suas formações. Caso contrário, a solução não é válida, fim.

## ANEXO 2 – SOLUÇÕES DO ESCALONAMENTO

Neste anexo encontram-se as tabelas resultantes das movimentações dos tripulantes obtidas pelo modelo PLI. Cada tabela refere-se a apenas uma posição, ou seja, uma função de uma aeronave específica. Apresenta-se inicialmente as quantidades desejáveis de tripulantes no ativo para cada período, as quantidades mínimas de tripulantes no ativo por período e de seguida as soluções obtidas da quantidade inicial de tripulantes com as alterações das entradas e saídas de tripulantes.

Deste modo, são apresentadas as quantidades de tripulantes que iniciam as suas formações no respetivo período com destino à respetiva posição e, por sua vez, o final das suas formações. Também se verificam as quantidades de tripulantes que abandonam as respetivas posições nos períodos correspondentes. Assim, na linha “Solução”, apenas se considera como ativo ou inativo no período seguinte à sua entrada ou saída, respetivamente.

Note-se que, em alguns casos existem tripulantes a terminar a formação em março de 2025 porque iniciaram a sua formação no mês anterior (fevereiro) e estes períodos de formação não são representados nas tabelas.

De seguida, pode-se observar as tabelas correspondentes a cada modelo de aeronave e a função de tripulante para cada alternativa.

Alternativa A:

**TABELA 30 – SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC A**

		2025											
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez		
	Desejável	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93		
	Mínimo	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8		
	Solução	94,54	96,54	93,54	97,54	97,54	97,54	101,54	101,54	100,54	100,54		
Entradas	Início formação	2	2	1							4		
	Fim formação	2		4			4						
	Saídas		3						1				
		2026											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	93	93	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97	
	55,8	55,8	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	
	Solução	100,54	100,54	98,54	100,54	100,54	99,54	98,54	98,54	98,54	98,54	98,54	
			4										
		2	2		1	1							

**TABELA 31 – SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC A**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
	Mínimo	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2
	Solução	60,82	59,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	1	2								

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
34,2	34,2	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8
57,82	57,82	57,82	57,82	54,82	54,82	54,82	54,82	56,82	56,82	56,82	56,82
			2					2			
				3							

**TABELA 32 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC B**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
	Mínimo	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6
	Solução	65,04	62,04	62,04	58,04	58,04	54,04	54,04	51,04	51,04	51,04
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	3		4		4		3			

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
61	61	61	61	61	61	61	59	56	53	49	49
36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	35,4	33,6	31,8	29,4	29,4
51,04	50,04	48,04	47,04	47,04	47,04	47,04	47,04	47,04	47,04	47,04	47,04
1	2	1									

**TABELA 33 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC B**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
	Mínimo	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
	Solução	35,1	35,1	35,1	35,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
Entradas	Início formação	4									
	Fim formação				4						
	Saídas				2						

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
37	37	37	37	37	37	37	35	33	31	30	30
22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	21	19,8	18,6	18	18
37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
						1					

**TABELA 34 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC C**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	100	100	100	100	100	100	100	100	103	103
	Mínimo	60	60	60	60	60	60	60	60	61,8	61,8
	Solução	108,4	106,4	106,4	104,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4
Entradas	Início formação			5							
	Fim formação				5						
	Saídas	2		2							

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
103	103	103	103	103	103	103	103	103	106	106	110
61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	63,6	63,6	66
109,4	108,4	108,4	108,4	107,4	107,4	107,4	107,4	107,4	107,4	107,4	107,4
									3		
											3
1			1								

**TABELA 35 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC C**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	60	60	60	60	60	60	60	60	62	62
	Mínimo	36	36	36	36	36	36	36	36	37,2	37,2
	Solução	58,92	55,92	55,92	50,92	52,92	52,92	52,92	52,92	52,92	52,92
Entradas	Início formação	2							2		
	Fim formação				2						2
	Saídas	3		5							

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
62	62	62	62	62	62	62	62	62	64	64	66
37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	38,4	38,4	39,6
54,92	54,92	54,92	54,92	54,92	54,92	56,92	58,92	62,92	62,92	62,92	62,92
		2	2	4		2	2	4		1	
											1

**TABELA 36 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC D**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	43	47	47	50	50	50	53	53	53	53
	Mínimo	25,8	28,2	28,2	30	30	30	31,8	31,8	31,8	31,8
	Solução	40,8	40,8	40,8	43,8	43,8	48,8	51,8	55,8	55,8	57,8
Entradas	Início formação	4		8		4		2	2		
	Fim formação			4		5	3	4		2	2
	Saídas			1							

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
53	53	57	57	60	60	60	60	60	60	63	63
31,8	31,8	34,2	34,2	36	36	36	36	36	36	37,8	37,8
59,8	59,8	59,8	61,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8
2	2		2								
		2	2								

**TABELA 37 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC D**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	26	28	28	30	30	30	32	32	32	32
	Mínimo	15,6	16,8	16,8	18	18	18	19,2	19,2	19,2	19,2
	Solução	26,14	26,14	26,14	26,14	30,14	30,14	30,14	30,14	30,14	30,14
Entradas	Início formação	4									
	Fim formação				4						
	Saídas										

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
32	32	34	34	36	36	36	36	36	36	38	38
19,2	19,2	20,4	20,4	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	22,8	22,8
30,14	30,14	30,14	32,14	32,14	32,14	32,14	32,14	38,14	37,14	37,14	37,14
2		2	4	2			6				
									1		

**TABELA 38 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC E**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	33	33	33	27	27	27	24	24	24	21
	Mínimo	9,9	9,9	9,9	8,1	8,1	8,1	7,2	7,2	7,2	6,3
	Solução	26,74	25,74	21,74	19,74	19,74	19,74	19,74	18,74	14,74	14,74
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	1	4	2				1	4		

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
21	21	18	18	18	18	18	18	15	15	15	12
6,3	6,3	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	4,5	4,5	4,5	3,6
14,74	13,74	13,74	13,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	11,74
1			1								1

**TABELA 39 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC E**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	19	19	19	16	16	16	14	14	14	12
	Mínimo	5,7	5,7	5,7	4,8	4,8	4,8	4,2	4,2	4,2	3,6
	Solução	17,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	14,02	14,02
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	1							2		3

  

		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
12	12	11	11	11	11	11	11	9	9	9	7
3,6	3,6	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	3,3	2,7	2,7	2,7	2,1
11,02	9,02	9,02	8,02	7,02	7,02	7,02	7,02	7,02	5,02	4,02	4,02
2		1	1					2	1		

**TABELA 40 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC F**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	18	22	26	26	26	26	26	26	26	26
	Mínimo	10,8	13,2	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
	Solução	24,42	24,42	24,42	26,42	28,42	28,42	28,42	28,42	28,42	30,42
Entradas	Início formação	2	2					2			
	Fim formação			2	2					2	
	Saídas										

  

		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
26	26	26	26	29	29	29	29	33	33	33	33
15,6	15,6	15,6	15,6	17,4	17,4	17,4	17,4	19,8	19,8	19,8	19,8
30,42	30,42	30,42	30,42	32,42	33,42	34,42	34,42	34,42	34,42	34,42	34,42
	2	1	1								
			2	1	1						

**TABELA 41 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC F**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	11	13	15	15	15	15	15	15	15	15
	Mínimo	6,6	7,8	9	9	9	9	9	9	9	9
	Solução	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas										

  

		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
15	15	15	15	17	17	17	17	19	19	19	19
9	9	9	9	10,2	10,2	10,2	10,2	11,4	11,4	11,4	11,4
13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	14,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4
		3	1								
				1	3						

**TABELA 42 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC G**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72
	Mínimo	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2
	Solução	73,28	73,28	73,28	74,28	76,28	76,28	76,28	75,28	75,28	75,28
Entradas	Início formação	1	2						2		
	Fim formação			1	2						2
	Saídas							1			1

  

		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
72	72	72	72	72	72	72	77	77	77	77	77
43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2
76,28	76,28	76,28	78,28	77,28	77,28	78,28	78,28	78,28	78,28	78,28	78,28
2			1								
		2			1						

**TABELA 43 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC G**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40
	Mínimo	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
	Solução	39,84	37,84	37,84	38,84	38,84	38,84	40,84	40,84	40,84	40,84
Entradas	Início formação	1			2						
	Fim formação			1			2				
	Saídas	2									3

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
40	40	40	40	40	40	40	43	43	43	43	43
24	24	24	24	24	24	24	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8
37,84	37,84	37,84	37,84	37,84	37,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84
			3								
					3						

Alternativa B:

**TABELA 44 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC A**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	93	93	93	93	93	93	93	93	93	93
	Mínimo	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8	55,8
	Solução	94,54	93,54	93,54	97,54	97,54	97,54	101,54	100,54	100,54	100,54
Entradas	Início formação	2	2	1							4
	Fim formação	2		4			4				
	Saídas	3						1			

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
93	93	97	97	97	97	97	97	97	97	97	97
55,8	55,8	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2	58,2
100,54	98,54	96,54	100,54	99,54	98,54	98,54	98,54	98,54	98,54	98,54	98,54
		4									
2	2		1	1							1

**TABELA 45 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC A**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	57	57	57	57	57	57	57	57	57	57
	Mínimo	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2	34,2
	Solução	60,82	59,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82	57,82
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	1	2								

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
57	57	58	58	58	58	58	58	58	58	58	58
34,2	34,2	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8	34,8
57,82	57,82	57,82	57,82	54,82	54,82	54,82	54,82	56,82	56,82	56,82	56,82
			2					2			

**TABELA 46 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC B**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	61	61	61	61	61	61	61	61	61	61
	Mínimo	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6
	Solução	65,04	63,04	63,04	59,04	59,04	55,04	55,04	52,04	52,04	52,04
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	2		4		4		3			

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
61	61	61	61	61	61	61	59	56	53	49	49
36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	36,6	35,4	33,6	31,8	29,4	29,4
52,04	51,04	49,04	48,04	48,04	48,04	48,04	47,04	47,04	47,04	47,04	47,04
1	2	1				1					

**TABELA 47 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC B**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
	Mínimo	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2
	Solução	35,1	35,1	35,1	35,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1
Entradas	Início formação	4									
	Fim formação				4						
	Saídas				2						
		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
37	37	37	37	37	37	37	35	33	31	30	30
22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	22,2	21	19,8	18,6	18	18
37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	37,1	36,1	36,1	36,1	36,1	36,1
						1					

**TABELA 48 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC C**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	100	100	100	100	100	100	100	100	103	103
	Mínimo	60	60	60	60	60	60	60	60	61,8	61,8
	Solução	108,4	107,4	107,4	105,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4	109,4
Entradas	Início formação			4							
	Fim formação				4						
	Saídas	1		2							
		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
103	103	103	103	103	103	103	103	103	106	106	110
61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	61,8	63,6	63,6	66
109,4	108,4	108,4	108,4	107,4	107,4	107,4	106,4	106,4	106,4	107,4	107,4
								4		1	3
1			1			1					

**TABELA 49 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC C**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	60	60	60	60	60	60	60	60	62	62
	Mínimo	36	36	36	36	36	36	36	36	37,2	37,2
	Solução	59,92	57,92	57,92	51,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
Entradas	Início formação	2							2		
	Fim formação				2						2
	Saídas	2		6							
		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
62	62	62	62	62	62	62	62	62	64	64	66
37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	37,2	38,4	38,4	39,6
55,92	55,92	55,92	55,92	55,92	55,92	57,92	59,92	63,92	62,92	62,92	62,92
		2	2	4		2	2	4	1		1
									1		

**TABELA 50 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC D**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	43	47	47	50	50	50	53	53	53	53
	Mínimo	25,8	28,2	28,2	30	30	30	31,8	31,8	31,8	31,8
	Solução	40,8	40,8	40,8	43,8	43,8	48,8	51,8	55,8	55,8	57,8
Entradas	Início formação	4		8		4		2	2		
	Fim formação			4		5	3	4		2	2
	Saídas			1							
		2026									
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
53	53	57	57	60	60	60	60	60	60	63	63
31,8	31,8	34,2	34,2	36	36	36	36	36	36	37,8	37,8
59,8	59,8	59,8	61,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8	63,8
2	2										
		2	2								

**TABELA 51 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC D**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	26	28	28	30	30	30	32	32	32	32
	Mínimo	15,6	16,8	16,8	18	18	18	19,2	19,2	19,2	19,2
	Solução	26,14	26,14	26,14	26,14	30,14	30,14	30,14	30,14	30,14	30,14
Entradas	Início formação	4									
	Fim formação				4						
	Saídas										

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
32	32	34	34	36	36	36	36	36	36	38	38
19,2	19,2	20,4	20,4	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	21,6	22,8	22,8
30,14	30,14	30,14	32,14	32,14	32,14	32,14	32,14	38,14	37,14	37,14	37,14
2			4	2				6			
		2							1		

**TABELA 52 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC E**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	33	33	33	27	27	27	24	24	24	21
	Mínimo	9,9	9,9	9,9	8,1	8,1	8,1	7,2	7,2	7,2	6,3
	Solução	26,74	25,74	21,74	19,74	19,74	19,74	19,74	18,74	14,74	14,74
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	1	4	2				1	4		

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
21	21	18	18	18	18	18	18	15	15	15	12
6,3	6,3	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	5,4	4,5	4,5	4,5	3,6
14,74	13,74	13,74	13,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	12,74	11,74
1			1								1

**TABELA 53 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC E**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	19	19	19	16	16	16	14	14	14	12
	Mínimo	5,7	5,7	5,7	4,8	4,8	4,8	4,2	4,2	4,2	3,6
	Solução	17,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	14,02	14,02
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	1							2		3

  

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	19	19	19	16	16	16	14	14	14	12
	Mínimo	5,7	5,7	5,7	4,8	4,8	4,8	4,2	4,2	4,2	3,6
	Solução	17,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	16,02	14,02	14,02
Entradas	Início formação										
	Fim formação										
	Saídas	1							2		3

**TABELA 54 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC F**

		2025									
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
	Desejável	18	22	26	26	26	26	26	26	26	26
	Mínimo	10,8	13,2	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6	15,6
	Solução	24,42	24,42	24,42	26,42	28,42	28,42	28,42	28,42	28,42	30,42
Entradas	Início formação	2	2					2			
	Fim formação			2	2					2	
	Saídas										

  

2026											
jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
26	26	26	26	29	29	29	29	33	33	33	33
15,6	15,6	15,6	15,6	17,4	17,4	17,4	17,4	19,8	19,8	19,8	19,8
30,42	30,42	30,42	30,42	32,42	33,42	34,42	34,42	34,42	34,42	34,42	34,42
	2	1	1								
			2	1	1						

**TABELA 55 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC F**

		2025											
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez		
	Desejável	11	13	15	15	15	15	15	15	15	15		
	Mínimo	6,6	7,8	9	9	9	9	9	9	9	9		
	Solução	14,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	13,4		
Entradas	Início formação												
	Fim formação												
		1											
		2026											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
		15	15	15	15	17	17	17	17	19	19	19	19
		9	9	9	9	10,2	10,2	10,2	10,2	11,4	11,4	11,4	11,4
		13,4	13,4	13,4	13,4	13,4	14,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4	17,4
Entradas				3	1								
						1	3						

**TABELA 56 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA PIC G**

		2025											
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez		
	Desejável	72	72	72	72	72	72	72	72	72	72		
	Mínimo	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2		
	Solução	73,28	73,28	73,28	74,28	76,28	76,28	76,28	76,28	75,28	75,28		
Entradas	Início formação	1	2						2				
	Fim formação			1	2						2		
	Saídas							1			1		
		2026											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
		72	72	72	72	72	72	77	77	77	77	77	
		43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	43,2	46,2	46,2	46,2	46,2	46,2	
		76,28	76,28	76,28	78,28	77,28	77,28	78,28	78,28	78,28	78,28	78,28	
Entradas		2			1								
				2			1						
					1								

**TABELA 57 - SOLUÇÕES DO MODELO PLI PARA SIC G**

		2025											
		mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez		
	Desejável	40	40	40	40	40	40	40	40	40	40		
	Mínimo	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24		
	Solução	40,84	38,84	38,84	38,84	38,84	38,84	38,84	40,84	40,84	40,84		
Entradas	Início formação	1			2								
	Fim formação			1			2						
	Saídas	2		1							3		
		2026											
		jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
		40	40	40	40	40	40	43	43	43	43	43	
		24	24	24	24	24	24	25,8	25,8	25,8	25,8	25,8	
		37,84	37,84	37,84	37,84	37,84	37,84	40,84	40,84	40,84	40,84	40,84	
Entradas				3									
						3							