

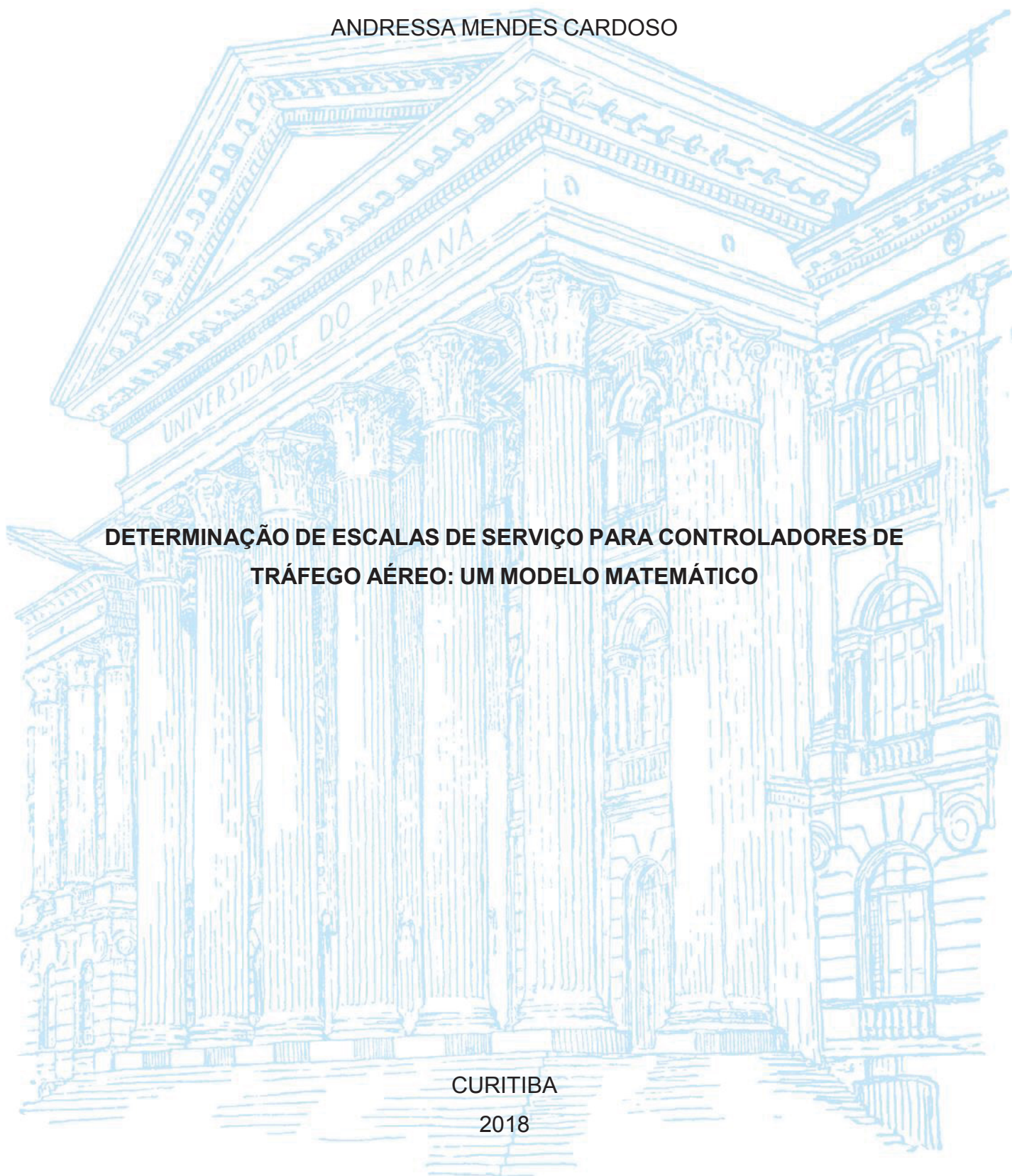
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ANDRESSA MENDES CARDOSO

**DETERMINAÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO PARA CONTROLADORES DE
TRÁFEGO AÉREO: UM MODELO MATEMÁTICO**

CURITIBA

2018



ANDRESSA MENDES CARDOSO

**DETERMINAÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO PARA CONTROLADORES DE
TRÁFEGO AÉREO: UM MODELO MATEMÁTICO**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Gestão de Suprimentos da Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Gestão de Suprimentos.

Orientador: Prof. Dr. Cassius Tadeu Scarpin

CURITIBA

2018

DETERMINAÇÃO DE ESCALAS DE SERVIÇO PARA CONTROLADORES DE TRÁFEGO AÉREO: UM MODELO MATEMÁTICO

DESIGNATION OF SCALES FOR AIR TRAFFIC CONTROLLERS: A MATHEMATICAL MODEL

Andressa Mendes Cardoso* E-mail andressa.adm@gmail.com

Cassius Tadeu Scarpin* E-mail cassiusts@gmail.com

*Grupo de Tecnologia Aplicada à Otimização (GTAO) / Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, PR

Resumo: O espaço aéreo sob responsabilidade brasileira passa dos 20.000.000Km² (vinte milhões de km²). Serviços de Tráfego Aéreo funcionam ininterruptamente para garantir a segurança de todas as aeronaves no espaço aéreo. Este artigo apresenta um modelo matemático de programação inteira desenvolvido para a designação de escalas de serviço para operadores de um Centro de Controle de Área, onde se realiza o controle de Tráfego Aéreo. A proposição deste modelo objetiva a maximização das preferências declaradas pelos Controladores, considerando as restrições obrigatórias (restrições *hard*) e as restrições opcionais ou de qualidade (restrições *soft*). Foram resolvidos problemas de tamanhos reais com aproximadamente 100 operadores, para um período de 30 dias. Obteve-se a otimalidade da solução utilizando o solver GUROBI em aproximadamente quatro minutos e meio. Os ganhos de qualidade de solução e tempo de obtenção da solução em relação a forma atual de elaboração das escalas foram significativos, mostrando a eficiência e a vantagem em utilizar o modelo proposto.

Palavras-chaves: *Timetabling*, Programação Linear, Controle de Tráfego Aéreo.

Abstract: The air space under Brazilian responsibility has 20,000,000 km² (twenty million km²). Air Traffic Services operate uninterruptedly to ensure the safety of all aircraft in the airspace. This article presents a mathematical model of linear programming developed for the designation of the schedule of service for operators of an Area Control Center, where air traffic control is performed. The proposition of this model aims at maximizing the preferences declared by the Controllers, considering the mandatory restrictions (hard constraints) and the optional or quality restrictions (soft constraints). Real-size problems were solved with approximately 100 operators for 30 days. The optimality of the solution was obtained using the GUROBI solver. The solution was obtained in approximately four and a half minutes. The solution quality gains and the time to obtain the solution compared to the current form of elaboration of the scales were significant, showing the efficiency and the advantage in using the proposed model.

Keywords: *Timetabling*, Linear Programming, Air Traffic Control.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil, com aproximadamente 8,51 milhões de km², é o quinto maior país em extensão territorial do mundo, perdendo apenas para Rússia, Canadá, China e Estados Unidos. Devido a esta realidade, o transporte aéreo vem ganhando destaque dentre as alternativas de mobilidade, pois, além de ser o mais rápido, tem expandido sua área de atuação, tornando-se possível viajar para cidades antes não atendidas por este modal. Além disso, devido a sua popularidade, os custos de operação estão sendo diluídos e o preço das passagens está consideravelmente mais acessível à população, visto que, segundo a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC), a tarifa aérea média doméstica real (atualizada pela inflação) referente ao ano de 2017 foi de R\$ 357,16 – a mais baixa da série histórica desde 2011 – e que a taxa de ocupação das aeronaves e a procura por voos domésticos aumentaram naquele ano.

Além da velocidade e do preço mais atrativo, o transporte aéreo também tem vantagens em relação ao modal rodoviário na questão segurança. Segundo o Relatório Anual de Segurança Operacional (RASO) de 2016, publicado em novembro de 2017 pela ANAC, a aviação comercial¹ brasileira está desde 2011 sem acidentes graves, sendo assim, “um dos modais de transporte mais seguro da atualidade”. Em contrapartida, segundo informações da Polícia Rodoviária Federal, somente no ano de 2017, ocorreram 89.518 acidentes com mais de 6 mil vítimas fatais. Ademais, o *National Safety Council* dos EUA realizou um estudo² para estimar a probabilidade de morte da população e a conclusão foi de que das 25 causas de morte relacionadas, acidentes de avião são as causas mais improváveis de morte entre estas, com um caso para cada 205.552, conforme Quadro 1.

QUADRO 1 - PROBABILIDADE DE MORTE POR CAUSAS SELECIONADAS

PROBABILIDADE DE MORTE POR CAUSA SELECIONADA			
Acidente de carro	1 em 102	Acidente de bicicleta	1 em 4.050
Atropelamento	1 em 561	Acidente de trem	1 em 178.741
Acidente de moto	1 em 846	Acidente de avião	1 em 205.552

FONTE: Os autores (2018) adaptado e traduzido de *National Safety Council* (2018).

¹ Aviação comercial é o segmento da aviação civil que envolve o transporte de passageiros e/ou carga por meio de companhias aéreas. Há também, na aviação civil, os segmentos da aviação privada e executiva, aviação de instrução, aviação agrícola e táxi aéreo.

² O estudo consistiu no cálculo da proporção de casos de falecimento em decorrência de cada causa em relação ao total falecimentos durante o ano de 2016 ocorridos nos EUA.

Para garantir e manter a segurança do transporte aéreo é fundamental a atuação dos profissionais de Controle de Tráfego Aéreo. Estes são encarregados de manter seguro, ordenado e rápido o tráfego de aeronaves no espaço aéreo e nos aeroportos, passando instruções e informações aos pilotos com o intuito de evitar colisões entre as aeronaves e entre aeronaves e obstáculos.

De acordo com a Instrução do Comando da Aeronáutica 100-12 (2016), a Torre de Controle de Aeródromo (TWR), o Controle de Aproximação (APP) e o Centro de Controle de Área (ACC) são os órgãos de Serviços de Tráfego Aéreo (ATS) que têm como finalidade: (a) prevenir colisões e (b) acelerar e manter ordenado o fluxo de tráfego aéreo, controlando as aeronaves nas diversas fases do voo.

O serviço de controle de área é exercido exclusivamente por militares em quatro Centros Integrados de Defesa Aérea e Controle de Tráfego Aéreo (CINDACTA) localizados em Brasília, Curitiba, Recife e Manaus. Juntos são responsáveis pelo controle de todo espaço aéreo brasileiro³. Um Controlador de Tráfego Aéreo (ATCO) consegue controlar uma quantidade limitada de aeronaves ao mesmo tempo. Devido a isso, o espaço aéreo sob jurisdição de cada ACC é dividido em setores. Estes setores podem ser agrupados na medida em que a quantidade de tráfego diminui ou separados quando esta quantidade aumenta e atinge o número “N”⁴.

Como o serviço de controle de tráfego aéreo em ACC é ininterrupto, torna-se inevitável o trabalho em regime de escala, distribuídos em turnos. Frequentemente os operadores são designados em turnos alternados durante a semana, não tendo uma rotina fixa de horário de trabalho. Em decorrência dessa especificidade, alguns não conseguem estabelecer atividades paralelas ao trabalho, pois, além de jornadas noturnas, trabalhar em feriados e finais de semana é comum para estes profissionais.

Ao serem submetidos a esse sistema de horários, de acordo com Marcolino *et al.* (2015, p. 400), Controladores de Tráfego Aéreo podem sofrer alterações referente à “qualidade do sono, sonolência durante o turno, fadiga, estresse,

³ O espaço aéreo sob responsabilidade brasileira ultrapassa as fronteiras territoriais e se estende por parte significativa do Oceano Atlântico, perfazendo um total de 22 milhões de km² sobre terra e mar (DECEA)

⁴ Número (ou fator) “N” é o número máximo de aeronaves que podem ser controladas simultaneamente em um setor em um determinado período de tempo sem que haja sobrecarga de trabalho para o ATCO. O cálculo deste fator leva em consideração o tempo médio de permanência da aeronave no setor, o tempo médio de comunicação com a aeronave, o tempo médio despendido pelo controlador com outras tarefas, dentre outros fatores relevantes (MCA 100-17/2014).

alterações de humor e diminuição no estado de alerta e vigilância”, sintomas estes associados à alteração no ritmo circadiano⁵.

Ademais, a Lei 11.320/2006, alterada pela Lei 12.243/2010, estabelece que o efetivo do Comando da Aeronáutica deve limitar-se à 80.937 militares, distribuídos nas quase 300 unidades, destarte, com a crescente demanda por serviços das Forças Armadas, seus profissionais tem o desafio de fazer cada vez mais atividades com menos pessoal. Neste sentido, do ponto de vista da gestão de suprimentos, existe a necessidade de aprimoramento no gerenciamento dos seus serviços, de forma a melhorar os processos, conseguindo uma alocação mais eficiente da sua força de trabalho.

Assim, este estudo reconhece a importância daqueles que vigiam permanentemente o espaço aéreo brasileiro e entende que as escalas de serviço dos controladores de tráfego aéreo, se aprimoradas, podem melhorar as condições de trabalho e de vida desses profissionais. Para atender tal propósito este artigo propõe um modelo matemático de programação linear binária para otimizar a determinação das escalas de serviço dos Controladores de Tráfego Aéreo, atendendo às restrições operacionais e às preferências declaradas dos operadores.

O modelo é composto por 21000 variáveis binárias, as quais representam a designação dos 100 operadores nos diversos turnos de serviços existentes no mês de referência (7 turnos por dia), possui 19 conjuntos de restrições, sendo que destas, 18 são restrições do tipo *hard*, isto é, devem ser satisfeitas obrigatoriamente e uma restrição, inserida na Função Objetivo, é do tipo *soft*, devendo ser atendida na medida do possível (atendimento das preferências declaradas pelos operadores). Este modelo apresentado é uma alternativa aos modelos apresentados por Josefsson *et al.* (2017) e Tello *et al.* (2018), no melhor do nosso conhecimento. Assim, tem-se como contribuição para a literatura a abordagem proposta neste trabalho para este problema que é importante em qualquer país do mundo que possua controle de tráfego aéreo.

Para tanto, o artigo é organizado da seguinte maneira. Na Seção 2 há uma breve revisão de literatura, seguida, na Seção 3, pelo detalhamento da metodologia utilizada na pesquisa. Na Seção 4 define-se o problema da designação de escalas e

⁵ Ritmos ou ciclos circadianos são ritmos endógenos de aproximadamente 24 horas ($24 \pm 4h$) que regulam a maioria, se não todos, os principais sistemas fisiológicos em mamíferos. (TOUITOU *et al.*, 2017).

apresenta-se o modelo matemático. A Seção 5 apresenta os parâmetros utilizados e os resultados obtidos e, por fim, na última seção, são feitas considerações sobre o trabalho realizado e sugestões de estudos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nas últimas décadas, vem crescendo o número de pesquisas com o intuito de melhorar a alocação de profissionais em horários de trabalho conforme a demanda, tendo em vista os altos custos de mão-de-obra. Desta forma, qualquer redução, por menor que seja em termos percentuais, pode significar uma grande economia para os empregadores (BERGH *et al.* 2012). Nesta seção, são apresentados alguns conceitos relativos à alocação de horários a profissionais e quais métodos têm sido utilizados para a resolução desse tipo de problema.

O *Timetabling Problem* é um problema tratado na Pesquisa Operacional que versa sobre a alocação de horário de trabalho a funcionários. Problemas deste tipo podem ser resolvidos com diversas metodologias, tais como métodos exatos, com modelos de programação linear, inteira e binária; métodos heurísticos e metaheurísticos, que encontram uma solução não necessariamente ótima, mas ao menos uma solução factível (BERGH *et al.* 2012).

No estudo realizado por Conniss (2015) são indicadas as aplicações mais comuns do problema de alocação de pessoal. Dentre elas, podemos citar os serviços da área da saúde, centrais telefônicas, grade horária de transportes e serviços industriais. Encontraram-se também, nos estudos realizados por Ribeiro (2012), aplicações em competições esportivas.

Bergh *et al.* (2012) complementa que nas últimas décadas, as empresas estão considerando cada vez mais as preferências dos seus empregados em vários aspectos relacionados ao trabalho, de maneira a satisfazer sua vontade e permitir que eles gerenciem sua vida pessoal de maneira mais flexível.

Rangel e Évora (2007) desenvolveram um software para a elaboração da escala periódica de trabalho de enfermeiros, chamado “Sistema de Distribuição Mensal de Pessoal de Enfermagem”. O sistema tem como base um modelo matemático que considera os requisitos funcionais, tais como a Consolidação das Leis Trabalhistas e as necessidades de cada funcionário. Para facilitar a utilização por parte da equipe de enfermagem, o Software, desenvolvido para uma plataforma

na nuvem, gera um arquivo com as restrições do problema. Este deve ser exportado para o software LINGO para resolução das restrições e a identificação da melhor solução. O resultado deverá ser importado novamente ao Sistema para a leitura tradicional da escala por parte da equipe de enfermagem.

Ribeiro (2012), apresentou uma breve revisão sobre aplicações do *scheduling problem* para competições esportivas profissionais de futebol, basquete, *cricket*, basebol e *hockey*, cujo objetivo consiste em determinar o dia em que cada jogo de um determinado campeonato será realizado de forma a maximizar as receitas advindas dos direitos de transmissão das emissoras de televisão. Na formulação dos modelos, também podem ser considerados outros objetivos, tais como minimizar quebras de sequência, minimizar distâncias viajadas e minimizar efeitos das viagens nos atletas, de forma a balancear os esforços durante o campeonato. Apresenta também um estudo de caso descrevendo com mais detalhes o modelo de programação inteira desenvolvido para a programação anual da primeira divisão do Campeonato Brasileiro de Futebol.

Fressato et al (2017) propuseram um modelo matemático para a alocação de médicos anestesistas no Hospital de Clínicas da Universidade Federal do Paraná. No modelo, consideraram as preferências dos profissionais e buscaram criar uma repetição semanal dos procedimentos. Este modelo foi desenvolvido a partir da adaptação de outros trabalhos similares encontrados na literatura e resolvido pelo *software* Gurobi. Foram consideradas restrições *hard*, referente à legislação trabalhistas; e restrições *soft*, visando adequar-se às decisões operacionais do hospital e melhorar a qualidade da solução. As restrições *soft* referentes aos custos de alocação de profissionais e preferências individuais de alocação foram inseridas na função objetivo do modelo com pesos distintos referentes à importância de cada uma delas. A solução obtida pelo modelo reduziu os custos de operação e o tempo gasto com o planejamento da escala de trabalho.

Josefsson *et al.* (2017) utilizaram Programação Linear Inteira Mista para a designação de ATCO para uma torre remota de controle (RTC) na Suécia. Como dados de entrada do modelo foi utilizada a programação de voos dos aeroportos para um dia, trataram a informação traduzindo os dados de decolagens, pousos em um número de “movimentos” e obtiveram como resultado, a designação ótima por hora de operadores para a RTC, considerando diversas restrições de operação, tais como as quantidades máximas de aeroportos, de movimentos atendidos por controlador, o

tempo máximo “na posição de controle”, dentre outras. Com o intuito de criar um modelo ajustável às necessidades de Torres Remotas de Controle, criaram algumas alternativas de objetos para o modelo, quais sejam: (a) minimizar o número de controladores por RTC; (b) minimizar o número médio de ATCO por aeroporto; (c) minimizar alterações nas designações de aeroportos para controladores. O modelo foi testado para a operação de 5 aeroportos simultaneamente pela RTC com os três tipos de objetivos criados em dois dias do ano, o de maior e o de menor quantidade de movimentos registrados. Como resultado, para atender os cinco aeroportos no dia de maior número de movimentos, foi observada a possibilidade de economia de pessoal de 42 a 55%.

Tello *et al.* (2018) propõem uma elaboração das escalas de serviço ATCO em um centro de controle de área na Espanha através de uma metodologia de três fases, na qual, primeiramente uma heurística é utilizada para gerar soluções iniciais infactíveis, tendo em vista a violação de algumas restrições referente a condições de trabalho e a utilização de mais operadores do que o realmente disponíveis. Na sequência, um *multiple independent run (MIR)* algoritmo baseado em *simulated annealing (SA)* é aplicado nas soluções iniciais encontradas na primeira fase, de modo a torná-las soluções factíveis. Para que isto seja feito, é aplicada uma *fitness function* para tentar reduzir o número de operadores até que se atinja a quantidade disponível, ao passo em que as condições de trabalho violadas são penalizadas. Por fim, a terceira fase conta com uma nova aplicação do MIR baseado em SA.

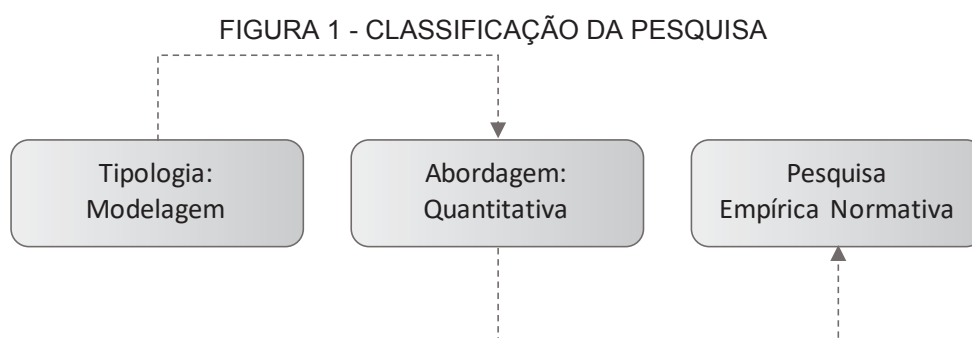
No trabalho de Hulst *et al.* (2017) é apresentado um problema de alocação de pessoas, mas pode-se verificar a utilização de uma técnica de otimização robusta para a geração de turnos de trabalho em um Centro de Controle de Área. Este trabalho pode complementar trabalhos sobre alocação de ATCO a órgãos ATS. O modelo considera incertezas da carga de trabalho e objetiva reduzir a sobrecarga e a subutilização dos operadores escalados em cada turno. O trabalho considera também os custos da criação de turnos, da utilização de diferentes turnos, da sobrecarga e da subutilização dos operadores e verifica que, mesmo que o custo relacionado aos turnos de trabalho seja maior do que os demais, ainda assim os custos totais são menores em comparação aos cenários em que há demasiada sobrecarga ou subutilização dos operadores, em decorrência da estimada bastante incorreta de carga de trabalho e da criação manual de turnos.

3 METODOLOGIA

Esta seção aborda os aspectos metodológicos do estudo, apresentando a classificação, conforme ilustrado na Figura 1, e as etapas da pesquisa.

Este artigo conta com uma pesquisa de modelagem, que, segundo Miguel et al (2012) busca representar a realidade para auxiliar o tratamento da situação de uma maneira sistemática, permitindo a manipulação das variáveis e a identificação de soluções para problemas do mundo real.

Modelos matemáticos como o aqui apresentado são, evidentemente, modelos quantitativos que, através da linguagem matemática, representam a realidade de maneira abstrata e, por meio da utilização de técnicas analíticas, servem para calcular valores numéricos das propriedades do sistema em questão (MIGUEL et al, 2012).



FONTE: Os autores (2018) baseado em Miguel et al (2012).

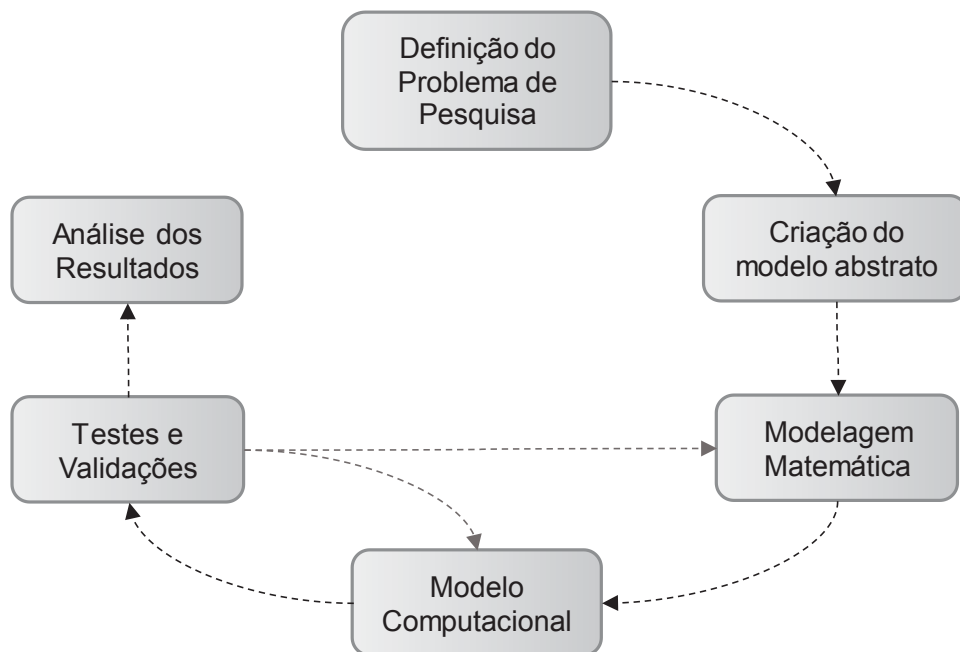
Neste sentido, buscou-se traduzir a dinâmica das escalas de serviço dos ATCO em um modelo matemático, identificando seu funcionamento e as restrições e variáveis envolvidas e, deste modo, solucionar o problema desta pesquisa determinando, da melhor maneira possível, as escalas de serviço dos operadores com base nas preferências declaradas.

Assim, percebe-se que o estudo consiste em uma pesquisa empírica normativa que, de acordo com Miguel et al (2012), busca desenvolver estratégias que melhorem a situação corrente, prescrevendo uma solução para o problema avaliado.

Para tanto, a pesquisa foi conduzida segundo as etapas descritas a seguir e representadas na Figura 2.

A primeira etapa do estudo consistiu na definição do problema de pesquisa, que levou em consideração os conhecimentos, anseios e preferência da autora⁶. De fato, a pesquisa buscou responder o seguinte questionamento: Como otimizar a determinação das escalas de serviço dos ATCO, atendendo às restrições e às preferências declaradas?

FIGURA 2 - DESENHOS DAS ETAPAS DA PESQUISA



FONTE: Os autores (2018).

Para a construção do modelo, foi necessário considerar toda a dinâmica do sistema a ser modelado, de forma a possibilitar uma tradução mais efetiva em expressões matemáticas. O modelo matemático foi então programado; testes e validações foram feitos a fim de verificar sua correção e a adequação dos resultados. Por fim, os resultados foram analisados para a conclusão do estudo.

⁶ Durante o período em que trabalhou na Aeronáutica, foi responsável pela coordenação geral das escalas de serviço da unidade e pela confecção de uma escala específica, cujas designações eram feitas manualmente devido ao desconhecimento, na época, da possibilidade de aplicação da Pesquisa Operacional nos procedimentos sob sua responsabilidade.

4 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA E O MODELO

O órgão de controle estudado possui em torno de 100 operadores⁷ para suprir as demandas nos diversos turnos de trabalho que, além de serviços operacionais de controle de tráfego aéreo, contemplam também turnos de atividades administrativas, conforme pode-se verificar no Quadro 2.

QUADRO 2 - RELAÇÃO DE TURNOS E ESPECIFICAÇÕES

TURNOS	CARGA HORÁRIA	CARACTERÍSTICA
1 Controle Manhã	7h	Controle de Tráfego Aéreo
2 Manhã Adm.	8h	Serviço Administrativo
3 Controle Tarde	7h	Controle de Tráfego Aéreo
4 Tarde Adm.	8h	Serviço Administrativo
5 Reforço Tarde	8h30	Reforço de Controle
6 Controle Pernoite	10h	Controle de Tráfego Aéreo
7 Pernoite Adm.	8h	Serviço Administrativo

FONTE: Os autores (2018).

Em função da peculiaridade da atividade desenvolvida pelo órgão, seu funcionamento é ininterrupto. Desta forma, em um mês com 30 dias, por exemplo, há 210 turnos de trabalho. Cada turno, entretanto, tem uma demanda por operadores, o que eleva a conta para um total de 2130 alocações a serem definidas (as demandas variam em função dos turnos, por exemplo apenas 1 operador é necessário para cada um dos turnos 2, 4 e 7, entretanto, para o turno 1 são necessários 25 operadores por dia).

Apesar deste padrão de demandas, a escala não é fixa, havendo a necessidade de confeccionar mensalmente uma nova tabela de designações levando em consideração as restrições operacionais e as eventuais indisponibilidades dos operadores. Esta atividade é bastante complexa, demorada e exige dedicação de uma equipe de profissionais com experiência e conhecimento empírico. Neste sentido, o modelo de programação linear desenvolvido neste trabalho almeja tornar a atividade de designação de operadores um trabalho mais simples, rápido e mecanizado.

⁷ Operador é o profissional que possui habilitação para o a operação de Controle de Tráfego Aéreo. Existem também os Instrutores e os Supervisores, mas este trabalho foi desenvolvido apenas levando em consideração a designação de operadores, tendo em vista ser a maior e mais trabalhosa.

A seguir, apresenta-se, nos Quadros 3, 4 e 5, a definição de índices, parâmetros e variáveis do modelo.

QUADRO 3 - ÍNDICES DO MODELO

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
i	conjunto de operadores
d	conjunto que compreende o número de dias no mês
t	conjunto de turnos de trabalho diários

FONTE: Os autores (2018).

QUADRO 4 - PARÂMETROS DO MODELO

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
p_{idt}	preferência do operador i pelo turno t do dia d
A_i	peso do operador i
Dem_t	demanda de operadores no turno t
CH_t	carga horária do turno t
$MinS$	número mínimo de serviços
$MaxS$	número máximo de serviços
$MaxEC$	número máximo de etapas cheias
$DifEC$	diferença aceitável entre somatório de turno de etapa cheias entre operadores
$CHmin$	carga horária mínima mensal
$CHmax$	carga horária máxima mensal
$MaxAdm$	número máximo de serviços administrativos por mês
$DifMT$	diferença aceitável entre o somatório de turnos manhã e tarde para cada operador

FONTE: Os autores (2018).

QUADRO 5 - VARIÁVEIS DO MODELO

SÍMBOLO	DEFINIÇÃO
x_{idt}	Variável binária que indica a designação do operador i para o turno t do dia d

FONTE: Os autores (2018).

O modelo utilizado neste trabalho é descrito a seguir.

$$MaxZ = \sum A_i \sum \sum p_{idt} \times x_{idt} \quad (01)$$

sujeito a:

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T x_{idt} \geq MinS \quad \forall i \quad (02)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T x_{idt} \leq MaxS \forall i \quad (03)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T CH_t \times x_{idt} \geq CHmin \forall i \quad (04)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=1}^T CH_t \times x_{idt} \leq CHmax \forall i \quad (05)$$

$$\sum_{d=1}^D x_{id1} - \sum_{d=1}^D x_{id3} \leq DifMT \forall i \quad (06)$$

$$\sum_{d=1}^D x_{id1} - \sum_{d=1}^D x_{id3} \geq -DifMT \forall i \quad (07)$$

$$\sum_{d=1}^D x_{id2} + x_{id4} + x_{id7} \leq MaxAdm \forall i \quad (08)$$

$$\sum_d^{d+6} \sum_{t=1}^7 x_{idt} \geq 1 \forall i \quad (09)$$

$$\sum_d^{d+6} \sum_{t=1}^7 x_{idt} \leq 6 \forall i \quad (10)$$

$$\sum_{t=1}^5 x_{idt} \leq 1 \forall i, \forall d \quad (11)$$

$$\sum_{t=2}^7 x_{idt} \leq 1 \forall i, \forall d \quad (12)$$

$$\sum_{t=4}^7 x_{i(d-1)t} + \sum_{t=1}^2 x_{idt} \leq 1 \forall i, \forall d \quad (13)$$

$$\sum_{t=6}^7 x_{i(d-1)t} + \sum_{t=1}^5 x_{idt} \leq 1 \forall i, \forall d \quad (14)$$

$$\sum_{t=6}^7 x_{i(d-1)t} + \sum_{t=6}^7 x_{idt} \leq 1 \forall i, \forall d \quad (15)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=5}^6 x_{idt} \leq MaxEC \forall i \quad (16)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=5}^6 x_{idt} - \sum_{d=1}^D \sum_{t=5}^6 x_{i'dt} = 0 \quad \forall i, \forall i', \quad i \neq i' \quad (17)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{idt} = Dem_t \quad \forall d, \forall j/3,5 \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^I x_{id3} + \sum_{i=1}^I x_{id5} = Dem_3(\text{Controle Tarde}) \quad \forall d \quad (19)$$

$$x_{idt} = \{0,1\} \quad i = 1, 2, \dots, I, \quad d = 1, 2, \dots, D, \quad t = 1, 2, \dots, 7 \quad (20)$$

Este problema de Programação Inteira tem como Função Objetivo a expressão (1) que busca maximizar a preferência dos operadores pelos turnos designados levando também em consideração o peso⁸ que o operador tem perante os demais, de forma a atender, prioritariamente, às preferências dos operadores de maior peso em detrimento das demais. Cada operador pode atribuir à preferência os valores 1 quando há interesse pela designação naquele turno, -1 quando não há e 0 em caso de indiferença.

O conjunto de restrições (2) e (3) garantem que cada operador será designado para uma quantidade mínima de serviços por mês, não podendo ultrapassar, porém, uma quantidade máxima. Esses valores podem ser ajustados em função da disponibilidade de cada operador que eventualmente participe de alguma atividade que o impeça de ser designado para a mesma quantidade que os demais.

As restrições (4) e (5) restringem a carga horária total trabalhada por operadores a uma faixa em CH_{min} e CH_{max} . Existem regulamentos que determinam o limite de horas trabalhadas para Controladores de Tráfego Aéreo em cada tipo de ATS. Entretanto esse valor também pode ser reduzido nas mesmas condições do conjunto de restrições anteriores.

As expressões (6) e (7) servem para que haja um equilíbrio entre a quantidade total de turnos 1 (Controle Manhã) e a quantidade total de turnos 3 (Controle Tarde), de modo que a diferença entre eles seja de no máximo esse valor.

⁸ Dentro da estrutura das Forças Armadas, um conceito chamado antiguidade, que é a ordenação de todos os militares dentro de cada posto (para Oficiais) ou graduação (para Graduados) conforme a hierarquia. Para fins de adequação ao modelo, dentre 100 os militares participantes da escala, ao militar mais antigo (de maior grau hierárquico) será atribuído o maior peso (100), atribuindo-se, na sequência, uma unidade de peso a menos para cada militar de modo que ao mais moderno (o de menor grau hierárquico) será atribuído peso 1.

A restrição (8) garante que cada operador seja designado para no máximo uma quantidade *MaxAdm* de serviços Administrativos por mês, tendo em vista que as escalas de Controle de Tráfego Aéreo são as atribuições fundamentais dos operadores.

O conjunto de restrições (9) e (10) servem para garantir que, em um período de 7 dias corridos, cada operador trabalhe em, no mínimo, um turno e, no máximo, em 7, garantindo folgas mínimas e máximas regulamentares.

As restrições (11) a (14) garantem um descanso obrigatório para operadores designados para cada tipo de turno. Para aqueles designados para o primeiro turno (Controle Manhã) fica proibido trabalhar no mesmo dia, exceto nos dois últimos turnos (Pernoite e Pernoite Adm.). Aqueles designados para o segundo turno (Manhã Adm.) somente podem ser designados novamente para algum turno a partir do dia seguinte. O turno quatro (Tarde Adm.), por terminar às 22 horas, indisponibiliza o operador para o trabalho noturno e para a manhã do dia seguinte e, por fim, aqueles designados para o sexto turno (Controle Pernoite) devem ter um dia inteiro de folga, somente podendo trabalhar novamente na manhã do dia seguinte àquele em que saíram de serviço. O turno 3 (Controle Tarde) está incluído na restrição (12), o turno 5 (Reforço Tarde) na restrição (13) e o turno 7 (Pernoite Adm.) na restrição (14). A expressão (15) complementa a restrição (14), determinando que não é permitido trabalhar dois dias consecutivos em pernoite, independente de ser Controle Pernoite ou Pernoite Adm.

Para aqueles operadores designados para os turnos 5 e 6 (Reforço Tarde e Controle Pernoite) é pago um benefício chamado Etapa Cheia. Com o intuito de limitar a quantidade de turnos deste tipo por operador, a restrição (16) limita esta designação a uma quantidade *MaxEC*.

Existe uma regra interna que determina que todos os operadores trabalhem o mesmo número de vezes em turnos que gerem o pagamento da Etapa Cheia. Esta restrição pode ser verificada na expressão (17). Entretanto, pode haver casos em que não é possível que a quantidade seja exatamente igual para todos os operadores. Neste caso, a restrição (17) pode ser substituída pelo conjunto de restrições (17.1) e (17.2), que determina que o número total de designações de turnos deste tipo para cada operador pode ter uma variação definida por *DifEC*.

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=5}^6 x_{idt} - \sum_{d=1}^D \sum_{t=5}^6 x_{i'dt} \geq -DifEC \quad \forall i, \forall i', \quad i \neq i' \quad (17.1)$$

$$\sum_{d=1}^D \sum_{t=5}^6 x_{idt} - \sum_{d=1}^D \sum_{t=5}^6 x_{i'dt} \leq DifEC \quad \forall i, \forall i', \quad i \neq i' \quad (17.2)$$

Por fim, há o conjunto de restrições (18) e (19) que estipulam a demanda por operadores em cada tipo de turno. A expressão (19), em especial, serve para distribuir entre os turnos 3 (Controle Tarde) e 5 (Reforço Tarde) os operadores designados para suprir a demanda de Controladores de Tráfego Aéreo no período da tarde, não havendo, porém, uma demanda específica para o quinto turno.

5 RESULTADOS

Os parâmetros utilizados para a instância de validação foram os relacionados no Quadro 6. Estes valores são as informações de referência da escala praticada no órgão estudado neste artigo. As preferências declaradas, porém, foram definidas de maneira pseudoaleatória, tendo em vista a inacessibilidade das informações reais. Para cada operador, foram distribuídos cerca de 20% de preferências do tipo “1”, 10% do tipo “-1” e o restante do tipo “0”.

QUADRO 6 - ÍNDICES E PARÂMETROS UTILIZADOS PARA VALIDAÇÃO DO MODELO

ÍNDICES PARÂMETROS E VALOR DE REFERÊNCIA	
i	{1, 2, ..., 100}
d	{1, 2, ..., 30}
t	{1, 2, ..., 7}
D_1	25
D_2, D_4 e D_7	1
D_3	30
D_6	13
$MinS$	21
$MaxS$	22
$MaxEC$	10
$CHmin$	120
$CHmax$	170
$MaxAdm$	1
$DifMT$	4

FONTE: Os autores (2018).

O modelo proposto foi resolvido com o *solver* GUROBI 7.5.2. Para a execução, foi utilizado um computador com processador Inter Core i7 e 8GB de memória RAM. O modelo foi validado, demonstrando correção e adequação com a realidade da escala estudada. Ademais, as consequências operacionais dos resultados computacionais foram consideradas excelentes, tendo em vista a obtenção da solução do problema na sua otimalidade em torno de quatro minutos e meio.

Mesmo com o tempo de adequação dos parâmetros para a realidade de cada mês, o tempo dedicado à determinação das escalas de serviço aos operadores ainda é consideravelmente menor do que o demandado para a confecção da escala de forma manual (cerca de 2 a 3 dias de trabalho dedicados à compilação das indisponibilidades dos profissionais e para confecção e conferência da escala).

Além da questão da velocidade da obtenção da solução, destaca-se a efetividade do modelo no atendimento das preferências declaradas pelos operadores, conforme pode ser verificado no extrato da solução disponível no quadro 7. Nota-se que dentre os operadores com maior peso, nenhuma “não preferênciam” foi violada e apenas algumas “indiferenças” foram atribuídas a eles, enquanto que para aqueles operadores de menor peso, houve a violação de algumas “não-preferências” e um sutil aumento na designação de escalas declaradas com “indiferença” pelos operadores.

QUADRO 7 - EXTRATO DA SOLUÇÃO

PESO DO OPERADOR	Nº DE PREFERÊNCIAS ATENDIDAS	Nº DE INDIFERENÇAS DESIGNADAS	Nº DE NÃO-PREFERÊNCIAS VIOLADAS	TOTAL DE SERVIÇOS
100	16	5	0	21
99	16	5	0	21
98	20	1	0	21
97	17	4	0	21
96	16	6	0	22
5	13	9	0	22
4	12	9	0	21
3	13	8	0	21
2	12	8	1	21
1	13	6	2	21

FONTE: Os autores (2018).

6 CONCLUSÃO

Neste trabalho, propôs-se um modelo matemático para a designação de escalas de serviço para Controladores de Tráfego Aéreo de um Centro de Controle

de Área que busca maximizar o atendimento das preferências declaradas pelos profissionais visando possibilitar uma melhor programação pessoal para a realização de atividades fora do âmbito profissional (por exemplo frequentar um curso, academia, etc.).

Os resultados obtidos após a resolução do modelo matemático demonstraram a efetividade da utilização deste para a designação das escalas de serviço, tanto pela redução do tempo despendido na confecção da escala como, principalmente, pela otimização do atendimento das preferências declaradas pelos operadores, benefício este que não é considerado na configuração atual da escala que avalia apenas indisponibilidades profissionais para o exercício da função.

Além disso, o modelo demonstrou viabilidade para a resolução de problemas do mundo real, tendo em vista que os parâmetros utilizados seguem os valores de referência daqueles efetivamente praticados no órgão estudado (número de operadores, quantidade de turnos, carga horária mínima e máxima). Ademais, o modelo pode ser adaptado para realidades existentes em outros órgãos de controle, assim como Controles de Aproximação, Torres de Controle.

Para trabalhos futuros, sugere-se um termo de cooperação entre os pesquisadores e o Centro de Controle de Área, para facilitar o acesso aos dados de entrada e para a identificação de necessidades de melhoria no modelo, tais como o cálculo da demanda efetiva para cada turno, tendo em vista que atualmente a demanda por operadores nos turnos é estimada sem fazer distinção entre dias de semana e dias do mês – por exemplo, nos finais de semana, em que o movimento de aeronaves é maior, a demanda por ATCO em um turno é o mesmo que a demanda para aquele turno em uma quarta-feira.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE AVIAÇÃO CIVIL (ANAC). **Relatório Anual de Segurança Operacional**, 2017. Disponível em: <http://www.anac.gov.br/assuntos/paginas-tematicas/gerenciamento-da-seguranca-operacional/arquivos/raso_2016.pdf>. Acesso em: 01 ago. 2018.

BERGH, J.V., BELIEN, J., BRUECKER, P., DEMEULEMEESTER, E., BOECK, L. Personnel Scheduling: A Literature Review. **European Journal of Operational Research**, v. 226, p. 367-385, maio 2013.

BRASIL. Lei nº 11.320, de 06 de julho de 2006. Fixa os efetivos do Comando da Aeronáutica em tempo de paz e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 22 nov. 2013.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **ANAC divulga levantamento do preço das passagens aéreas**. Disponível em: <<http://www.cnt.org.br/imprensa/noticia/anac-levantamento-passagens-aereas>> Acesso em: 01 ago. 2018.

CONNIS, R., A survey on constructing rosters for air traffic controllers. **7th International Conference on Intelligent Networking and Collaborative Systems**, 2-4 September 2015, Tamkang University, Taipei, TAIWAN, IEEE.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). Capacidade de Setor ATC. **Manual do Comando da Aeronáutica (MCA) 100-17**, Rio de Janeiro, 2014.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). Regras do Ar. **Instrução do Comando da Aeronáutica (ICA) 100-12**, Rio de Janeiro, 2016.

FRESSATO, A. A., LOCH, G. V., SOUZA, A. S., PÉCOR, J. E. J. Modelo Matemático para a escala de trabalho de anestesistas do Hospital Universitário da UFPR. **XXXVIII Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia**, Florianópolis, 5-8 de novembro, 2017.

HULST, D. VAN, HERTO, D. DEN, NUIJTEN, W. Robust shift generation in workforce planning. **Computational Management Science**, v. 14, p. 115-134, 2017.

JOSEFSSON, B., POLISHCHUK, T., POLISHCHUK, V., SCHMIDT, C. Scheduling Air Traffic Controllers at a Remote Tower Center. **36th Digital Avionics Systems Conference**, 2017.

MARCOLINO, A.V., SIQUEIRA, J.C.F., BARROSO, B.I.L. Efeitos do trabalho em turnos nos controladores de tráfego aéreo: uma revisão sistemática baseada no método PRISMA. **Cadernos de Terapia Ocupacional da UFSCar**, v. 23, n. 2, p. 393-402, 2015.

MIGUEL, P.A.C. (coord.) **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. Rio de Janeiro: Elsevier: ABEPRO, 2012

NATIONAL SAFETY COUNCIL. Odds of Dying – Injury Facts. Disponível em: <<https://injuryfacts.nsc.org/all-injuries/preventable-death-overview/odds-of-dying/>>. Acesso em: 04 jul. 2018.

POLÍCIA RODOVIÁRIA FEDERAL (PRF). Acidentes – PRF. Disponível em: <<https://www.prf.gov.br/porta/dados-abertos/acidentes>> Acesso em: 01 ago. 2018.

DEPARTAMENTO DE CONTROLE DO ESPAÇO AÉREO (DECEA). Quem Somos: Espaço Aéreo Brasileiro. Disponível em: <<https://www.decea.gov.br/?i=quem-somos&p=espaco-aereo-brasileiro>>. Acesso em: 29 mar. 2018.

RANGEL, A. L., ÉVORA, Y. D. M. Elaboração automática da escala periódica de trabalho dos profissionais de enfermagem por meio de um software específico. **Revista Eletrônica de Enfermagem**, v. 9, n. 1, p. 17-30, 2007.

RIBEIRO, C.C. Sports Scheduling: problems and applications. **International Transaction in Operational Research**, n. 19, p. 201-226, 2012.

TELLO, F., MATEOS, A., JIMÉNEZ-MARTÍNS, A., SUÁREZ, A. The Air Traffic Controller work-shift scheduling problem in Spain from a Multiobjective Perspective: a Metaheuristic and regular Expression-based approach. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2018, p. 1-15, 2018

TOUITOU, Y., REINBERG, A., TOUITOU, D. Association between light and night, melatonin secretion, sleep deprivation, and the internal clock: Health impacts and mechanisms of circadian disruption. **Life Sciences**, v. 173, p. 94-106 mar. 2017.