



# ConBRepro

XIV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

## I CIGELUBRA

Congresso Internacional de Gestão e Engenharia Luso-Brasileiro

04 a 06 de dezembro de 2024

## Energias Limpas nas Engenharias

### Abordagem de programação por metas para solucionar um problema de reagendamento de voos em uma companhia de petróleo e gás natural

**Tarley Mansur Fantazzini**

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos

**Thiago Vieira**

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos

**Reinaldo Morabito**

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos

**Pedro Munari**

Departamento de Engenharia de Produção – Universidade Federal de São Carlos

**Resumo:** Neste trabalho aborda-se o problema de recuperação de aeronaves enfrentado por uma empresa brasileira de petróleo e gás natural durante as suas operações *offshore*. Esse problema envolve a contratação de helicópteros terceirizados para transportar, em sua maioria, os funcionários da petroleira, de um aeroporto para unidades marítimas. Os voos realizados estão sujeitos a interrupções indesejadas e podem exigir reprogramação. Para auxiliar na tomada de decisões em tais situações, introduzimos um modelo de programação linear inteira (ILP) em tempo discreto que considera atributos específicos da empresa, incluindo uma função objetivo lexicográfica que prioriza: (i) a redução de transferências de voos para o dia seguinte; (ii) a redução da utilização de helicópteros; e (iii) a redução dos atrasos dos voos do dia. São desenvolvidas duas abordagens de solução diferentes utilizando programação por metas hierárquicas, com base no modelo proposto. Experimentos demonstram que as abordagens propostas podem fornecer soluções eficazes para a maioria das instâncias, utilizando um solver comercial ILP dentro de tempos de computação aceitáveis.

**Palavras-chave:** Problema de recuperação de aeronaves, voos de helicópteros, programação de metas.

### Goal programming approach to solve a helicopter flight rescheduling problem for an oil and gas company

**Abstract:** We tackle the aircraft recovery problem encountered by a Brazilian oil and gas company during its offshore operations. This issue involves contracting helicopters from an external provider to transport personnel from an airport to maritime units. The flights are often subject to disruptions, necessitating potential rescheduling. To facilitate decision-making in these scenarios, we propose a discrete-time integer linear programming (ILP) model that incorporates company-specific characteristics. This model features a lexicographic objective function prioritizing: (i) minimizing flight transfers to the following day; (ii) reducing helicopter utilization; and (iii) decreasing same-day flight delays. We develop two distinct solution approaches utilizing hierarchical goal programming based on the proposed model. Computational experiments demonstrate that our approaches can deliver

effective solutions for the majority of cases using a general-purpose ILP solver within acceptable computation times

**Keywords:** Aircraft recovery problem, helicopter flights, goal programming.

## 1. Introdução

As companhias aéreas enfrentam uma demanda crescente por serviços, o que as leva a investir no planejamento de voos para maximizar lucro e satisfação do cliente, considerando fatores como estimativa de demanda de passageiros, disponibilidade de aeronaves, portões de embarque e pistas de decolagem. No entanto, imprevistos podem impactar esse planejamento, resultando em atrasos e cancelamentos de voos. Esses eventos podem surgir de fontes internas, como manutenção não planejada, falta de combustível, falhas mecânicas e escassez de membros da tripulação, ou de fontes externas, como condições meteorológicas adversas, controle de tráfego aéreo e atrasos de passageiros (SU et al., 2021).

Devido à necessidade de recuperação de voos pelas linhas aéreas, aparece, conforme descrito na literatura, o problema de recuperação de linhas aéreas (*Airline Recovery Problem*). Clarke (1998) descreve este problema como um modelo de decisão híbrido tridimensional, pois abrange outros três subproblemas, sendo eles: o Problema de Recuperação de Aeronaves (*Aircraft Recovery Problem* – ARP); o Problema de Recuperação de Tripulantes (*Crew Recovery Problem* – CRP); e o Problema de Recuperação de Passageiros (*Passenger Recovery Problem* – PRP).

Os ARPs, também descritos como problemas de reagendamento e recuperação de voos não se restringem apenas aos voos comerciais, mas também se aplicam aos voos corporativos, como os realizados por empresas petrolíferas e de gás natural. Essas empresas precisam transportar equipes entre aeroportos e unidades marítimas, utilizando uma frota de helicópteros que deve atender a uma demanda diária. Esses voos estão sujeitos a eventos imprevistos, tanto internos quanto externos, tornando a recuperação de voos relevante para minimizar custos e maximizar a realização de voos sem atrasos ou cancelamentos.

Este estudo é motivado pelo ARP de uma empresa brasileira de extração de petróleo e gás natural que opera diversas plataformas *offshore*. A companhia utiliza helicópteros com diferentes capacidades para transportar passageiros diariamente, enfrentando múltiplas prioridades, como janelas de tempo dos aeródromos, restrições de voo, pistas limitadas, pontos de pouso exclusivos e tempos de parada obrigatórios para a tripulação, características comuns a outras empresas do setor.

A representação do problema foi realizada por meio do desenvolvimento de um modelo matemático de programação inteira, o qual é base para o emprego de dois métodos de programação por metas (*Goal Programming*). Os parâmetros são considerados determinísticos e, por simplicidade de modelagem e com o intuito de obter-se uma resposta mais rápida pelo programa computacional, são consideradas abordagens em tempo discreto, i.e., o horizonte de tempo de programação foi construído em unidades discretas.

## 2. Referencial Teórico

Teodorović e Guberinić (1984) foram os primeiros a publicar um estudo sobre um ARP, em que há necessidade de um reagendamento dos voos devido à indisponibilidade de uma ou mais aeronaves, buscando a redução no atraso dos voos. Os autores utilizaram um método *branch-and-bound* e consideraram a frota de aeronaves como homogênea. Foram feitos experimentos usando uma instância com três aeronaves e oito voos, sendo todos os voos diretos. Teodorović e Stojković (1990) aprimoraram o modelo anterior em que são considerados os horários de funcionamento dos aeroportos e a possibilidade de

cancelamento de voos. Os autores desenvolveram uma heurística de programação dinâmica, e testaram em algumas instâncias que contêm até 80 voos e 14 aeronaves.

O ARP não é limitado apenas a problemas de aeronaves que realizam voos comerciais, mas pode ser estendido para solucionar problemas de recuperação de helicópteros, muito utilizados em empresas petrolíferas que possuem plataformas *offshore*. Os helicópteros são o meio de transporte mais comum entre aeródromos e plataformas petrolíferas localizadas *offshore*, e atualmente há poucos sistemas de controle de tráfego aéreo para esta classe de transporte, quando comparados aos sistemas de controle de voos comerciais. Além disso, ao contrário do sistema de agendamento de voos de linhas aéreas, os voos com destinos às plataformas offshore ainda são parcialmente realizados manualmente (BASTOS et al., 2020).

Alguns estudos exploraram problemas reais de agendamento, roteamento e recuperação de voos de empresas petróleo e gás mundialmente, como no México (ROMERO; SHEREMETOV; SORIANO, 2007; CABALLERO-MORALES; MARTINEZ-FLORES, 2020), Nigéria (FIALA; PULLEYBLANK, 1992), no Golfo Pérsico (ABBASI-POOYA; KASHAN, 2017) e no Brasil (GALVÃO; GUIMARÃES, 1990; MENEZES et al., 2010; HERMETO; FERREIRA FILHO; BAHIANSE, 2014; VIEIRA et al., 2021; DE LA VEGA et al., 2022b, 2022a).

Dos trabalhos realizados com dados de empresas brasileiras, destaca-se inicialmente o de Galvão e Guimarães (1990). Os autores desenvolveram um algoritmo heurístico com o objetivo de satisfazer a demanda de helicópteros para um período de 11 dias, com 65 voos, e reduzir custos. Mais recentemente, Vieira et al. (2021) e De La Vega et al. (2022a) utilizaram métodos exatos e heurísticos em modelos matemáticos de reagendamento de voos de helicópteros e De La Vega et al. (2022b) utilizaram uma modelagem com tempo discreto para um problema semelhante de recuperação de voos de helicópteros.

### 3. Descrição do Problema

No ARP real abordado neste trabalho, a empresa contrata helicópteros e tripulações para transportar funcionários e representantes da empresa de um aeroporto, localizado em terra, até unidades marítimas, realizando também as viagens de retorno. Diariamente, ocorrem diversos voos programados, mas, devido a eventos imprevistos, como condições climáticas, atrasos no embarque ou da tripulação, manutenção não programada ou outros fatores que possam causar atrasos ou cancelamentos de voos, surge a necessidade de reprogramação dos voos. Todos os voos devem ser realizados, preferencialmente, no dia originalmente agendado, embora alguns possam ser transferidos para o dia seguinte, se necessário. Assim, a empresa frequentemente precisa incluir na programação diária os voos transferidos de dias anteriores, levando em consideração características e requisitos relacionados aos tipos de:

**a) Voos:** Existem quatro categorias de voos com diferentes prioridades a serem consideradas neste estudo. A primeira categoria é composta pelos voos de comitiva, que transportam os passageiros da alta gerência e de representantes de órgãos fiscalizadores. A segunda são os voos atrasados de  $m$ -dias ( $m \geq 2$ ), que aqueles transferidos a partir de 2 dias ou mais. O terceiro são os voos com atrasos de 1 dia, que são voos transferidos do dia anterior. Por fim, existem os voos de tabela, que são os voos pertencentes ao cronograma diário inicial, que transportam passageiros regulares e ocasionais. Os voos são planejados semanalmente, ocasião na qual são definidos os seus horários de partida e unidades de destino. Cada voo parte do aeroporto com um grupo de passageiros para alguma unidade marítima e na sua unidade de destino outro grupo de passageiros embarca no helicóptero para regressar ao mesmo aeroporto, ou, no caso de voos de comitiva, o helicóptero aguarda o regresso desses passageiros. Pode haver mais de uma viagem para a mesma unidade marítima no mesmo dia e, se houver voos transferidos e não transferidos

para a mesma unidade marítima, é obrigatório que o voo transferido seja realizado antes de qualquer outro voo. Os voos de tabela e de comitiva não podem ser antecipados e podem sofrer atrasos de até 4 horas no máximo; caso contrário, terão de ser transferidos para o dia seguinte. Os voos de comitiva impedem a unidade marítima de receber outros helicópteros durante sua estadia, que costuma levar o dia inteiro.

**b) Helicópteros:** A frota de helicópteros é contratada de uma empresa terceirizada com contrato de um ou mais anos. A frota é heterogênea e conta com helicópteros com diferentes faixas de velocidade, capacidade de passageiros e alcance de voo. Alguns desses helicópteros não conseguem realizar alguns voos devido à distância entre aeródromo e unidade de destino, capacidade de passageiros, ou mesmo por causa de heliportos de pequeno porte nas unidades marítimas. Cada helicóptero pode realizar vários voos no mesmo dia; porém, o tempo entre voos no mesmo helicóptero deve ser de pelo menos 45 minutos, pois ele precisa ser abastecido e/ou uma manutenção preventiva deve ocorrer no aeroporto, por exemplo. A frota de helicópteros contém três categorias de disponibilidade: helicópteros do tipo normal, que consiste em helicópteros prontamente disponíveis no aeródromo e inicialmente atribuídos aos voos diários; helicópteros tipo pool, que consiste em helicópteros sobressalentes disponíveis no aeroporto que não foram atribuídos a nenhum voo de tabela e podem ser utilizados para reagendamento de voos com custos adicionais; e os helicópteros tipo spot, que não estão disponíveis no aeroporto, mas podem ser transferidos de outros locais e utilizados para reagendamento de voos com custos adicionais mais elevados. Existem diferentes tipos de helicópteros com diferentes capacidades entre as três categorias de disponibilidade.

**c) Aeroporto:** Os aeroportos estão localizados em terra e apenas uma aeronave pode decolar por vez e, o tempo de partida entre dois voos de diferentes helicópteros não deve ser inferior a 5 minutos, para que seja realizado o briefing de segurança, a pesagem dos passageiros e bagagens. Os voos dos helicópteros não devem ser realizados após o pôr do sol, devido à diminuição da visibilidade, portanto, é estabelecida uma janela de tempo para o aeródromo com base no nascer e no pôr do sol de cada dia.

**d) Unidades Marítimas (UMs):** A localização das unidades marítimas é conhecida de antemão e é possível estimar o tempo de viagem entre o aeroporto e a unidade marítima por um helicóptero, para considerá-lo como um tempo determinístico no modelo. Cada unidade de destino possui um único heliporto para pouso e decolagem, portanto, não é possível que mais de um helicóptero esteja na unidade marítima ao mesmo tempo. Em função do desembarque e embarque de passageiros, deve ser respeitado um intervalo de 15 minutos entre os pousos dos helicópteros na unidade marítima. Esse intervalo de tempo também tem impacto no horário de saída do aeroporto, uma vez que os voos com a mesma unidade de destino devem respeitar a restrição do heliporto de um helicóptero por vez. Já os voos de comitiva permanecem na UM por mais tempo, bloqueando assim o pouso de outros helicópteros.

Além de encaixar o maior número de voos transferidos no cronograma do dia, o problema de recuperação de voos abordado aqui nesta pesquisa também busca reduzir os impactos gerados por esta reprogramação. No presente trabalho, consideramos que para se obter um resultado satisfatório na reprogramação, três objetivos principais devem ser otimizados: (i) reduzir a transferência de voos para dias seguintes, (ii) reduzir o uso de helicópteros e (iii) reduzir os atrasos nos voos. De acordo com os representantes da empresa, existe uma ordem de prioridade hierárquica pelos quais esses objetivos devem ser completados ao se abordar este problema. Deve-se cumprir primeiramente o objetivo (I), depois o (II) e finalmente o (III), isto é, do mais ao menos importante.

#### **4. Modelagem matemática**

A seguir, apresenta-se toda a notação requerida (descrições dos conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão):

### Conjuntos e índices:

- $T$  - Períodos no horizonte de planejamento, indexados por  $t$  e  $t'$ ;
- $I$  - Conjunto de voos, indexados por  $i$  e  $j$ ;
- $H$  - Conjunto de helicópteros, indexado por  $h$ ;
- $P$  - Conjunto de unidades marítimas, indexadas por  $p$ ;
- $I^0$  - Subconjunto de voos de tabela;
- $I^1$  - Subconjunto de voos transferidos do dia anterior;
- $I^2$  - Subconjunto de voos de transferência com dois ou mais dias de atraso;
- $I^C$  - Subconjunto de voos de comitiva;
- $I_h$  - Subconjunto de voos que podem ser realizados pelo helicóptero  $h$ ;
- $I_p$  - Subconjunto de voos com destino a unidade marítima  $p \in P$ ;
- $H^N$  - Subconjunto de helicópteros do tipo normal;
- $H^P$  - Subconjunto de helicópteros do tipo *pool*;
- $H^S$  - Subconjunto de helicópteros do tipo *spot*;
- $H_i$  - Subconjunto de helicópteros aptos a realizar o voo  $i \in I$ ;

### Parâmetros:

- $r_i$  - Hora de partida programada original do voo  $i$ ;
- $tat$  - *Turnaround time*, ou intervalo de tempo mínimo entre dois voos consecutivos realizados por um mesmo helicóptero;
- $tu_i$  - Tempo de permanência na unidade marítima para o voo  $i$ ;
- $tf_i$  - Tempo de duração do voo  $i$ , incluindo a permanência na UM;
- $d$  - Atraso máximo permitido na hora de partida de um voo de tabela ou comitiva;
- $c$  - Fator de divisão para discretização do tempo.

### Variáveis

- $X_{ith} = \begin{cases} 1, & \text{se o voo } i \text{ inicia no instante } t \text{ pelo helicóptero } h; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $Y_{th} = \begin{cases} 1, & \text{se o helicóptero } h \text{ está sendo utilizado no instante } t; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $Z_t = \begin{cases} 1, & \text{se alguma decolagem ocorre no instante } t; \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$
- $V_h = \begin{cases} 1, & \text{se o helicóptero } h \text{ é utilizado para algum voo;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$

$$K_i = \begin{cases} 1, & \text{se o voo } i \text{ não é agendado para o dia programado;} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases}$$

O modelo de tempo discreto é inspirado no modelo proposto por De La Vega et al. (2022a), no qual variáveis de fluxo são utilizadas para formular o problema. No entanto, ele difere do modelo proposto por De La Vega et al. (2022a) ao envolver um problema ligeiramente diferente, adicionando a variável de decisão  $K_i$  e formulando de maneira distinta um conjunto de restrições e a ausência de voos obrigatórios e intervalos de almoço para a tripulação. A seguir, detalhamos os componentes da função objetivo do modelo proposto. A expressão (1) minimiza as transferências de voos, a expressão (2) minimiza o uso de helicópteros, e a expressão (3) minimiza os atrasos nos voos. Como comentado anteriormente, é estabelecido um critério de hierarquização dos objetivos em que  $z_1 \gg z_2 \gg z_3$ . Os parâmetros  $w_1, w_2, w_3, w_4, w_5, w_6$  e  $w_7$  definem uma prioridade intra-objetivo, atribuindo pesos diferenciados dentro de cada função. No primeiro objetivo, esses pesos refletem a importância atribuída a diferentes tipos de voos (comitiva, transferências de múltiplos dias ( $m \geq 2$ ), transferências de 1 dia e tabela). No segundo objetivo, os pesos se aplicam aos tipos de helicóptero (*spot*, *pool* e *normal*).

$$\min z_1 = w_1 \sum_{i \in I^C} K_i + w_2 \sum_{i \in I^2} K_i + w_3 \sum_{i \in I^1} K_i + w_4 \sum_{i \in I^0} K_i; \quad (1)$$

$$\min z_2 = w_5 \sum_{h \in HS} V_h + w_6 \sum_{h \in HP} V_h + w_7 \sum_{h \in HN} V_h; \quad (2)$$

$$\min z_3 = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H_i} \sum_{t \in T} c(t - r_i) X_{ith}. \quad (3)$$

Adicionalmente, as expressões (4) a (17) definem as restrições do modelo de tempo discreto proposto, seguindo a descrição do problema apresentada na Seção 2.

$$\sum_{h \in H_i} \sum_{t \in T} X_{ith} + K_i = 1, \quad \forall i \in I; \quad (4)$$

$$Z_t = \sum_{i \in I} \sum_{h \in H_i} X_{ith}, \quad \forall t \in T; \quad (5)$$

$$Y_{th} = \sum_{i \in I_h} \sum_{t' = t-1, \dots, \max(r_i, t - (tf_i - 1) - tat)} X_{it'h}, \quad \forall h \in H, \forall t \in T; \quad (6)$$

$$\sum_{t \in T} Y_{th} \leq |T| V_h, \quad \forall h \in H; \quad (7)$$

$$\sum_{h \in H_i} \sum_{t \in T} (t - r_i) X_{ith} \leq d, \quad \forall i \in I^0 \cup I^C; \quad (8)$$

$$t' \sum_{h \in H_j} X_{jt'h} \geq t \sum_{h \in H_i} X_{ith} \frac{tf_i - tu_i}{2} + tu_i - \frac{tf_j - tu_j}{2} - \quad (9)$$

$$|T| \left( 2 - \sum_{h \in H_i} X_{ith} - \sum_{h \in H_j} X_{jt'h} \right), \forall p \in P, \forall i, j \in I_p, i \neq j, \forall t, t' \in T, t' > t;$$

$$\sum_{h \in H_j} \sum_{t'=1}^{t-1} X_{jt'h} \leq 1 - \sum_{h \in H_i} X_{ith}, \forall p \in P, \forall i \in (I^1 \cup I^2) \cap I_p, \forall j \in I^0 \cap I_p, \forall t \in T; \quad (10)$$

$$\sum_{t'=t+1}^{|T|} X_{jt'h} \leq 1 - X_{ith}, \forall i \in I^C, \forall j \in I, j \neq i, \forall h \in H_i \cap H_j, \forall t \in T; \quad (11)$$

$$\sum_{h \in H_j} \sum_{t'=t+1}^{|T|} X_{jt'h} \leq 1 - \sum_{h \in H_i} X_{ith}, \forall p \in P, \forall i \in I^C \cap I_p, \forall j \in I \cap I_p, j \neq i, \forall t \in T; \quad (12)$$

$$X_{ith} \in \{0,1\}, \forall i \in I, \forall h \in H, \forall t \in T; \quad (13)$$

$$Y_{th} \in \{0,1\}, \forall h \in H, \forall t \in T; \quad (14)$$

$$Z_t \in \{0,1\}, \forall t \in T; \quad (15)$$

$$V_h \in \{0,1\}, \forall h \in H; \quad (16)$$

$$K_i \in \{0,1\}, \forall i \in I. \quad (17)$$

As restrições para o problema são definidas de (4) a (17). As restrições (4) impõem que cada voo  $i$  seja realizado no máximo uma vez, ou seja transferido para o dia seguinte. As restrições (5) determinam se há uma decolagem do aeroporto no período  $t$ . As restrições (6) especificam se o helicóptero  $h$  está sendo utilizado para um voo no período  $t$ . As restrições (7) determinam se o helicóptero  $h$  é utilizado no dia. As restrições (8) garantem que os voos de tabela e de comitiva que estão agendados para o dia não excedam o atraso máximo permitido (240 minutos). As restrições (9) restringem a ocorrência de sobreposição de voos destinados à mesma unidade marítima, visto que cada UM pode receber apenas um helicóptero por vez. As restrições (10) garantem a precedência de um voo atrasado ( $I^2 \cup I^1$ ) sobre um voo sem atraso ( $I^0 \cup I^C$ ) indo para a mesma unidade de destino. As restrições (11) bloqueiam o uso de helicópteros que executam voos de comitiva para o resto do dia. As restrições (12) garantem que as unidades de destino que receberam um voo de comitiva estejam bloqueadas para outros voos no período restante do dia. As restrições (13) a (17) representam o domínio das variáveis de decisão, sendo todas elas binárias.

Na implementação computacional do modelo de tempo discreto, dependemos de algumas restrições de fixação de variáveis, conforme definido em (18) e (19). O primeiro conjunto de restrições proíbe que voos de tabela e de comitiva partam antes do horário agendado, após o atraso máximo ou se o tempo restante não for suficiente para a conclusão do voo. Essas restrições também garantem que os voos de tabela e de comitiva programados para o dia não excedam o atraso máximo permitido. As restrições (19) têm o mesmo objetivo para voos transferidos, exceto pela ausência da condição de atraso máximo permitido.

$$X_{ith} = 0 \text{ se } t > r_i \text{ ou } t > r_i + d \text{ ou } t > T - tf_i, \forall i \in I^0 \cup I^C, \forall h \in H_i, \forall t \in T; \quad (18)$$

$$X_{ith} = 0 \text{ se } t > r_i \text{ ou } t > T - tf_i, \forall i \in I^1 \cup I^2, \forall h \in H_i, \forall t \in T. \quad (19)$$

#### 4.1 Abordagens de resolução

Foram definidas duas abordagens para solucionar o problema, incorporando três critérios lexicográficos: (i) minimizar as transferências de voos, (ii) minimizar o uso de helicópteros e (iii) minimizar os atrasos nos voos. O critério (i) domina o critério (ii), e o critério (ii) domina o critério (iii), sem *trade-offs* entre eles.

Na primeira abordagem (A1), em vez de resolver os três modelos ILP separadamente, uma alternativa computacionalmente menos onerosa pode ser definida adequadamente pelas

penalidades  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  para os critérios (1), (2) e (3), respectivamente, com  $P_1 \gg P_2 \gg P_3$ , e resolver o modelo de tempo discreto como um único modelo ILP definido por uma função objetivo única dada por:

$$\begin{aligned} \min Z = & P_1 \left( \sum_{i \in IC} W_1 K_i + \sum_{i \in I2} W_2 K_i + \sum_{i \in I1} W_3 K_i + \sum_{i \in I0} W_4 K_i \right) + P_2 \left( \sum_{h \in HS} W_5 V_h + \right. \\ & \left. \sum_{h \in HP} W_6 V_h + \sum_{h \in HN} W_7 V_h \right) + P_3 \sum_{i \in I} \sum_{h \in H_i} \sum_{t \in T} c(t - r_i) X_{ith} \end{aligned} \quad (20)$$

A escolha dos valores dessas penalidades  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  deve garantir as prioridades hierárquicas entre esses critérios, ou seja, que o critério (i) prevaleça sobre o critério (ii), e que o critério (ii) prevaleça sobre o critério (iii). Portanto, essa primeira abordagem consiste em resolver o modelo ILP definido pela função objetivo (20) e pelas restrições (4) a (19). A solução ótima obtida (com valor ótimo  $\bar{f} = \bar{f}_1 + \bar{f}_2 + \bar{f}_3$ ) também é ótima para o modelo de tempo discreto original.

A segunda abordagem (A2) também emprega os três critérios das expressões (1), (2) e (3), assim como as restrições (4) a (19), mas adota uma estratégia de programação por metas hierárquicas. Para compará-la com a abordagem A1, utilizamos penalidades  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$  sobre as funções objetivo em (1), (2) e (3), respectivamente. A abordagem A2 foi proposta devido à instabilidade numérica observada na A1 (causada pelos BigMs) e ao elevado esforço computacional, com a expectativa de que a resolução por metas possa mitigar esses desafios.

- 1) **Meta 1:** Primeiramente, resolvemos um modelo ILP com a função objetivo (1), sujeito às restrições (4) a (6) e (8) a (19). Observe que a única restrição que não é incluída nesta etapa é a (7), uma vez que não é necessário minimizar a quantidade de helicópteros a serem utilizados nesta primeira etapa. As variáveis  $V_h, \forall h \in H$ , também não são incluídas na primeira meta. A solução ótima obtida nesta primeira etapa do procedimento mostra a quantidade de voos sob os pesos  $W_1, W_2, W_3, W_4$  que não puderam ser agendados para o dia, representada pelas variáveis  $K_i, \forall i \in I$ . O valor da função objetivo obtido nesta primeira etapa ( $\bar{f}_1$ ) é imposto como uma nova restrição na próxima etapa, para definir o peso total dos voos que não puderam ser agendados. Note que se fixarmos as variáveis  $K_i, \forall i \in I$ , usando os valores encontrados nesta etapa, podemos ter perda de otimalidade nas etapas seguintes, devido ao fato de que estamos forçando um voo específico a ser adiado para o dia seguinte sem considerar os outros critérios. Os valores ótimos para todas as variáveis, encontrados nesta etapa, são usados como iniciais para a próxima etapa
- 2) **Meta 2:** Posteriormente, resolvemos um modelo ILP com a função objetivo (2), sujeito às restrições (4) a (18) e variáveis  $V_h, \forall h \in H$ , incluídas nesta meta. Para considerar os resultados da Meta 1, a restrição (21) é incluída neste modelo, pois garante que a soma ponderada dos voos não agendados para o dia de todos os subconjuntos de voos seja igual ao valor da solução obtida na primeira meta.

$$P_1 \left( \sum_{i \in IC} W_1 K_i + \sum_{i \in I2} W_2 K_i + \sum_{i \in I1} W_3 K_i + \sum_{i \in I0} W_4 K_i \right) = \bar{f}_1 \quad (21)$$

A solução ótima obtida nesta etapa indica o peso total dos helicópteros que serão usados para operar os voos agendados na Meta 1, representado pelas variáveis  $V_h, \forall h \in H$ . O valor da função objetivo obtido nesta segunda etapa ( $\bar{f}_2$ ) também é imposto como uma nova restrição na próxima etapa, para definir o peso dos helicópteros usados. Não podemos garantir a quantidade de helicópteros necessária

para executar todos os voos, devido ao fato de que os pesos de cada helicóptero são diferentes e, na última etapa, os tipos de helicópteros podem ser trocados desde que o valor de  $\bar{f}2$  continue o mesmo. Os valores ótimos para todas as variáveis, encontrados nesta etapa, também são usados como valores iniciais para resolver o modelo ILP na próxima etapa.

- 3) **Meta 3:** Nesta última etapa, resolvemos outro modelo ILP, mas agora usando a função objetivo (3), as restrições (4) a (18), e a restrição (21). Também consideramos uma nova restrição (22), que garante que o peso total dos helicópteros permaneça no seu valor mínimo para realizar o total de voos agendados na Meta 1. Esta segunda abordagem não resulta em perda de otimalidade, e o valor ótimo resulta da soma de todos os resultados de cada meta  $\bar{f} = \bar{f}1 + \bar{f}2 + \bar{f}3$ .

$$P_2(\sum_{h \in HS} W_5 V_h + \sum_{h \in HP} W_6 V_h + \sum_{h \in HN} W_7 V_h) = \bar{f}2 \quad (22)$$

## 5. Experimentos computacionais

Os modelos foram implementados na linguagem computacional Julia e solucionados utilizando o solver IBM CPLEX 20.1.0, em um computador Windows com um processador Intel Core i7-3520M 2.9GHz e 8GB de memória RAM, impondo um limite temporal de 3600 segundos (para os modelos de programação de metas não há limite temporal entre etapas, o tempo de 3600 é imposto como limite temporal total para todos os casos. As instâncias utilizadas para os experimentos computacionais foram fornecidas por uma empresa brasileira de petróleo e gás natural, com base no histórico de suas operações logísticas. Essas instâncias envolvem de 9 a 47 voos diários. A Tabela 1 mostra as informações de todas as 15 instâncias utilizadas neste estudo em termos do número total de voos ( $|I|$ ), número de voos de comitiva ( $|I^C|$ ), número de voos transferidos de dois dias ou mais ( $|I^2|$ ), número de voos transferidos do dia anterior ( $|I^1|$ ), número de voos de tabela ( $|I^0|$ ), total de unidades marítimas ( $|P|$ ), número de helicópteros do tipo *spot* ( $|H^S|$ ), número de helicópteros do tipo *pool* ( $|H^P|$ ), número de helicópteros normais ( $|H^N|$ ). Destacamos as instâncias I27 e I35 no final da tabela por ser não possível agendar todos os voos para o dia.

**Tabela 1 – Descrição das instâncias**

| Instâncias | $ I $ | $ I^C $ | $ I^2 $ | $ I^1 $ | $ I^0 $ | $ P $ | $ H^S $ | $ H^P $ | $ H^N $ |
|------------|-------|---------|---------|---------|---------|-------|---------|---------|---------|
| I9         | 9     | 0       | 1       | 1       | 7       | 7     | 0       | 1       | 2       |
| I10        | 10    | 0       | 1       | 1       | 8       | 7     | 0       | 1       | 2       |
| I12        | 12    | 0       | 0       | 1       | 11      | 9     | 0       | 0       | 3       |
| I15        | 15    | 1       | 1       | 2       | 11      | 11    | 2       | 2       | 3       |
| I20        | 20    | 1       | 2       | 10      | 7       | 16    | 4       | 2       | 5       |
| I24        | 24    | 1       | 2       | 11      | 10      | 19    | 3       | 2       | 5       |
| I30        | 30    | 1       | 1       | 15      | 12      | 21    | 2       | 2       | 7       |
| I37        | 37    | 0       | 0       | 7       | 30      | 17    | 0       | 0       | 11      |
| I38        | 38    | 0       | 3       | 20      | 15      | 24    | 0       | 0       | 11      |
| I40        | 40    | 1       | 3       | 19      | 17      | 24    | 3       | 3       | 5       |
| I42        | 42    | 0       | 4       | 17      | 21      | 26    | 1       | 1       | 9       |
| I45        | 45    | 0       | 3       | 20      | 22      | 27    | 0       | 0       | 11      |
| I47        | 47    | 0       | 6       | 17      | 24      | 29    | 2       | 2       | 7       |
| I27        | 27    | 1       | 1       | 6       | 19      | 20    | 0       | 0       | 12      |
| I35        | 35    | 1       | 2       | 10      | 22      | 26    | 0       | 0       | 12      |

Fonte: Autoria própria (2024)

Todas as metodologias utilizadas consideram a discretização do tempo em intervalos de 5 minutos (ou seja,  $c = 5$ ), e todos os parâmetros utilizados para resolver o modelo foram definidos com base nessa discretização. Os seguintes parâmetros foram fornecidos pela empresa:  $tat = 9$  períodos de 5 minutos e  $d = 48$  períodos de 5 minutos. A janela de tempo do aeroporto é definida de acordo com as previsões de nascer e pôr do sol para o dia. As instâncias I9, I10, I12, I15 e I27 têm uma janela de tempo das 06:55 às 18:00, ou seja, há 134 períodos de 5 minutos cada, enquanto as demais instâncias têm uma janela de tempo das 06:55 às 19:00, ou seja, há 146 períodos de 5 minutos cada.

Após realizar experimentos preliminares, determinamos os valores de penalidade para os três critérios lexicográficos na função objetivo. Especificamente, selecionamos os valores:  $P1 = 100$ ,  $P2 = 10$  e  $P3 = 0,01$ . Estes valores foram escolhidos para efetivamente impor os objetivos hierárquicos, onde o primeiro critério tem precedência sobre o segundo, e o segundo tem precedência sobre o terceiro. Além disso, os representantes da empresa definiram os seguintes pesos para cada categoria (ou seja, tipos de voos e helicópteros):  $W1 = 320$ ,  $W2 = 240$ ,  $W3 = 160$ ,  $W4 = 80$ ,  $W5 = 30$ ,  $W6 = 25$ ,  $W7 = 20$ . Observe que há diferença substancial nos valores entre  $P1W1$ ,  $P1W2$ ,  $P1W3$ ,  $P1W4$  em comparação com os valores  $P2W5$ ,  $P2W6$ ,  $P2W7$  e, também, há grande diferença entre esses valores em relação ao  $P3$ , indica a dominância do critério mais relevante sobre os menos importantes, garantindo a ordem lexicográfica estabelecida pelos tomadores de decisão da empresa.

| <b>Instância</b> | <b>A1</b> |         |         |       | <b>A2</b> |         |         |       |
|------------------|-----------|---------|---------|-------|-----------|---------|---------|-------|
|                  | $f_{LB}$  | $f$     | Gap (%) | Tempo | $f_{LB}$  | $f$     | Gap (%) | Tempo |
| <b>I9</b>        | 650,20    | 650,20  | 0       | 1     | 650,20    | 650,20  | 0       | 1     |
| <b>I10</b>       | 650,30    | 650,30  | 0       | 1     | 650,30    | 650,30  | 0       | 2     |
| <b>I12</b>       | 601,10    | 601,10  | 0       | 1     | 601,10    | 601,10  | 0       | 2     |
| <b>I15</b>       | 969,65    | 969,65  | 0       | 36    | 969,65    | 969,65  | 0       | 21    |
| <b>I20</b>       | 1134,39   | 1134,5  | 0       | 3387  | 1134,50   | 1134,50 | 0       | 178   |
| <b>I24</b>       | 1254,95   | 1254,95 | 0       | 170   | 1254,95   | 1254,95 | 0       | 162   |
| <b>I30</b>       | 1269,95   | 1269,95 | 0       | 167   | 1269,88   | 1269,95 | 0       | 116   |
| <b>I37</b>       | 1622,75   | 1622,90 | 0       | 158   | 1622,77   | 1622,9  | 0       | 153   |
| <b>I38</b>       | 1642,73   | 1679,70 | 2,2     | tl    | 1678,85   | 1678,95 | 0       | 336   |
| <b>I40</b>       | 1804,63   | 2122,95 | 14,99   | tl    | 1834,62   | 1835,55 | 0,05    | tl    |
| <b>I42</b>       | 1829,62   | 2024,70 | 9,64    | tl    | 1837,77   | 1837,95 | 0       | 1638  |
| <b>I45</b>       | 1858,93   | 1886,30 | 1,45    | tl    | 1884,09   | 1884,25 | 0,01    | 1251  |
| <b>I47</b>       | 1999,56   | 2285,70 | 12,52   | tl    | 2097,30   | 2097,30 | 0       | 1650  |
| <b>I27</b>       | 9818,90   | 9818,90 | 0       | 57,36 | 9818,90   | 9818,90 | 0       | 19,64 |
| <b>I35</b>       | 9787,51   | 9834,40 | 0,48    | tl    | 9834,30   | 9834,30 | 0       | 68,7  |

**Fonte: Autoria própria (2024)**

Conforme mostrado na Tabela 2, as abordagens A1 e A2 demonstram alto desempenho, ambas alcançando soluções ótimas comprovadas para as instâncias I9, I10, I12, I15, I20, I24, I27, I30 e I37, destacando sua eficácia na resolução dos problemas de otimização analisados. No entanto, à medida que a complexidade das instâncias aumenta, as limitações da abordagem A1 se tornam mais evidentes, resultando em lacunas de otimalidade maiores nas instâncias I40, I42 e I47. Em contrapartida, a abordagem A2 não apenas alcançou soluções ótimas para as instâncias I42 e I47 com tempos computacionais reduzidos, como também diminuiu significativamente o gap da instância I40 de 14,99% para 0,05%. Além disso, mesmo nas instâncias em que A1 atingiu soluções ótimas, a abordagem A2 se mostrou superior, reduzindo o tempo computacional em todas essas instâncias.

A Tabela 3 detalha os resultados em termos práticos, onde podemos observar a quantidade de voos que precisaram ser transferidos para o dia seguinte, a quantidade de helicópteros necessários para executar todos os voos agendados para o dia e o atraso total dos voos em cada instância. Todas as abordagens apresentaram os mesmos resultados em termos de transferências de voos. As instâncias I27 e I35 destacam cenários específicos onde os voos foram adiados, envolvendo consistentemente os voos da tabela nas duas abordagens.

**Tabela 3 – Resultados mostrados como contagens em cada objetivo para as duas abordagens**

| Instância | Voos Transferidos |    | Uso de helicópteros |    | Atraso Total (min) |      |
|-----------|-------------------|----|---------------------|----|--------------------|------|
|           | A1                | A2 | A1                  | A2 | A1                 | A2   |
| I9        | 0                 | 0  | 3                   | 3  | 20                 | 20   |
| I10       | 0                 | 0  | 3                   | 3  | 30                 | 30   |
| I12       | 0                 | 0  | 3                   | 3  | 110                | 110  |
| I15       | 0                 | 0  | 4                   | 4  | 1965               | 1965 |
| I20       | 0                 | 0  | 5                   | 5  | 3450               | 3450 |
| I24       | 0                 | 0  | 5                   | 5  | 5495               | 5495 |
| I30       | 0                 | 0  | 6                   | 6  | 6995               | 6995 |
| I37       | 0                 | 0  | 8                   | 8  | 2290               | 2290 |
| I38       | 0                 | 0  | 8                   | 8  | 7895               | 7895 |
| I40       | 0                 | 0  | 9                   | 8  | 7295               | 8555 |
| I42       | 0                 | 0  | 9                   | 8  | 7470               | 8795 |
| I45       | 0                 | 0  | 9                   | 9  | 8468               | 8425 |
| I47       | 0                 | 0  | 10                  | 9  | 8570               | 9730 |
| I27       | 1                 | 1  | 9                   | 9  | 1890               | 1890 |
| I35       | 1                 | 1  | 8                   | 8  | 3430               | 3430 |

Fonte: Autoria própria (2024)

A divergência entre as abordagens torna-se aparente ao examinar o segundo critério, uso de helicópteros, exposto na Tabela 3, particularmente nas instâncias I40, I42 e I47. Nesse contexto, a Abordagem A1 revela resultados inferiores dentro do tempo computacional especificado. Por exemplo, na instância I40, A1 aloca 9 helicópteros para 40 voos, enquanto A2 alcança maior eficiência ao alocar um conjunto de apenas 8 helicópteros.

## 6. Considerações finais

O reagendamento de voos é um problema prático e desafiador que envolve considerar características específicas, além de definir diferentes prioridades entre critérios. Neste artigo, abordase um ARP enfrentado por uma empresa brasileira de petróleo e gás. Para resolver esse problema, propõe-se uma formulação com três critérios hierárquicos de otimização. Com base nessa representação, foram desenvolvidas duas abordagens de solução: a primeira consiste em uma função objetivo mono-critério, na qual os pesos são definidos de forma a respeitar a hierarquia original dos critérios, e a segunda utiliza três funções objetivo não-conflitantes, resolvidas sequencialmente por meio de programação por metas, conforme a hierarquia dos critérios estabelecida.

Experimentos computacionais demonstraram a eficácia das abordagens propostas na resolução de instâncias reais do ARP abordado. A abordagem A1 se destaca na obtenção de soluções ótimas para instâncias menores, mas, à medida que os desafios aumentam, ela tem dificuldades em garantir soluções ótimas dentro do limite de uma hora de tempo computacional. Por outro lado, a abordagem A2 mostra-se mais eficaz em alcançar soluções eficientes para um conjunto diversificado de instâncias. Após uma análise abrangente, fica evidente que A1 requer mais tempo de computação, com a dificuldade

aumentando conforme o tamanho das instâncias cresce e A2, por sua vez, entrega consistentemente soluções ótimas ou quase ótimas dentro do limite de tempo.

Tópicos interessantes para pesquisas futuras incluem a extensão do modelo para múltiplos aeroportos, o que pode exigir novas técnicas de solução, como metaheurísticas. Outra linha a ser explorada é a abordagem multiobjetivo para lidar com *trade-offs* entre os objetivos no ARP.

## Referências

ABBASI-POOYA, A.; HUSSEINZADEH KASHAN, A. New mathematical models and a hybrid Grouping Evolution Strategy algorithm for optimal helicopter routing and crew pickup and delivery. **Computers and Industrial Engineering**, v. 112, p. 35–56, 2017.

BASTOS, Y. B.; FLECK, J. L.; MARTINELLI, R. A stochastic programming approach for offshore flight scheduling. **IFAC-PapersOnLine**, v. 53, n. 4, p. 478–484, 2020.

CABALLERO-MORALES, S. O.; MARTINEZ-FLORES, J. L. Helicopter routing model with non-deterministic failure rate for evacuation of multiple oil platforms. **Computers and Industrial Engineering**, v. 139, p. 105669, 2020.

CLARKE, M. D. D. Irregular airline operations : a review of the state-of-the-practice in airline operations control centers. **Journal of Air Transport Management**, v. 4, p. 67–76, 1998.

DE LA VEGA, J. et al. Helicopter recovery in an oil and gas industry: Model and solution approaches. **EURO Journal on Transportation and Logistics**, v. 11, n. July 2021, 2022a.

DE LA VEGA, J. et al. Model-based solution approach for a short-term flight rescheduling problem in aerial passenger transportation to maritime units. **International Transactions in Operational Research**, v. 29, n. 6, p. 3400–3434, 2022b.

FIALA TIMLIN, M. T.; PULLEYBLANK, W. R. Precedence Constrained Routing and Helicopter Scheduling: Heuristic Design. **Interfaces**, v. 22, n. 3, p. 100–111, 1992.

GALVÃO, R. D.; GUIMARÃES, J. The control of helicopter operations in the Brazilian oil industry: Issues in the design and implementation of a computerized system. **European Journal of Operational Research**, v. 49, n. 2, p. 266–270, 1990.

HERMETO, N. D. S. S.; FERREIRA FILHO, V. J. M.; BAHIENSE, L. Logistics network planning for offshore air transport of oil rig crews. **Computers and Industrial Engineering**, v. 75, n. 1, p. 41–54, 2014.

MENEZES, F. et al. Optimizing helicopter transport of oil rig crews at Petrobras. **Interfaces**, v. 40, n. 5, p. 408–416, 2010.

ROMERO, M.; SHEREMETOV, L.; SORIANO, A. A genetic algorithm for the pickup and delivery problem: An application to the helicopter offshore transportation. **Advances in Soft Computing**, v. 42, p. 435–444, 2007.

SU et al. Airline Disruption Management: A Review of Models and Solution Methods. **Engineering**, v. 7, n. 4, p. 435–447, 2021.

TEODOROVIĆ, D.; GUBERINIĆ, S. Optimal dispatching strategy on an airline network after a schedule perturbation. **European Journal of Operational Research**, v. 15, n. 2, p. 178–182, 1984.

TEODOROVIĆ, D.; STOJKOVIĆ, G. Model for operational daily airline scheduling. **Transportation Planning and Technology**, v. 14, n. 4, p. 273–285, 1990.

VIEIRA, T. et al. Exact and heuristic approaches to reschedule helicopter flights for personnel transportation in the oil industry. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 151, n. May 2021.