

Uma heurística VNS para o problema de roteamento de aeronaves *Offshore*

A VNS heuristic for the *Offshore* aircraft routing problem

DOI:10.34117/bjdv8n6-280

Recebimento dos originais: 21/04/2022

Aceitação para publicação: 31/05/2022

Patricia Garcês Rabelo

Mestre em Computação

Instituição: Universidade Federal Fluminense

Endereço: Rua Recife, s/n, Jardim Bela Vista, Rio das Ostras – RJ, CEP: 28895-532

E-mail: patriciagarces@id.uff.br

Carlos Bazilio Martins

Doutor em Computação

Instituição: Universidade Federal Fluminense

Endereço: Rua Recife, s/n, Jardim Bela Vista, Rio das Ostras – RJ, CEP: 28895-532

E-mail: carlosbazilio@id.uff.br

Dalessandro Soares Vianna

Doutor em Computação

Instituição: Universidade Federal Fluminense

Endereço: Rua Recife, s/n, Jardim Bela Vista, Rio das Ostras – RJ, CEP: 28895-532

E-mail: dalessandrovianna@id.uff.br

RESUMO

O objetivo desse trabalho consiste em propor uma heurística para o setor de transporte aéreo da Petrobras, a fim de planejar o transporte de pessoas em terra para as diversas unidades marítimas espalhadas ao longo da costa brasileira. O problema pode ser definido como um problema de roteamento de veículos que estabelece a tabela semanal de voos que se repetirá a longo prazo, minimizando o custo de transporte de passageiros para as unidades e maximizando o uso das aeronaves disponíveis. A solução deve considerar uma série de restrições de segurança de voo e contratos com as empresas de transporte em vigor. A heurística desenvolvida se baseia na metaheurística VNS, e foi testada com dados reais de três aeroportos. Os resultados obtidos foram promissores e indicam que ela pode ser aplicada em todas as fases do processo de transporte aéreo.

Palavras-chave: transporte aéreo *Offshore*, roteamento de veículos, metaheurística, VNS.

ABSTRACT

This study proposes an heuristic to be used by air transportation department of PETROBRAS for planning people transportation from continent to offshore petroleum units along Brazilian coast. The problem can be defined as a routing vehicle problem that establishes a weekly flight schedule that will be used for a long time, minimizing the transportation costs and maximizing aircrafts use. The solution must consider all flight safety restrictions and the current companies' contracts. This heuristic is based on

VNS metaheuristic, and was tested on real data from three airports. The obtained results were promising and suggests the heuristic can be applied in all phases of the air transport process.

Keywords: *Offshore* air transportation, vehicle routing problem, metaheuristic, VNS.

1 INTRODUÇÃO

Desde o fim do século XIX, o petróleo é considerado uma das principais riquezas minerais para o desenvolvimento econômico dos países. O Brasil produz petróleo desde meados do século XX, e tem se destacado no cenário mundial na produção de petróleo desde a descoberta do pré-sal em 2006.

Segundo dados da [PETROBRAS, 2019], em 2010, a produção de petróleo era de aproximadamente 41 mil barris por dia. Em 2016, essa produção cresceu para 1 milhão de barris diários, um número extremamente expressivo para o país. No mês de maio de 2018, a estatal comunicou que a produção de petróleo alcançou a marca de 1,5 milhões de barris por dia. Nos últimos anos, a empresa tem adotado como estratégia de negócio a maximização do portfólio com foco em águas profundas e ultra profundas, buscando eficiência operacional e otimização de seus processos [PETROBRAS, 2021]. Para conseguir operar tão longe de terra firme, uma complexa rede de logística foi construída, tanto por água, quanto por ar, para permitir o transporte de toneladas de equipamentos e milhares de pessoas todos os dias. Essa complexa operação traz consigo desafios ainda maiores que não se limitam a esfera tecnológica, mas que trazem aspectos críticos em segurança. Segundo dados extraídos da IOGP (*Internacional Association of Oil and Gas Producers*), a operação aérea da Petrobras é a maior do mundo, correspondendo a cerca de 22% de todo tráfego aéreo offshore mundial, com transporte de cerca de 1 milhão de pessoas por ano e aproximadamente 100 mil pousos e decolagens [Hermeto e Minette, 2019].

O objetivo desse trabalho consiste em propor uma heurística para apoiar o setor de transporte aéreo da empresa a planejar a realização do transporte de pessoas em terra para as diversas unidades marítimas de exploração (offshore) espalhadas ao longo da costa brasileira, mais especificamente, Bacia de Campos. Essa heurística se propõe a resolver o problema de roteamento de aeronaves que resultara na tabela semanal de voos, que se repetir a ao longo do ano, ou até que alguma restrição seja modificada,

minimizando o custo de transporte e maximizando o uso das aeronaves disponíveis no aeroporto.

A solução deve considerar uma série de restrições como: respeitar um intervalo mínimo entre as decolagens das aeronaves na base aérea; a rota deve começar e terminar na mesma base (ou aeroporto); deve-se atender a demanda de passageiros de cada unidade; a rota tem um único destino; respeitar a quantidade e os modelos de aeronaves disponíveis em cada base de acordo com a vigência do contrato; respeitar a capacidade de passageiros de cada aeronave e diversas restrições que garantam a segurança do voo.

O algoritmo utilizado foi baseado na metaheurística VNS e foi testado com instâncias de dados reais. Os resultados obtidos apresentaram oportunidades de redução de custos que podem ser aplicados nas diversas instancias de planejamento de voos.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA ABORDADO

O processo de transporte aéreo realizado pela empresa é dividido em 3 fases: Estratégico, Tático e Operacional que pode ser ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Fases do Processo do Transporte Aéreo.



[Bastos, 2020].

O plano estratégico da empresa define a previsão da demanda de produção a longo prazo, assim como a necessidade de novas unidades marítimas e a região de exploração. Como desdobramento dessa estratégia, o setor de transporte aéreo realiza a fase de Planejamento Estratégico que define a necessidade de novas bases (ou aeroportos), bem como o estudo de suas localizações e a análise do perfil de frota, ou seja, os modelos de aeronaves a serem contratadas para operarem nessas bases.

A fase de Planejamento Tático realiza o dimensionamento da frota, ou seja, define a quantidade de aeronaves a serem contratadas e seus respectivos modelos. Nessa fase, também é definido o planejamento de voos, ou seja, a tabela de voos a ser seguida ao longo de meses ou até que exista alguma justificativa para mudança como o

reposicionamento de uma unidade marítima. A construção dessa tabela é o objetivo deste trabalho.

Portanto, pode-se considerar como premissa desse trabalho que a localização das bases já foi definida na fase anterior, e que os modelos de aeronaves disponíveis nas bases também já foram estabelecidos. A tabela construída será insumo para a próxima fase – a fase operacional.

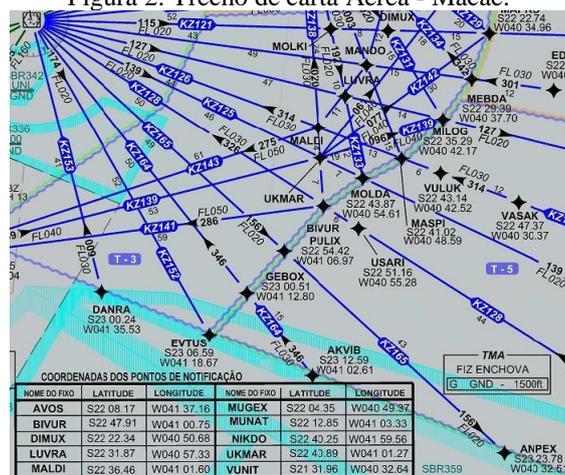
Na fase Operacional, há a programação dos voos planejados, ou seja, quando os passageiros são efetivamente reservados nos voos da tabela definido na fase anterior. A aeronave é confirmada para a realização dos voos, e novos voos podem ser inseridos ou modificados para atendimento de demanda extra de passageiros. Além disso, mudanças climáticas podem gerar a transferência ou mesmo cancelamento de voos, fato gerador de demanda represada de passageiros que precisam ser realocados em voos nos dias seguintes. Essa fase também engloba o acompanhamento da execução do voo desde a chegada do passageiro no terminal de embarque; o controle do embarque dos passageiros; acompanhamento do voo desde a decolagem, pouso da aeronave nas unidades e retorno ao aeroporto; e inspeção das aeronaves entre cada voo.

O problema abordado se concentra na fase de Planejamento Tático, na qual a tabela de voos será definida. O presente estudo deve gerar essa tabela, que consiste na definição de quais modelos de aeronaves realizarão os voos semanalmente para atender as demandas de passageiros para as suas respectivas unidades, podendo ser interpretado como um problema de roteamento de veículos heterogêneos de um único depósito. O custo de transporte é dado pelo somatório dos tempos de horas voadas de cada aeronave multiplicado pelo valor da hora voada de cada modelo de aeronave. Além disso, a cada aeronave retirada do hangar e posta em utilização há um custo fixo de manutenção e inspeção. Portanto, a minimização da quantidade de aeronaves em uso também implica em redução de custos.

Uma solução para o problema abordado deve atender as seguintes restrições: (1) o intervalo mínimo de tempo entre as decolagens das aeronaves na base aérea; (2) a rota deve sempre começar e terminar em uma base aérea; (3) a demanda de passageiros a serem transportados para cada unidade; (4) o conjunto de unidades marítimas atendidas por cada base; (5) a quantidade de aeronaves de cada modelo disponível em cada base de acordo com a vigência do contrato; (6) a capacidade de passageiros de cada aeronave; (7) a quantidade de combustível adicional necessário para realizar a rota, de forma a garantir tempo de segurança ao voo; (8) o tempo máximo de voo de uma aeronave no

dia; (9) o raio máximo de atuação da aeronave a partir da base aérea de onde partiu; (10) a quantidade máxima de voos diários definidos para a base aérea; (11) a aeronave deve ter um único destino - restrição adotada na empresa para a segurança do voo segundo estudos de [Hermeto et al., 2014]; (12) os modelos de aeronaves permitidos a pousarem em cada unidade marítima de acordo com a resistência do piso e o raio do heliporto; (13) os voos devem ser preferencialmente distribuídos ao longo da semana, a fim de evitar que haja vários voos para o mesmo destino no mesmo dia. Caso seja necessário mais de um voo para uma unidade marítima na tabela semanal, deve-se alocar um voo por dia até a demanda seja atendida a fim de distribuir o transporte e a substituição da efetivo da unidade; (14) os percentuais de distribuição dos voos para dias uteis e finais de semana. (15) a legislação da tripulação que estabelece parada para intervalo de almoço; (16) as aeronaves não podem voar após o horário do pôr do sol, que varia ao longo do ano; (17) e, por fim, as rotas das aeronaves devem seguir as aerovias – carta aeronáutica - considerando pontos de notificação. Pois, em atendimento a normas da Aeronáutica da região, durante o voo, a aeronave deve passar obrigatoriamente em um ponto de notificação na ida e outro na volta de sua rota. Para ilustrar o conceito de ponto de notificação, a Figura 2 apresenta a carta de aérea do aeroporto de Macaé, na qual as linhas azuis representam os corredores das aerovias, as setas pretas indicam o sentido da via e as estrelas pretas (com 5 letras em preto) representam os pontos de notificação e seus respectivos nomes.

Figura 2: Trecho de carta Aérea - Macaé.



[Departamento do Controle do Espaço Aéreo, 2018].

3 TRABALHOS CORRELATOS NO TRANSPORTE AÉREO *OFFSHORE*

Diversas pesquisas foram realizadas para o setor de transporte aéreo buscando a otimização de custos e segurança de voos, ao longo dos anos. Esses trabalhos podem ser encontrados nas bases Scopus (palavras-chaves: “*air transport*” e “*offshore*”) e Google Scholar (palavras-chaves: “otimização” ; “transporte aéreo” ; “passageiros” e “*offshore*”) e foram listados aqui por ordem cronológica.

Os estudos [Sena e Filho, 2010] e [Sena et al., 2011] avaliam a fase de planejamento estratégico, definindo a localização geográfica dos aeroportos em função da demanda de passageiros para transporte para as diversas unidades marítimas existentes ao longo da costa.

Ainda sobre planejamento estratégico, o estudo sobre a análise de riscos realizado por [Qian et al., 2012], avalia a segurança de passageiros e da tripulação. Ele apresenta as vantagens das rotas dos helicópteros terem apenas um destino, visto que a decolagem e o pousos são os momentos mais críticos de um voo. Esse resultado é aplicado no trabalho de [Hermeto et al., 2014] que apresentam um estudo que considera como premissa que cada voo atende apenas uma unidade marítima, e avalia a quantidade de passageiros a serem transportados a partir de cada base aérea e as unidades marítimas atendidas, minimizando a quantidade de aeronaves utilizadas. Dessa forma, consegue dimensionar a capacidade da base aérea, e suas respectivas localizações. Nesse estudo, a demanda das unidades marítimas das bacias de Campos, Santos e Vitoria é avaliada, porém, não define a rota das aeronaves nas bases aéreas. Como resultado desse trabalho, o modelo de voos com único destino foi adotado na empresa com objetivo de aumentar a segurança dos voos.

Sobre o planejamento tático, [Soletti et al., 2014] realizam um estudo para definir a rota das aeronaves. O modelo do problema é implementado em *General Algebraic Modeling System software* (GAMS) e utiliza o CPLEX como *solver*. Nesse estudo, no entanto, os autores consideram que a aeronave pode visitar várias unidades após partir da base e trabalham com dados fictícios.

Metaheurística também foram testadas para o problema. [Mota et al., 2014] emprega a metaheurística colônia de formigas para construir a rota de uma aeronave para uma base no Nordeste, obtendo resultados satisfatórios para o cenário estudado. [Motta, 2013] também aborda o problema de roteamento como uma extensão do problema do Caixeiro Viajante para uma única aeronave, a qual pode visitar mais de uma unidade e

retornar a base. Em ambos os trabalhos, os autores não consideraram os resultados dos estudos de [Hermeto et al., 2014] no qual o helicóptero deve visitar apenas uma unidade.

Sobre o dimensionamento da quantidade de aeronaves, [Moller et al., 2017] considera situações de crise devido a problemas climáticos que impedem o pouso e decolagem de aeronaves nas bases por dias consecutivos. Nesses casos, um ou mais bases próximas podem ficar fechadas até que os fatores climáticos melhorem. Com isso, a demanda de passageiros fica acumulada ao longo dos dias e há a necessidade de um tempo de recuperação para normalizar a operação, sem atrasos ou transferências de voos ou passageiros. Eles estudam o nível de serviço, utilizando o método AHP (*Analytuc Hierarchy Process*), para avaliar o tempo de normalização da operação. Com base nesse resultado, [Moller et al., 2018] realizam o estudo da quantidade de aeronaves necessárias para a operação de uma ou mais bases, considerando o nível de serviço definido.

A nível operacional, [Hermeto, 2014] analisa a importância de um sistema de vigilância via satélite para monitoramento de helicópteros no transporte aéreo *offshore*. O artigo é relevante para segurança da operação e identificação de eventuais problemas operacionais como atraso de decolagens, análise das causas de atraso e avaliação de consumo de combustível. Como resultado para área de planejamento, esse trabalho propõe o estabelecimento de um intervalo de tempo mínimo entre decolagens num aeroporto.

Nos trabalhos [Mendes et al., 2019] e [Mendes et al., 2020], os autores buscam identificar quais modelos de aeronaves devem ser alocadas em cada base. Consideram qual seria a melhor distribuição de aeronaves entre as bases e quais bases devem ser priorizadas na fase de Planejamento Tático. Eles propõem um modelo de programação linear inteira para otimização da operação do transporte aéreo considerando restrições de segurança, minimização dos custos e redução das horas voadas. Com isso, buscam resolver a quantidade de voos semanais que os helicópteros de cada base deverão realizar para atender a demanda de cada uma das unidades marítimas. Nesse modelo, ele avalia a otimização do transporte aéreo *offshore* considerando aeronaves partindo de diferentes bases e analisando cenários onde a partida das aeronaves podem variar de base aérea. Este trabalho é relevante para essa pesquisa pois determina quais aeronaves estão disponíveis em cada aeroporto, porém, não define as rotas das aeronaves, que serão definidas neste trabalho.

[Bastos, 2020] realiza um estudo estocástico para analisar a incerteza na fase operacional do processo de Programação dos Voos. Nesse estudo o objetivo é gerar

uma grade que minimize os atrasos de voos nos momentos de crise, como interrupção da operação em função de alterações climáticas. O estudo foca na otimização de decisões na atividade de programação - fase posterior ao planejamento: definição dos horários de decolagens e sequenciamento e alocação dos voos às aeronaves.

[Heringer, 2020] modela o mesmo problema abordado neste trabalho como uma variante do problema da mochila e utiliza o OpenSolver como ferramenta para resolução do problema. No estudo, ele limita a um período de análise de 2 min para obtenção de soluções viáveis. Nesse trabalho, ele também realiza um estudo operacional de forma a melhorar a eficiência do transporte aéreo.

4 HEURÍSTICA PROPOSTA

A heurística proposta para resolver o problema é baseada na metaheurística Variable Neighborhood Search (VNS), apresentada por [Mladenovic e Hansen, 1997] para o problema do Caixeiro Viajante. A metaheurística VNS é a segunda das mais empregadas para problemas de roteamento de veículos, segundo [Elshaer e Awad, 2020].

A ideia do algoritmo VNS consiste em realizar a busca até encontrar um ótimo local da vizinhança de uma solução inicial e, em seguida, realizar uma perturbação para sair daquele vale, partindo para uma nova vizinhança. A metaheurística é dividida em 2 fases, na 1ª fase - Construtiva (seção 4.1) - uma solução inicial viável para o problema é construída. Na 2ª fase - Refinamento (seção 4.3) - essa solução é melhorada até um tempo limite seja atingido ou quantidade máxima de iterações definida pelo usuário.

Em cada iteração da fase de Refinamento, o algoritmo realiza um embaralhamento da solução; em seguida, um procedimento de busca local; e por fim, ao final de cada iteração há verificação para mudança de vizinhança. No embaralhamento, uma modificação aleatória é realizada na solução. Na busca local, melhorias consecutivas são realizadas na solução com o objetivo de atingir um ótimo local. No procedimento de mudança de vizinhança, se for obtido uma solução melhor, a atual será substituída pela nova solução.

4.1 FASE CONSTRUTIVA

Na fase construtiva da heurística proposta, diversos critérios são estabelecidos para associar as unidades que serão atendidas por cada aeronave. Para isso, tanto as aeronaves quanto as unidades foram classificadas por esses critérios e combinadas entre

si, gerando um conjunto de soluções. A melhor dessas soluções ser a considera a solução inicial.

Os critérios (C_A) definidos para as aeronaves foram: menor custo; maior capacidade; maior autonomia; maior quantidade de unidades aptas a atendimento; menor relação entre custo e quantidade de unidades aptas a atendimento; menor relação entre custo e capacidade.

Enquanto para as unidades foram selecionados os seguintes critérios (C_U): por menor distância a base; por maior distância a base; por maior demanda; por menor demanda; pela menor relação entre distância e demanda; pela menor relação entre tempo de voo e demanda; pela menor relação entre distância, demanda e aeronaves aptas a pouso.

O objetivo dessa fase é criar um conjunto de soluções que explora o espaço de combinações de priorização das unidades e aeronaves de forma determinística. Como exemplo, em uma solução ser ao alocadas as unidades mais próximas do aeroporto para aeronaves de menor porte; em outra solução serão alocadas as unidades mais distantes para aeronaves de grande porte, ou ainda, unidades mais próximas para aeronaves com melhor relação custo por capacidade, e assim todas as combinações entre C_U e C_A .

Segundo o Algoritmo 1, para a construção de cada solução inicial, escolhe-se uma forma de ordenar as aeronaves pelo critério $c_a \in C_A$ e obtém-se a lista de aeronaves ordenadas l_A ; e de forma semelhante, ordena-se as unidades pelo critério $c_u \in C_U$, e obtém-se a lista de unidades ordenadas e ainda não atendidas l_U , para assim construir uma solução. Seja *soluções*, o conjunto de soluções iniciais, o Algoritmo 1 descreve a fase construtiva.

Algoritmo 1: Rotina para criação de soluções iniciais.

1	Função CriarSoluçõesIniciais()
2	Para cada critério c_u de C_U faça
3	Para cada critério c_a de C_A faça
4	$l_U \leftarrow$ ordenaUnidadesPor(c_u);
5	$l_A \leftarrow$ ordenaAeronavesPor(c_a);
6	<i>soluções</i> \leftarrow <i>soluções</i> \cup {ConstróiUmaSolução(l_U, l_A)};
7	retorna <i>soluções</i> ;

[Autores, 2021].

Para cada combinação de C_U e C_A , uma solução é gerada conforme Algoritmo 2. As unidades são alocadas para uma aeronave ao longo da semana enquanto houver

demanda de passageiros a ser atendida e espaço de tempo para que a aeronave possa realizar o voo, desde todas as restrições de voo tenham sido verificadas.

Algoritmo 2: Rotina para criação de uma solução.

```
1  Função ConstróiUmaSolução
2  ( $l_U, l_A$ )
3   $t \leftarrow$  criaTabelaVazia();
4  Para cada unidade não atendida  $u$  de  $l_U$  faça
5  Para cada aeronave  $a$  de  $l_A$  faça
6  Enquanto  $a$  pode atender  $u$  faça
7  Para cada dia da semana
8  Se todas as restrições forem respeitadas então
9   $v \leftarrow$  Cria voo para  $u$  usando  $a$  inserindo como último voo da aeronave;
10 Inseire voo  $v$  na tabela  $t$ ;
    retorna  $t$ ;
```

[Autores, 2021].

Uma vez obtido esse conjunto de soluções, então, elas passam por um refinamento ou busca local, na qual nenhuma informação aleatória é introduzida. Após a busca local, todas as soluções são avaliadas e aquela com o menor custo será a solução inicial para a fase de Refinamento VNS.

4.2 BUSCA LOCAL

O objetivo da busca local é reduzir o espaço de tempo ocioso da aeronave em solo. Logo, aeronaves com poucos voos ou menor quantidade de horas voadas são excluídas, a fim de reorganizar a solução priorizando aeronaves já utilizadas e com maior quantidade de horas de voos, conforme pode ser visto no Algoritmo 3.

Algoritmo 3: Busca Local Desenvolvida.

```
Função BUSCA_LOCAL_DETERMINISTICA ( $t$ )
Enquanto melhora a solução faça
AlteraSolucaoExcluindoAerovavesMenosVoosDia( $t$ );
AlteraSolucaoExcluindoAerovavesMenosVoosGrade( $t$ );
retorna  $t$ ;
```

[Autores, 2021].

Primeiramente, o algoritmo tenta excluir voos de aeronaves pouco usadas no dia na tabela de voos t , e redistribui a demanda de passageiros, priorizando as aeronaves mais usadas - com maior quantidade de horas de voos - função *AlteraSolucaoExcluindoAerovavesMenosVoosDia*.

Em seguida, o algoritmo verifica as aeronaves remanescentes e obtém aquela com a menor quantidade de horas voadas (que tenham, no total, menos horas de voo ao longo

da semana), retira os voos dessas aeronaves da tabela e reconstrói a solução priorizando as aeronaves mais usadas - função *AlteraSolucaoExcluindoAerovavesMenosVoosGrade*.

4.3 FASE REFINAMENTO VNS

O método VNS proposto é apresentado no Algoritmo 4. As iterações são repetidas até que a quantidade máxima de iterações (i_{max}) seja alcançada. Cada iteração é composta de 3 fases: embaralhamento, busca local e mudança de vizinhança.

Na fase de Embaralhamento, alguns voos são trocados por outras aeronaves que tenham condições de realizá-lo. O algoritmo realiza trocas aleatórias de voos entre aeronaves e define um parâmetro no qual uma quantidade mínima de trocas de voo deve ser realizada na grade. Porque a mudança de apenas um voo na grade não provoca alterações sensíveis na tabela de voos, a alteração torna-se interessante quando há a possibilidade de substituição de uma aeronave no dia, ou na grade. A fase de busca local foi descrita na Seção 4.2 e, por fim, a mudança de vizinhança será apresentado no Algoritmo 5. No final, o algoritmo retorna a melhor solução obtida ao longo de todo processo armazenada na variável global $x_{melhorSolucao}$.

Algoritmo 4: Algoritmo VNS Desenvolvido.

1	Função VNS
2	Para i de 0 até i_{max} faça
3	$k \leftarrow 1$;
4	Repita
5	$x' \leftarrow \text{Embaralhamento}(x)$
6	$x_n \leftarrow \text{BuscaLocal}(x')$
7	$x, k \leftarrow \text{MudancaVizinhanca}(x, x_n, k)$
8	se ($i \geq i_{MAX\ MELHOR\ SOLUCAO}$) então
9	$x \leftarrow \text{MelhoresSolucoes.ExtrairPrimeiro}()$;
10	até $k > k_{max}$;
11	retorna $x_{melhorSolucao}$;

[Autores,2021].

O método de troca de vizinhança (*MudancaVizinhaca* - Algoritmo 5) e semelhante à variantes SVNS (*Skewed Variable Neighborhood Search*) ([Gendreau e Potvin, 2010]). Nessa variante, o objetivo é superar os vales da função objetivo. Uma vez que um ótimo local de uma larga região tenha sido atingido, é necessário dar um grande salto para buscar o ótimo global e, no caso, o uso de alterações aleatórias pode degenerar a solução, ou demorar muito tempo para convergir. Logo, na abordagem do SVNS, um novo parâmetro α é introduzido para definir a distância da solução atual ao ótimo local.

Assim que uma solução supera a melhor solução obtida até aquele momento no valor de α , ela é armazenada, ou seja, a mudança de vizinhança somente ocorre quando

a diferença de $f(x) - f(x') > \alpha$. O valor do parâmetro é definido empiricamente, de forma a escapar dos vales, porém não muito alto para não degenerar a solução, nem muito pequeno que aumentar a frequência de mudanças de vizinhança.

Algoritmo 5: Rotina Mudança de Vizinhança.

```
Função MudançaVizinhança(x,xn,k)
se xn < (α * x) então
    x ← xn;
    k ← 1;
senão
    k ← k+1;
se xn < xmelhorSolucao então
    MelhoresSoluções ← MelhoresSoluções ∪ xn;
    xmelhorSolucao ← xn;
retorna x,k;
```

10

[Autores,2021].

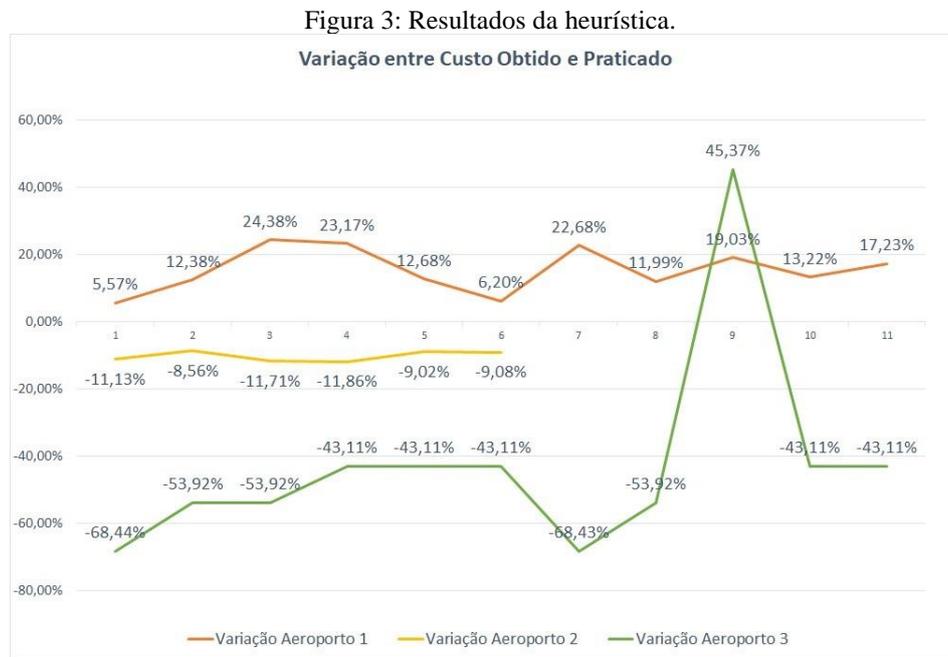
O parâmetro α é utilizado na heurística, porém no formato percentual. Sempre que uma solução supera a $x_{melhorSolucao}$ no valor percentual de α , a vizinhança é modificada. E se superar a melhor solução obtida até aquele momento, ela é armazenada no vetor de *MelhoresSoluções* para uma revisita ao espaço de soluções.

No final da iteração do Refinamento VNS (linha 8 - Algoritmo 4), sempre que completar *iMAX_MELHOR_SOLUCAO* iterações, as melhores soluções contidas no vetor *MelhoresSolucoes* sejam revisitadas. Essa estratégia ocorre a fim de realizar uma busca em largura no espaço de soluções, e foi definida inicialmente com o objetivo de explorar o espaço das soluções iniciais. No entanto, a estratégia se mostrou interessante por passar mais tempo explorando as vizinhanças de soluções que tem características de ótimo local, as quais podem estar presentes em soluções ótimas.

5 RESULTADOS OBTIDOS

Os testes foram realizados em um notebook Intel(R) Core(TM) i5-10210U CPU 1.6 GHz 2.11GHz 8GB de disco; SO Windows 10 64bits. As 2 séries de testes apresentadas nesse artigo, consumiram tempo computacional entre 24s e 03m 47s. Os valores de parâmetros para a primeira série de testes, dos Aeroportos 1, 2 e 3, foram: $i_{max} = 100.000$, $k_{max} = 500$, $\alpha = 1$, e $iMAX_MELHOR_SOLUCAO = 5.000$. Na segunda série, na qual apenas o Aeroporto 1 foi testado com a função objetivo relaxada, utilizou-se os valores dos parâmetros: $i_{max} = 200.000$, $k_{max} = 500$, $\alpha = 1.001$, e $iMAX_MELHOR_SOLUCAO = 10.000$.

Os resultados foram comparados com as tabelas de planejamento praticadas pela empresa no período de agosto a outubro de 2020 em 3 aeroportos da Bacia de Campos. Os valores são apresentados em valores percentuais em relação ao custo praticado conforme gráfico da Figura 3 e descrito a seguir.



[Autores, 2021].

O Aeroporto 3 suporta a maior parte de passageiros não previstos, logo a grade adotada pelo setor de transporte e bastante esparsa com muitos espaços vazios para alocação de novos voos na rota. Nesse caso, a heurística identificou essa ociosidade e reduziu significativamente o valor do custo adotado, com redução de custo variando entre -43,11% a -68,44% - ver gráfico da Figura 3. Isso implica dizer que o setor de transporte aéreo pode utilizar a heurística como forma de atender a demanda extraordinária e reduzir o seu custo de trabalho, obtendo como resultado final um roteamento mais enxuto.

No caso do Aeroporto 2, a heurística superou a ferramenta de otimização, com o valor dos custos obtidos pela heurística em torno de -10% sobre o valor real dos custos praticados pelo transporte aéreo - ver gráfico da Figura 3. Esse resultado pode ser obtido devido ao fato de que, no Aeroporto 2 e no aeroporto 3, a grade gerada para o roteamento das aeronaves e esparsa para inserção de novos voos para atendimento de demanda de passageiros não previstas. Segundo [Bastos, 2020], 55% dos dias do ano há atendimento de demanda não prevista, e a maior parte dessa demanda é direcionada para os Aeroportos

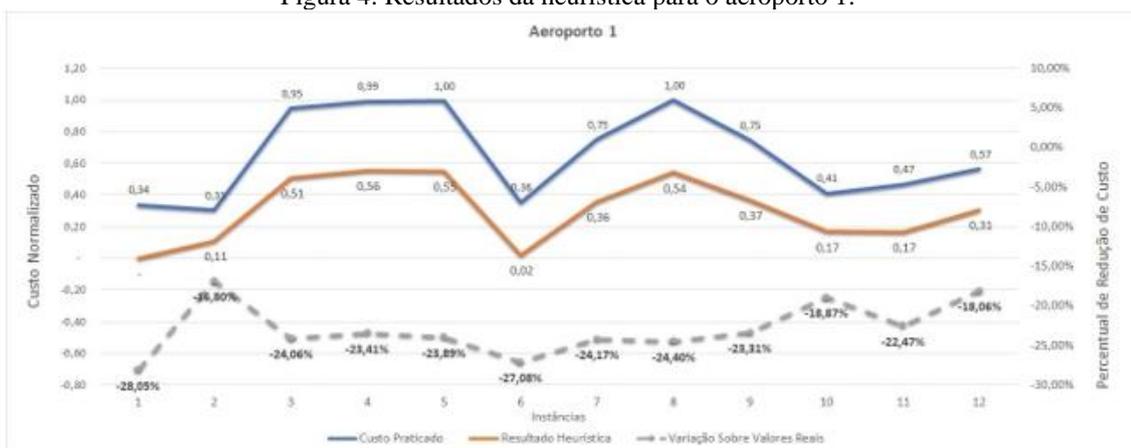
2 e 3. Logo, no planejamento desses aeroportos, várias janelas de tempo são deixadas vazias para encaixe de novos voos que sejam necessários atendimento de demanda extra ou para recuperação de atrasos ou transferências de voos de aeronaves.

E no caso do Aeroporto 1, a heurística não superou a ferramenta de otimização de longo tempo utilizado pelo setor, exceto em uma instância do problema. Os resultados foram analisados para identificar o motivo dessa questão e serão apresentados a seguir. A variação do custo obtido pela heurística ficou entre 5,5% e 23,44% sobre o valor do custo da rota praticada, como pode ser observado no gráfico da Figura 3. As instâncias tratadas no caso do aeroporto 1 trabalham com 10 aeronaves e até 40 unidades.

Ao analisar os resultados do aeroporto 1, verificou-se que, nos casos reais, algumas aeronaves eram alocadas no dia para realizar poucos voos. Essas aeronaves estão previamente contratadas e ficam à disposição da companhia. Isso permitia que a equipe realizasse poucos voos no dia com uma aeronave com o objetivo de reduzir custo. Então, uma nova bateria de testes foi realizada na qual o objetivo de reduzir a quantidade de aeronaves utilizadas foi retirado.

Os custos dos voos reais foram recalculados de forma a não incluir o custo fixo das aeronaves e uma nova bateria de testes foi realizada. O gráfico da Figura 4 apresenta os resultados obtidos, os custos praticados e os custos obtidos pela heurística normalizados, e o percentual de redução de custo.

Figura 4: Resultados da heurística para o aeroporto 1.



[Autores, 2021]

Ocorreu uma melhora significativa dos custos e não foi necessário compactar tanto a rota das aeronaves em um mesmo dia para forçar a redução da quantidade de aeronaves utilizadas. A heurística forçava o uso máximo de uma aeronave em um dia, a

fim de não colocar uma nova em atividade. Com essa relaxação, notou-se aeronaves realizando um único voo no dia, e houve redução do custo total, sem necessariamente aumentar a quantidade total de aeronaves utilizadas.

6 CONCLUSÃO

Observando as instâncias das tabelas praticadas na empresa, verificou-se que elas não são otimizadas em virtude da necessidade de adaptação do modelo planejado ao modelo realizado durante a fase de operação. Uma vez que o planejamento deve permitir a constante inserção de demandas extras. Portanto, a necessidade de otimização se torna necessária em todas as fases do transporte aéreo: estratégico, tático e operacional.

O emprego dessa heurística na ferramenta de gestão utilizada pela empresa, torna possível a otimização do planejamento com resultados de qualidade, como apresentado nos resultados obtidos. E também pode ser utilizada durante a fase de operação, uma vez que a heurística VNS permite melhorar uma solução sem desconstruí-la totalmente. Logo, o planejamento tático pode ser mantido na solução enquanto novas demandas podem ser inseridas. Para isso, basta impedir que a fase de embaralhamento e busca local altere os voos já estabelecidos durante a fase de planejamento.

Diante dos resultados obtidos com a melhoria nos custos da tabela de voos, a heurística pode ser aplicada a nível de planejamento tático e operacional desdobrando em ganhos financeiros para a empresa.

REFERÊNCIAS

Bastos, Y. B. (2020). *Uma abordagem estocástica para a otimização da programação de voos offshore*. Pontifícia Universidade Católica do Rio.

Departamento do Controle do Espaço Aéreo (2018). Reestruturação de espaço aéreo da área de controle terminal (TMA) de Macaé com aplicação do sensor ADS-B, aumento da cobertura VHF, implementação do conceito de espaço aéreo exclusivo ADS-B e provimento de produtos meteorológicos a partir de EMS-A. AIC 47/18.

Elshaer, R. e Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering*, 140:106242. ISSN 0360-8352.

Gendreau, M. e Potvin, J.-Y. (2010). *Handbook of Metaheuristics*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2nd edition. ISBN 1441916636.

Heringer, F. M. (2020). *Estratégias de redução de custos nas operações de transporte aéreo offshore*. PUC-RIO.

Hermeto, N. d. S. S., Filho, V. J. M. F., e Bahiense, L. (2014). Logistics network planning for offshore air transport of oil rig crews. *Computers & Industrial Engineering*, 75:41 – 54. ISSN 0360-8352.

Hermeto, T. e Minette, R. (2019). Treinamento e fundamental para segurança do transporte aéreo offshore. *Notícias Petrobras*. URL http://portalpetrobras.petrobras.com.br/PetrobrasPortal/appmanager/portal/desktop?_nfb=true&_pageLabel=dctm_noticia_ep&idConteudo=noticia_065682&areaAtual=servep&portalpath=portal.

Hermeto, T. S. (2014). *Análise de tráfego aéreo por meio simulação fast-time: caso aviação offshore de helicópteros*. Instituto Tecnológico de Aeronáutica.

Mendes, G. V., Lopes, L. A. S., e da Silva Junior, O. S. (2019). Otimização do transporte de passageiros por helicópteros em operações offshore. *33o Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET*.

Mendes, G. V., Lopes, L. A. S., e da Silva Junior, O. S. (2020). Proposta de otimização do transporte de passageiros por helicópteros em operações offshore da Petrobras / proposal to optimize passenger transport by helicopters in Petrobras' offshore operations. *Brazilian Journal of Development*.

Mladenovic, N. e Hansen, P. (1997). Variable neighborhood search. *Computers and Operations Research*, 24:1097–1100.

Moller, E. B., de Fátima Dianin Vianna, M., Vianna, D. S., e Meza, E. B. M. (2017). Definição de nível de serviço para situação de crise no transporte aéreo offshore utilizando o método AHP –analytic hierarchic process. *XLIX Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*.

Moller, E. B., Vianna, D. S., Vianna, M. d. F. D., e Meza, E. B. M. (2018). Análise multicritério a decisão na definição de nível de serviço para situação de crise no transporte aéreo offshore. *LinkSciencePlace-Interdisciplinary Scientific Journal*, 4(4).

Mota, L., Rocha, K., Souza, T., Jesus, E., Junior, A. O., Soletti, J., e Carvalho, S. (2014). *The ant colony optimization algorithm for offshore air transport in the northeast of Brazil*. ENGOPT 2014.

Motta, A. R. V. (2013). *Otimização de rotas de helicópteros offshore utilizando algoritmo genético*. Universidade Federal de Alagoas.

PETROBRAS (2019). Pré-sal. URL <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/exploracao-e-producao-de-petroleo-e-gas/pre-sal>.

PETROBRAS (2021). Plano estratégico 2021-2025. URL <https://petrobras.com.br/pt/quem-somos/plano-estrategico>.

Qian, F., Gribkovskaia, I., Laporte, G., e Øyvind Halskau sr. (2012). Passenger and pilot risk minimization in offshore helicopter transportation. *Omega*, 40(5):584 – 593. ISSN 0305-0483.

Sena, N. d. S. e Filho, V. J. M. F. (2010). Localização de aeroportos para transporte de pessoas para atividades de exploração e produção de petróleo offshore. *Simpósio de Transporte Aéreo*.

Sena, N. d. S., Filho, V. J. M. F., e da Silva Leite, L. S. B. (2011). *Planejamento de rede logística de transporte aéreo de pessoas para atividades de exploração e produção de petróleo em bacia marítima utilizando programação inteira mista*. COPPE.

Soletti, J. I., Carvalho, S. H. V., Sousa, C. J., e Oliveira, J., A. M. (2014). *Helicopter routing problem applied to offshore platforms*. ENGOPT 2014.