LIV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional
Juiz de Fora, MG - 8 a 11 de novembro de 2022

ANÁLISE MULTICRITÉRIO E ROTEIRIZAÇÃO APLICADAS À LOGÍSTICA DE TRANSBORDO EMERGENCIAL ENTRE UNIDADES *OFFSHORE* NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Marcelo da Silva Pereira
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Aluizio da Silva Gomes, 50 - Novo Cavaleiros, Macaé - RJ, Brasil
marcelo.pereira.rj@gmail.com

Matheus Ferreira de Barros
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Av. Aluizio da Silva Gomes, 50 - Novo Cavaleiros, Macaé - RJ, Brasil
matheusferreira.ufrj@gmail.com

Isabella Fischer Guindani Vieira
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro
Rua Marquês de São Vicente, 225, Gávea - Rio de Janeiro, RJ, Brasil
isabellafischer@tecgraf.puc-rio.br

RESUMO

A logística do transporte marítimo na indústria do petróleo é diversificada e dinâmica. Na bacia de Campos, o modelo de transbordo emergencial envolve certa complexidade na montagem do roteiro de visitas às unidades, e depende totalmente do conhecimento prático de especialistas. A sequência de atendimento deve considerar requisitos de validade, critérios de valor e hierarquização e buscar a economia do transporte. Este artigo realiza uma alternativa sobre os possíveis meios de decisão de atendimento para estes transbordos entre as unidades de produção, tratamento e/ou armazenamento *offshore* através de um método híbrido, composto por um método multicritério (Promethee II) e um algoritmo de roteamento de veículos (*Pickup and Delivery* com janelas de tempo). Na avaliação final, foi possivel verificar a escolha de rotas que consideram um complexo cenário de decisão, utilizando dados reais e comparações com decisões já tomadas por especialistas da área.

PALAVRAS CHAVE. Logística do petróleo. Apoio multicritério a decisão. Roteamento de veículos

Tópicos: PDPIP – Problemas de coleta e entrega na indústria do petróleo. ODM – Ordenação de demandas por multicritérios. MP – Mapeamento de processos.

ABSTRACT

The logistics of maritime transportation in the oil industry is diversified and dynamic. In the Campos Basin, the emergency transhipment model involves some complexity in assembling the route for visits to units and depends entirely on the practical knowledge of specialists. In addition, the service sequence must consider validity requirements, value and hierarchization criteria, and seek transport economy. This paper performs an alternative about the possible means of attendance decision for these transhipments among production, treatment and/or offshore storage units through a hybrid method composed of a multicriteria method (Promethee II) and a vehicle routing algorithm (Pickup and Delivery with time windows). In the final evaluation, it was

possible to verify the choice of routes considering a complex decision scenario, using actual data and comparisons with decisions already made by experts in the area.

KEYWORDS. Oil Logistics. Multi-criteria Decision Support. Vehicle Routing

Paper topics: PDPOI - Pick-up and delivery problems in the oil industry. ODM – Ordering of demands by multi-criteria. PM – Process Mapping.

1. Introdução

Segundo a ANP, as reservas de petróleo provadas no Brasil beiram os 13,4 bilhões de barris de óleo em 2018. Essa quantidade estocada vem aumentando consideravelmente após a descoberta do pré-sal e do aumento da atividade exploratória nas áreas de águas ultra profundas das bacias brasileiras. Segundo a [Abespetro 2019], o setor de petróleo e gás compreende cerca de 13% do PIB brasileiro e embora existam políticas que busquem apoio em fontes energéticas sustentáveis, a demanda por petróleo e gás cresce cada vez mais nos países emergentes, inclusive no Brasil.

Esse segmento da indústria frequentemente enfrenta diversos desafios logísticos dentro do seu processo de crescimento. Isso ocorre porque a complexidade da cadeia de suprimentos desse setor varia diretamente em relação ao tamanho do escopo de atuação dessas empresas [Chopra, 2004]. Algumas delas possuem processos que compreendem grande parte, senão, todas as etapas desse processo. A interdependência entre essas etapas causa ainda maiores riscos e incertezas para a logística dessas empresas, consequentemente, afetando a respectiva competitividade nos mercados globais.

Dentre as etapas dessa cadeia produtiva, o segmento da cadeia de suprimentos que exige maior atenção é o *upstream*. Nesse segmento se encontra toda a infraestrutura relacionada a exploração e produção de petróleo. Esse setor, sozinho, consegue consumir quase 70% dos dispêndios da indústria, dando origem a toda cadeia de valor e centralizando as possibilidades de geração de riqueza e apropriação de renda [Filho, 2016]. A logística desse segmento trabalha com projetos cuja natureza utiliza cargas superdimensionadas e pesadas, que necessitam ser entregues rapidamente ao seu destino, principalmente quando se trata de áreas remotas como ocorre na exploração e produção *offshore*. Além disso, o impacto financeiro em caso de falhas ou inatividades são extremamente altos e custosos para as empresas.

Diante de inúmeras demandas logísticas, saber quais delas possuem maior gravidade, maior urgência e/ou tendência de piora dentre as diversas unidades requisitantes se torna imprescindível e pode colocar a empresa frente aos seus concorrentes. Nesse imbróglio, as empresas têm investido cada vez mais em sistemas logísticos modernos que possam auxiliar a gestão logística a mitigar a maioria das falhas, dentre elas as de priorização [Simchi-Levi, 2003].

Dentre as diversas modalidades de atendimento logístico *offshore* da empresa escolhida neste estudo, a modalidade de transbordo marítimo (movimentação de materiais entre unidades marítimas) na bacia de Campos não é contemplada com nenhum tipo de sistema de apoio a decisão, nem para priorização e nem para roteamento. Apesar de possuir um funcionamento pontual, a necessidade de organização do atendimento dessas demandas está sujeita a distúrbios relacionados aos barcos de apoio e/ou às condições meteoceanográficas. Normalmente nessa indústria, o roteiro das embarcações de transbordo é feito de maneira empírica pelos colaboradores, ou seja, suas análises na montagem dos requisitos de priorização e roteirização das embarcações ocorrem a partir do conhecimento prático acumulado, experimentação e/ou observação, sem atuação de métodos científicos existentes. Por consequência, há erros que poderiam ser mitigados, como falhas de atendimento ou a ausência de otimização no roteiro de visitas às unidades. Tais erros resultam em perdas de prazos, reagendamento de equipes e diversos outros custos associados.

Diante de tal cenário, a proposta deste artigo é criar uma alternativa de procedimento que otimize o processo de atendimento de transbordo entre unidades marítimas em uma empresa do setor petrolífero, atribuindo o foco principal na redução do tempo operacional das embarcações levando em conta os critérios associados a demanda e gerando, portanto, redução de custos associados.

2. Metodologia

A otimização do processo de atendimento de transbordos visa criar um procedimento científico para o atendimento às demandas das unidades marítimas requisitantes. Para isso, são definindas prioridades através do método PROMETHEE e rotas de atendimento factíveis por meio de algoritmos de roteamento de veículos do tipo *Pickup and Delivery Problem* (PDP) com janelas de tempo, conforme desenvolvido em [Parragh et al. 2008], [Dumas et al. 1991], [Ropkeet et al. 2007] e [Braekers 2016]. A necessidade de utilizar conjuntamente diferentes métodos se dá pela complexidade do problema, onde não só é necessário minimizar o tempo gasto por cada embarcação para percorrer sua rota, mas também atender requisitos de segurança, meio ambiente, e impactos de eventuais atrasos, por exemplo.

O procedimento desta pesquisa parte da coleta de dados do problema. Faz parte dessa coleta conhecer o fluxo das informações do processo, os requisitos para um transbordo e os seus critérios para a priorização. Todas as informações foram definidas a partir de questionários virtuais criados pelo site “monkeysurvey.com” e respondidos pelos colaboradores. Também foram consultados padrões de processo vinculados a programação de transbordos existentes na empresa e informações retiradas diretamente dos sistemas de acompanhamento.

Da posse dessas informações e de sua organização, são obtidas as entradas e critérios do procedimento de análise multicritério. Casos reais foram selecionados a partir do processo de atendimento à criação de roteiros para as embarcações, cuja lista de demandas houvesse ao menos dez demandas em espera, tornando o ambiente propício em termos de complexidade para aplicação do procedimento. Nesta etapa também foram delimitados quais os critérios válidos e como devem ser os comportamentos de cada um deles diante da amplitude de valores que estes podem aceitar. Para esta análise foi escolhido o método PROMETHEE, cuja aplicação simples permite abranger facilmente quaisquer parâmetros, os quais tenham uma interpretação física ou econômica, dentro do seu procedimento de sobreclassificação por critérios [Leite e Freitas 2011]. Os resultados da análise multicritério são obtidos de forma ranqueada, na qual cada alternativa de transbordo é identificada pelo seu fluxo líquido final. Esta análise é feita com o programa “Visual PROMETHEE”, versão 1.4.0.0 e licenciado para uso exclusivamente acadêmico.

Já na roteirização, processo distinto à análise multicritério, ocorre a coleta de dados dos tempos de viagem entre as unidades envolvidas das demandas de transbordo, as janelas de tempo operacional dessas unidades e quantas embarcações estão disponíveis para o atendimento a essas demandas. Dentro da matriz dos tempos de viagem entre as unidades, ocorre a adequação e penalização desses tempos de modo proporcional à colocação da demanda no ranking de priorização. Ou seja, quanto mais priorizada a demanda na ordenação da análise multicritério, maior será o desconto no tempo do trajeto da matriz de tempo, de forma a promover o seu atendimento dentro do processo. Esse processo de alteração na matriz de tempo é o que permite a interação entre o método multicritério (que proriza as demandas segundo critérios elencados pelos especialistas) e o modelo de roteamento de veículos.

Todos os dados são essenciais para a execução do algoritmo PDP cujo resultado nos trará o roteiro das embarcações. O algoritmo utilizado possui como principal referência, uma biblioteca *open source* chamada ORTOOLS, versão 7.6.7691, criado pela Google e responsável pelas principais funções do processo de roteirização. Seu código neste estudo foi adaptado para a linguagem Python e executado na IDE PyCharm, versão 2020.1.4. A responsabilidade da

montagem e adaptação do algoritmo foi realizada pelo próprio autor com base nos exemplos e funções pré-programadas.

3. Aplicação

A aplicação deste estudo foi realizada sobre as necessidades logísticas entre unidades *offshore* de uma empresa de extração e produção de petróleo na bacia de campos. Todo material, procedimentos e dados descritos no decorrer do texto foram adaptados diretamente do seu processo.

3.1 O processo de programação de transbordos diretos

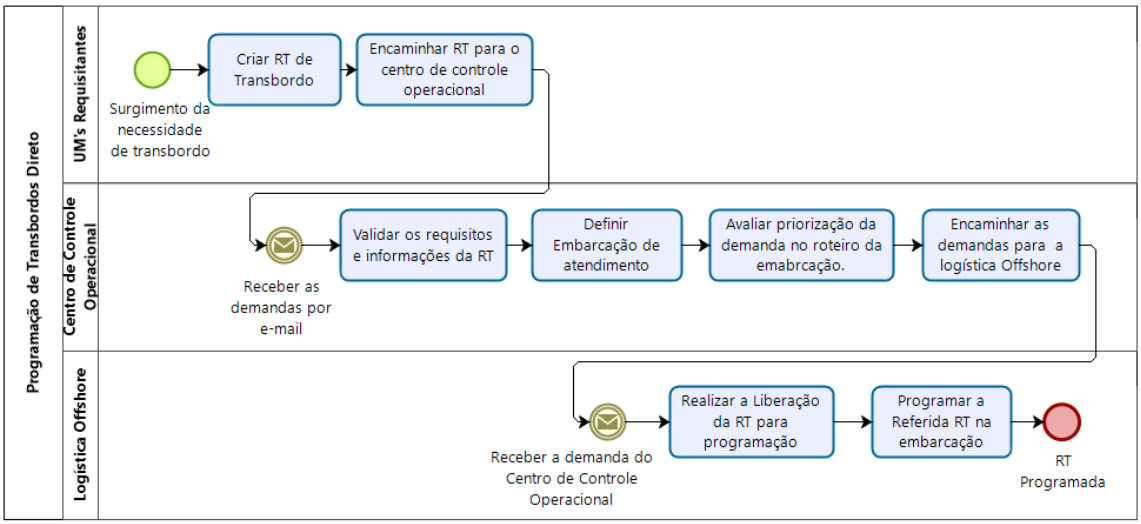
Para descrever o procedimento de programação das demandas de transbordos, deve-se buscar quais os requisitos para que um transbordo direto seja validado, quem são os principais *stakeholders* do processo, qual a função de cada um deles no processo, como ocorre o fluxo de informações do pedido até a programação na embarcação e como ocorre o seu atendimento pela embarcação.

Para evitar ocorrências de transbordos diretos com baixa importância, a empresa adotou em seu padrão de execução alguns requisitos para que o transbordo seja atendido. Além de requisitos, a sequência na qual foi determinada auxiliará no processo de definição dos critérios deste procedimento. A demanda deverá atender a um dos itens abaixo:

• Risco iminente a segurança das pessoas e instalações;
• Impacto a habitabilidade (rancho, água, diesel, baleeira ...);
• Recuperação de perda de produção e\ou risco de perda de produção;
• Equipamento SO (segurança operacional) - equipamento ou material necessário para a normalização de equipamento de segurança operacional em redundância (guindaste, baleeira, gerador de emergência, bomba de incêndio...);
• Atendimento a item legal com prazo curto de vencimento (Pendências de Marinha, ANP, IBAMA, entre outros).

Todo pedido de transbordo deve ser realizado através de um formulário eletrônico de transporte, conhecido como RT. O acesso a esse formulário se dá pelo sistema ERP (*Enterprise Resource Planning*) da empresa, software que busca auxiliar na tomada de decisões gerenciais e na disponibilidade e integração das informações entre setores. Este documento possui todas as informações pertinentes ao material que será transbordado, o trajeto a ser realizado e sobre os responsáveis pela requisição, programação e atendimento.

O processo de programação de transbordos passa por 3 setores distintos: Setor requisitante (UM), Setor de Validação (Centro de Controle) e setor de programação (Logística de apoio). O fluxograma a seguir mostra o caminho percorrido pelo formulário de requisição de transporte até sua programação:



3.2 Etapa 1 – Análise Multicritério

Conforme o procedimento de programação, os transbordos são recebidos e validados pelo Centro de controle operacional. Ao tempo das chegadas de e-mails com os pedidos, ocorrem simultaneamente a programação e o atendimento de outros. Para a aplicação do nosso estudo, foram coletados 10 transbordos já validados pelos requisitos definidos pelo padrão de execução da empresa e que aguardavam em listas de atendimento. A partir desses transbordos, serão feitas todas as etapas do procedimento.

3.2.1 Definição dos critérios

A primeira necessidade encontrada no processo de hierarquização das demandas parte da definição dos critérios que podem ser empregados para determinar a prioridade destas. Para isso, foi realizado uma pesquisa entre 10 colaboradores do console de logística do centro de controle para definir o que de fato é considerado no momento da priorização. Dos 10 colaboradores a quem a pesquisa foi destinada, 8 respostas foram obtidas, sendo 4 respostas dos coordenadores e 4 respostas dos técnicos de operação.

Resumidamente, foram feitas 3 perguntas aos colaboradores a respeito dos critérios utilizados para priorizar as demandas. A primeira pergunta questionamos quais os fatores mais influenciam na decisão de uma priorização. Na segunda pergunta, hierarquizamos os fatores entre os mais e menos importantes. Na terceira questão, os colaboradores puderam escrever livremente sobre o que consideravam empecilho para uma boa decisão e quais eram os principais desafios.

A partir dessas informações, avaliou-se que alguns critérios eram associados ao roteiro adotado pelas embarcações e outros eram associados diretamente a natureza da demanda. Além disso, devido à dificuldade de previsibilidade e adaptação, critérios relacionados às condições meteoceanográficas foram desconsiderados no nosso procedimento e serão tratados como limitações do estudo.

O critério “Prazo de Atendimento” relaciona-se com as duas etapas do procedimento. Primeiramente, refere-se à validade da demanda pela UM e posteriormente servirá de insumo para limitar o atendimento da embarcação através de janelas de tempo para cada UM. Em ambas as etapas, o critério possui o mesmo peso.

A seguir, expõe-se uma síntese dos critérios utilizados, já com o *score* atribuído com base das notas dadas pelos colaboradores e seu referido peso para cada etapa do procedimento:

Critérios	Score	Pesos	
Potencial de risco (de saúde, habitabilidade, ambiental, segurança...)	6,375	25%	PROMETHEE II aprox 75%
Impacto atual na produção	4,500	17%	
Potencial de impacto na produção	4,500	17%	
Prazo de Atendimento	3,875	15%	
Prazo de Atendimento	3,875	15%	PDP aprox 25%
Tempo de viagem	2,750	11%	

Tabela 1 - Pesos dos processos de análise multicritério e PDP - Fonte: Autoria própria

3.2.2 Coleta e classificação de dados de transbordo

Conforme já informado, 10 demandas de transbordo direto foram selecionadas e retiradas de uma situação real, na qual torna-se factível a aplicação do procedimento.

Gravidade das demandas conforme padrão de execução da empresa EP em ordem de prioridade:

1- Risco Iminente às pessoas e instalações - **5 pontos**
2- Risco a habitabilidade - **4 pontos**
3- Perda/Ganho de produção - **3 pontos**
4- Perda de redundancia de equipamentos SO - **2 pontos**
5- Conformidade Legal - **1 ponto**

Partida		Chegada	Produção (bbl/h)	Demanda	Potencial de risco (saúde, habitabilidade, ambiental, segurança...)	Impacto Atual na produção	Potencial de impacto na produção	Vencimento da demanda	Vencimento da demanda (Janela de tempo)	Tempo de viagem
					Padrão	bbl/h	bbl/h	h	h	h
					Maior prioriza	Menor Prioriza	Menor prioriza	Menor prioriza	PDP	
P-A13	x	P-A8	790	Refil de Biocida de Choque	3	0	-160	60		
P-A8	x	P-A6	718	Diafragma da bomba de H2S	3	0	-718	24		
P-A6	x	P-A8	790	Pendência IBAMA	1	0	-790	24		
P-A25	x	P-A24	0	Correia para ar condicionado	4	0	0	24		
P-A23	x	P-A21	178	Dissolvan - Desemulsificante	3	0	-178	36		
P-A21	x	P-A24	0	Material kit SOPEP reserva	2	0	0	36		
P-A3	x	P-A11	1826	Scavtreat - Sequestrante de H2S	3	-62,5	-1826	12		
P-A10	x	P-A16	1604	HW Oceanic - Fluido hidráulico	3	0	-1604	48		
P-A4	x	P-A11	1826	Material para bandagem de linha	5	-913	-913	24		
P-A4	x	P-A15	1356	Óleo Lubrificante para compressor	3	-678	-950	12		

Tabela 2- Demandas de transbordo selecionadas e classificadas - Fonte: Autoria própria

Na primeira coluna encontram-se as unidades nas quais serão feitas as coletas de materiais. Já na segunda e terceira colunas, respectivamente, encontram-se as unidades requisitantes desses transbordos e sua produção média diária.

O primeiro requisito de priorização foi definido através do padrão de execução da empresa e comentado anteriormente no item sobre requisitos de um transbordo. O segundo, o terceiro e o quarto requisitos tiveram suas informações retiradas do e-mail que originou o pedido.

De todos os critérios, apenas a classificação por requisito de transbordo utiliza uma relação crescente, ou seja, quanto maior o número atribuído pela demanda, maior será a sua necessidade de priorização. Já os demais critérios, possui uma relação inversa, quanto menor o valor atribuído, maior a necessidade de priorização. O desempenho das alternativas com base nos critérios pré-estabelecidos, no método PROMETHEE II, é verificado através do comportamento da curva da função de preferência.

Critérios	Curva
Potencial de risco (de saúde, habitabilidade, ambiental, segurança...)	Usual
Impacto atual na produção	Curva V (p=1.000bpd)
Potencial de impacto na produção	Curva V (p=3.000 bpd)
Prazo de Atendimento	Usual

Tabela 3- Definição das curvas de preferência dos critérios - Fonte: Autoria Própria

No critério impacto atual, o ponto que define esse comportamento equivale a 42 bbl/h. Este ponto é o gatilho utilizado pela gerência imediata para uma registros obrigatórios nos boletins internos da companhia. Essa análise é feita diariamente. Já no critério relacionado ao potencial de impacto, o gatilho é de 125 bbl/h. Quando uma unidade atinge esse nível de perda, a gerência geral da empresa deve ser comunicada e inicia-se um processo de tratamento de anomalias, a fim de verificar quais as principais causas de perda e quais os planos de ação correntes para buscar a solução do problema.

3.2.3 Aplicação do Método PROMETHEE II

A primeira etapa do procedimento termina com a consolidação da classificação das opções de transbordo. O fluxo obtido será utilizado dentro do processo de roteamento das embarcações como descontos na matriz de tempo de viagem. A partir da inserção dos dados apresentados, concluiu-se na seguinte matriz de fluxo líquido final (saída do método Promethee para a ordenção das alternativas).

Ranking	Demandas	Fluxo Líq.	Fluxo(+)	Fluxo(-)
1	P-A4 x P-A11	0,3767	0,4233	0,0467
2	P-A25 x P-A24	0,3033	0,3867	0,0833
3	P-A3 x P-A11	0,1867	0,26	0,0733
3	P-A4 x P-A15	0,1867	0,26	0,0733
5	P-A8 x P-A6	0,0467	0,1667	0,12
6	P-A23 x P-A21	-0,0933	0,12	0,2133
7	P-A10 x P-A16	-0,1633	0,0967	0,26
8	P-A13 x P-A8	-0,21	0,0733	0,2833
9	P-A6 x P-A8	-0,2833	0,0933	0,3767
10	P-A21 x P-A24	-0,35	0,0833	0,4333

Tabela 4- Fluxos das demandas de transbordo - Fonte: Autoria própria

3.3 Etapa 2 – Roteamento das embarcações (PDP)

A segunda etapa do procedimento consiste em definir as rotas das embarcações disponíveis para atendimento aos transbordos. Antes de apresentarmos quais dados são coletados para o algoritmo, torna-se importante visualizar como os transbordos escolhidos estão dispostos. Segue, um esquema gráfico baseado na localização real das unidades:

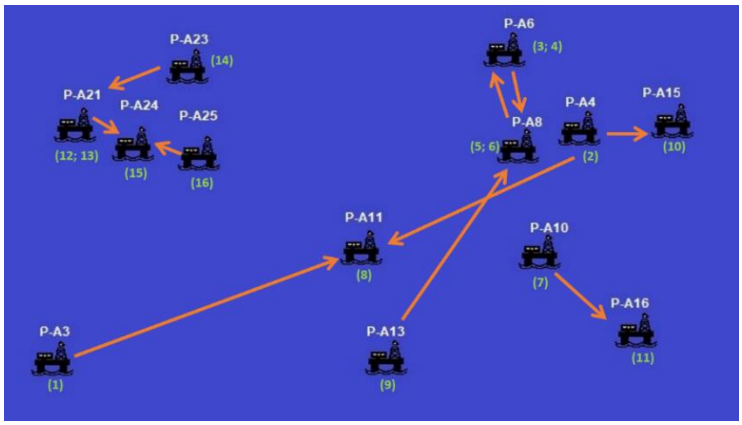


Figura 1 - Localização das UM relacionadas ao transbordo. - Fonte: Autoria Própria

3.3.1 Coleta e modelagem dos dados do processo de roteamento.

Durante a etapa de coleta de dados para a roteirização, define-se a quantidade de embarcações que devem atender as demandas de transbordos, a janela operacional de atendimento das unidades, o tempo de viagem entre cada uma das unidades envolvidas do processo, os transbordos a serem realizados, as rotas inicialmente propostas e a localização de partida da embarcação.

Neste procedimento foi definido três barcos para atendimento as alternativas de transbordo vigente. Esse número é baseado na quantidade de barcos que a empresa possui disponível para a realização do trabalho. Para a obtenção dos tempos das viagens, utilizamos programas de geolocalização da própria empresa. Foram coletadas todas as distâncias entre as unidades envolvidas e encontrado seu respectivo tempo de viagem com base na velocidade média de 6 nós. A organização dos dados é apresentada em uma matriz que será inserida e lida diretamente no algoritmo de roteamento. A janela operacional está ligada diretamente a validade das demandas. Esta informação é obtida através dos e-mails dos pedidos de transbordo.

Plataforma	Operação Original	Transbordo Python	Transbordo Original	Vencimento da demanda	Janela de tempo ajustada
P-A3	PICKUP	(01, 08)	P-A3 x P-A11	[0, 720]	(0, 720)
P-A4	PICKUP	(02, 08)	P-A4 x P-A11	[0, 1440]	(0, 720)
		(02, 10)	P-A4 x P-A15	[0, 720]	
P-A6	PICKUP	(03, 06)	P-A6 x P-A8	[0, 1440]	(0, 1440)
P-A6	DELIVERY	(05, 04)	P-A8 x P-A6	[0, 1440]	(0, 1440)
P-A8	PICKUP	(05, 04)	P-A8 x P-A6	[0, 1440]	(0, 1440)
P-A8	DELIVERY	(09, 06)	P-A13 x P-A8	[0, 3600]	(0, 1440)
		(03, 06)	P-A6 x P-A8	[0, 1440]	
P-A10	PICKUP	(07, 11)	P-A10 x P-A16	[0, 2880]	(0, 2880)
P-A11	DELIVERY	(01, 08)	P-A3 x P-A11	[0, 720]	(0, 720)
		(02, 08)	P-A4 x P-A11	[0, 1440]	
P-A13	PICKUP	(09, 06)	P-A13 x P-A8	[0, 3600]	(0, 1440)
P-A15	DELIVERY	(02, 10)	P-A4 x P-A15	[0, 720]	(0, 720)
P-A16	DELIVERY	(07, 11)	P-A10 x P-A16	[0, 2880]	(0, 2880)
P-A21	PICKUP	(12, 15)	P-A21 x P-A24	[0, 2160]	(0, 2160)
P-A21	DELIVERY	(14, 13)	P-A23 x P-A21	[0, 2160]	(0, 2160)
P-A23	PICKUP	(14, 13)	P-A23 x P-A21	[0, 2160]	(0, 2160)
P-A24	DELIVERY	(16, 15)	P-A25 x P-A24	[0, 1440]	(0, 1440)
P-A25	PICKUP	(16, 15)	P-A25 x P-A24	[0, 1440]	(0, 1440)

Tabela 5- Consolidação da janela de tempo das demandas de transbordo - Fonte: Autoria própria

3.3.2 Penalização da matriz tempo

Nossa penalização consiste em realizar um desconto sobre o tempo de atendimento das unidades envolvidas nas demandas de transbordo. Cada par ordenado da matriz representa o tempo de locomoção de uma embarcação entre as unidades do eixo X e o eixo Y. Considerando o peso do método PROMETHEE de 75%, definimos o desconto máximo da matriz de tempo. Tal valor de 75% foi calculado com base no questionário sobre a importância dos critérios entre si. Basicamente, quando a demanda tiver alcançado o nível mais alto possível do fluxo líquido final (+1), realizamos um desconto de 75% do tempo. Quando o fluxo líquido final for o menor possível (-1), o desconto é nulo. Esse cálculo é baseado na colocação da demanda no *ranking* de prioridades resultante da aplicação do método PROMETHEE.

Com isso, resultamos na seguinte tabela de descontos para as prioridades de transbordo:

Demandas de Transbordo	Phi	Desconto na matriz tempo
P-A4 x P-A11	0,377	51,63%
P-A25 x P-A24	0,303	48,87%
P-A3 x P-A11	0,187	44,50%
P-A4 x P-A15	0,187	44,50%
P-A8 x P-A6	0,047	39,25%
P-A23 x P-A21	-0,093	34,00%
P-A10 x P-A16	-0,163	31,38%
P-A13 x P-A8	-0,210	29,63%
P-A6 x P-A8	-0,283	26,88%
P-A21 x P-A24	-0,350	24,38%

Tabela 12- Descontos da matriz de tempo - Fonte: Autoria própria

3.3.3 Aplicação do algoritmo PDP

Após a definição dos transbordos envolvidos, da quantidade de barcos envolvidos, da matriz penalizada e da janela de tempo, esses elementos foram inseridos como as entradas dentro do algoritmo de rotamento. Considerando o modelo matemático proposto no referencial teórico, temos as seguintes variáveis:

n= 9 vértices de coleta
ñ= 7 vértices de entrega
P= {P-A3, P-A4, P-A6, P-A8, P-A10, P-A13, P-A21 P-A23, P-A25}
D= {P-A6, P-A8, P-A11, P-A15, P-A16, P-A21, P-A24}
K= {k_1, k_2, k_3}
$A=\{(i,j):i,j \in V, i \neq n+ñ+1, j \neq 0, i \neq j\}$, onde $V=\{0,n+ñ+1\} \cup P \cup D$

P é o conjunto dos vértices que ocorrem coleta.
D é o conjunto dos vértices que ocorrem entrega.
{0, n+ñ+1} é o conjunto do ponto de origem da embarcação (ponto de início {0} onde a embarcação sai vazia) e o ponto de destino da embarcação ao final do atendimento (ponto final {n+ñ+1} onde a embarcação chega após o roteiro).

No caso do nosso procedimento, desconsideramos esses pontos, tanto o de início quanto o ponto final da embarcação. Levamos em conta apenas o tempo de atendimento a partir da chegada para coleta na primeira unidade e na entrega da demanda na última unidade.

Uma das alterações mais sensíveis no algoritmo realizado é que o custo de percurso associado no trajeto (i, j) pelo veículo k na função objetivo é trocada pelo tempo a fim de minimizar o tempo de percurso total. Assim, resultamos na seguinte função objetivo:

$$F_{obj} = \min \sum_{k \in K} \sum_{(i,j) \in A} t_{ij}^{k} x_{ij}^{k}$$

Ainda como possibilidade de insumo para análise a efeito comparativo, incluímos no mesmo algoritmo a solução oferecida pelos colaboradores da empresa e realizado durante as operações reais da empresa. Adiante apresentamos o esquema gráfico e a tabela resultante deste processamento.

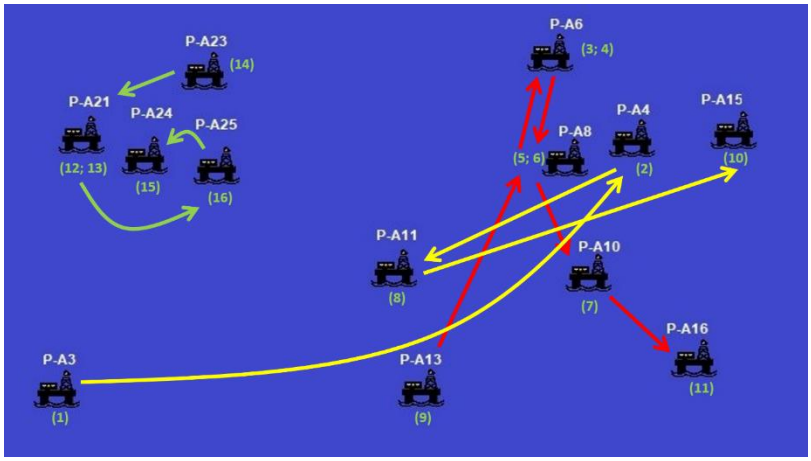


Figura 2- Esquema gráfico do roteiro original realizado pela empresa. - Fonte: Autoria própria

		Rota Percorrida						TOTAL
Embarcação 1	Rota	P-A3	P-A4	P-A11	P-A15			644
	Tempo Acum. (min)	0	319	465	644			
Embarcação 2	Rota	P-A13	P-A8	P-A6	P-A8	P-A10	P-A16	375
	Tempo Acum. (min)	0	162	206	250	315	375	
Embarcação 3	Rota	P-A23	P-A21	P-A25	P-A24			93
	Tempo Acum. (min)	0	49	87	93			
Total de minutos para todas as embarcações								1112

Tabela 6- Resultados do roteiro original. - Fonte: Autoria própria

Abaixo, apresenta-se o roteiro adaptado e encontrado pelo algoritmo como solução factível e mais otimizada:

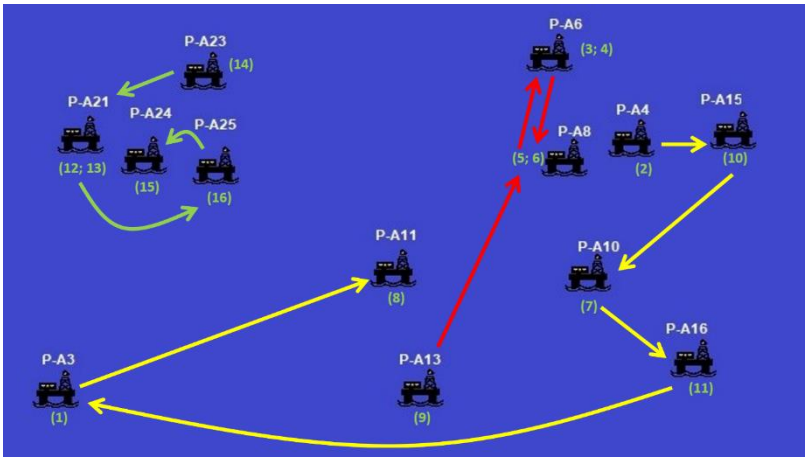


Figura 3- Esquema gráfico do roteiro otimizado gerado pelo algoritmo. - Fonte: Autoria Própria

		Rota Percorrida						TOTAL
Embarcação 1	Rota	P-A23	P-A21	P-A25	P-A24			93
	Tempo Acum. (min)	0	49	87	93			
Embarcação 2	Rota	P-A4	P-A15	P-A10	P-A16	P-A3	P-A11	671
	Tempo Acum. (min)	0	38	130	190	498	671	
Embarcação 3	Rota	P-A13	P-A8	P-A6	P-A8			250
	Tempo Acum. (min)	0	162	206	250			
Total de minutos para todas as embarcações								1014

Tabela 7- Resultados do roteiro otimizado. - Fonte: Autoria Própria

Uma questão a se considerar é que os resultados aqui apresentados são tempos médios e não levam em conta o tempo de operação com as unidades. Entretanto, estes tempos são pouco significativos comparados ao tempo de navegação dessas.

3.4 Resultados

Existem três requisitos básicos para que o roteiro otimizado atenda a aplicação: 1) A rota deve atender uma ordem que atenda a todos os transbordos, respeitando as restrições de precedência e emparelhamento; 2) Todas as passagens pelas unidades devem estar com os horários dentro da janela de tempo pré-estabelecida; 3) O roteiro não deverá passar mais de uma vez por uma unidade, exceto quando esta tiver dupla função. Neste caso, o roteiro otimizado atende e torna-se uma solução factível para o problema.

Ao comparar o roteiro original e o roteiro otimizado, observa-se uma redução de 98 minutos no somatório dos tempos realizados pelas embarcações. Essa redução será refletida diretamente em custo de combustível e indiretamente em manutenções das embarcações.

Outro fator importante a observar é o tempo de vacância da embarcação. Ambos os roteiros permitem a disponibilidade de uma embarcação após 93 minutos de operação, entretanto, a segunda embarcação a estar disponível com maior brevidade é a embarcação 3 do roteiro otimizado, após 250 minutos.

Com isso, verifica-se que o algoritmo consegue simultaneamente otimizar uma rota e atender os critérios estabelecidos pelos especialistas dentro dos prazos pré-estabelecidos Dentre todos os benefícios do modelo implementado, uma das maiores é a realização dos atendimentos considerando a hierarquia de prioridades pelo método PROMETHEE de maneira estruturada e replicável, com resultados validados pela observação de especialistas que realizam esse trabalho de maneira empírica rotineiramente..

4 Conclusão

Diante dos resultados apresentados, a aplicação deste procedimento baseado na utilização de algoritmos e de processos de priorização de demandas torna-se vantajosa para o desenvolvimento de processos mais econômicos e eficientes. Embora o algoritmo seja eficiente, vale frisar que todo o resultado deve ser passível de análise e ajuste do programador logístico. Neste caso, o algoritmo passa a ser uma ferramenta de apoio a decisão valiosa na atividade do setor responsável pela programação de embarcações de apoio.

Contudo, alguns pontos de melhoria devem ser considerados para desenvolvimentos futuros. Primeiramente, é importante realizar uma análise de sensibilidade sobre o quanto o desconto na matriz de tempo pode influenciar no resultado final. Outro ponto é o desenvolvimento de um algoritmo mais completo que minimize o uso do trabalho manual para montagem e modelagem dos dados de entrada. Também é necessário ampliar a gama de informações com os dados das cargas transportadas, permitindo criar restrições por peso e tamanho, e avaliar a extensão da eficácia do uso em outras bacias sedimentares e outros cenários.

O estudo também possui algumas limitações importantes, que serão discutidas brevemente a seguir. O processamento das matrizes de transbordo com um número muito grande de demandas pode inviabilizar os resultados devido a limitação operacional e complexidade computacional dos modelos de roteamento. Outro ponto é que o algoritmo visa pela passagem única nas unidades relacionadas aos transbordos, exceto quando esta possui dupla função. Entretanto, a depender da quantidade de transbordos programados, tornar-se inviável a passagem em todas as unidades fornecedoras antes do atendimento a unidade requisitante dentro do tempo estimado. É importante ressaltar que não foi considerado o uso de diferentes heurísticas e meta-heurísticas e suas influências, e desconsideramos a variável de capacidade das embarcações devido a frequência das demandas ser pontual. Na realização da pesquisa entre os colaboradores (enquete sobre os critérios adotados), não houve distinção de peso quanto aos resultados dos técnicos e coordenadores. Por fim, as condições meteoceanográficas e o tempo de operação das unidades com a embarcação para movimentação dos materiais não foram considerados pelo algoritmo.

Pelos resultados encontrados, a pesquisa alcançou seus objetivos e mostra-se como mais uma ferramenta para auxílio na tomada de decisão pelos gestores de transporte na busca de uma melhor eficiência de atendimento. Além disso, o estudo apresentado consegue fomentar uma discussão mais ampla sobre o desenvolvimento de métodos e ferramentas para melhoria das atividade de transbordo *offshore*, o que trará resultados ainda mais promissores para as diversas organizações envolvidas.

Referências

ANP, Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. (2019). “Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2019”. Rio de Janeiro, RJ.

Abespetro, Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Petróleo (2019). Web Page: https://abespetro.org.br/noticia/768/empresas-associadas. Acessado em: 2019-11-07

Belfiore, P.; Fávero, L. P. (2013). Pesquisa Operacional para Cursos de Engenharia. Editora Elsevier. Rio de Janeiro, RJ.

Braekers, K.; Ramaekers, K.; Van Nieuwenhuyse, I. *The vehicle routing problem: State of the art classification and review*. *Computers & Industrial Engineering*, v. 99, p. 300-313, 2016. https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.12.007

Chopra, S.; Meindl, P. (2004). Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos: estratégia, planejamento e operação. Editora Prentice Hall. São Paulo, SP.

Dumas, Y.; et al. (1991). “The Pickup and Delivery Problem with Time Windows”. European Journal of Operational Research, vol. 54, no 1, setembro de 1991, p. 7–22. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/0377-2217(91)90319-Q.

Ferreira Filho V. M. (2016). Gestão De Operações E Logística Na Produção De Petróleo. Editora Elsevier. Rio de Janeiro, RJ.

Leite, I. M. S.; Freitas, F. F. T. (2011). Análise comparativa dos métodos de Apoio multicritério a decisão: AHP, ELECTRE e PROMETHEE. XXXI Encontro Nacional de Engenharia De Produção: Rio Grande do Sul.

OR-TOOLS 7.2. (2020). Web Page. https://developers.google.com/optimization/. Acessado em: 2020-04-21.

Parragh, S. N., et al. (2008). "*A Survey on Pickup and Delivery Problems: Part II: Transportation between Pickup and Delivery Locations*". *Journal Für Betriebswirtschaft*, vol. 58, no 2, p. 81–117. DOI.org (Crossref), doi:10.1007/s11301-008-0036-4.

Ropke, S.; Cordeau, J. F.; Laporte, G. (2007). Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. Networks: An International Journal, v. 49, n. 4, p. 258-272. Montreal, Canadá.

Simchi-Levi, D; Kaminski, P. (2003). Cadeia de Suprimentos: Projetos e Gestão. Editora Bookman. Porto Alegre, RS.