SÉRGIO BASSI

OTIMIZAÇÃO DO USO DE RECURSOS CRÍTICOS NO
DESENVOLVIMENTO DE CAMPOS DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

(versão corrigida)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

São Paulo

2018

SÉRGIO BASSI

OTIMIZAÇÃO DO USO DE RECURSOS CRÍTICOS NO
DESENVOLVIMENTO DE CAMPOS DE PETRÓLEO *OFFSHORE*

(versão corrigida)

Dissertação apresentada à Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Mestre em Ciências

Área de Concentração: Engenharia de
Produção.

Orientadora: Prof^a Dra. Débora Pretti Ronconi

São Paulo

2018

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, dede 20

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

Catálogo-na-publicação

Bassi, Sérgio

Otimização do uso de recursos críticos no desenvolvimento de campos de petróleo offshore / S. Bassi – versão corr. -- São Paulo, 2018.

117 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Pesquisa operacional 2.Roteirização 3.Indústria petrolífera
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t.

Dedico esta dissertação a meus pais, amigos, colegas de trabalho, companheiros da pós-graduação e a todos aqueles que acreditaram no sucesso desta empreitada.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me permitido chegar até este momento. Tenho convicção de que Ele me trouxe até aqui e me deu o potencial e a resiliência necessários.

Agradeço aos meus pais pelo suporte, compreensão e dedicação. Por terem me apoiado e, acima de tudo, por terem me contrariado. Cada passo, cada atitude, foi fundamental para o meu crescimento, minha contínua formação e pelo atingimento deste objetivo. Tudo que passamos moldou meu perfil e hoje eu entendo que este seja meu grande trunfo.

Agradeço o apoio de minha família e de meus amigos mais próximos, que entenderam meus momentos de ausência. Foi um período de muitas atividades – não somente acadêmicas – e de altos e baixos emocionais. Cito, especialmente, Amanda Lemos, João Elton, Carlos Silvestre, Joselma Oliveira, Sergio Shiroma, Julio Takeda, Bárbara Tarrataca, Bruno Franco, Fernanda Festucci, Carla Festucci, Luccas Ângelo e Melanie Ângelo por tanto me ouvirem e me acompanharem nestes desafios e mudanças que ocorreram nestes anos.

Registro também toda minha gratidão à professora Débora Pretti Ronconi, que além de ser a orientadora deste trabalho, teve especial atenção e respeito pelos momentos em que eu estava com maiores picos de atividades profissionais. Por ter me motivado nos momentos em que eu estava mais que exausto. Por ter compartilhado sua sabedoria, experiência e conhecimento de mundo. Por ter tido sensibilidade e zelo suficientes para comigo.

Relembro também meus companheiros de pós-graduação: Raquel Buzogany, João Manguino, Hanna Pamplona, Augusto Molke, Bruna Carvalho, Fernanda Barreto e Victoria Mutran. A dedicação de vocês é um exemplo para mim. Vocês são gigantes. E seres humanos muito bons. Obrigado por confiarem em mim quando eu achava que não ia dar conta.

Gosto das palavras, mas chega-se a um ponto em que não é possível mais traduzir tudo o que sentimos ou queremos nelas. Então, resumo-me ao meu “muito obrigado”!

“As pessoas atualmente pensam que os cientistas existem para instruí-las, e os poetas, músicos, etc., para lhes dar prazer. A ideia *de que estes últimos têm alguma coisa para ensinar-lhes* – isso não lhes ocorre.”
(Ludwig Wittgenstein)

RESUMO

O presente trabalho aborda a questão da interligação de poços de petróleo às plataformas de produção com a utilização de embarcações do tipo *Pipe Laying Support Vessels* (PLSVs). O objetivo do estudo é a maximização da curva de produção de óleo no período analisado, o que passa pelo melhor aproveitamento da frota de *PLSVs* contratada. São consideradas as especificidades da situação como, por exemplo, as restrições técnicas de cada embarcação para as atividades necessárias, a disponibilidade dos *PLSVs*, materiais para interligação e a já ocorrência da fase precedente, denominada completação. Considerando todo este conjunto de características do problema, desenvolveu-se uma formulação de Programação Linear Inteira Mista com pontos inovadores em relação à literatura, especialmente no que diz respeito ao incremento da curva de produção por conta da operação de poços injetores e ao declínio natural de poços produtores com o passar do tempo. Como os resultados obtidos nos testes da formulação matemática mostraram-se satisfatórios para pequenas instâncias, mas de alta complexidade computacional para um número grande de atividades, foram elaboradas duas versões de uma heurística construtiva adequada para a resolução de problemas de maior porte. Levando em consideração as mesmas características do problema que foram usadas na etapa de formulação matemática, puderam ser elaborados os algoritmos e suas devidas programações computacionais. A partir disso, foram realizados testes de pequeno porte para verificar a robustez dos algoritmos quanto aos seus comportamentos. Por fim, houve a comparação do caso completo, onde foram aplicadas as heurísticas, com o que ocorreu na situação real, tendo o resultado deste presente estudo apresentado um relevante ganho.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional. Roteirização. Indústria Petrolífera.

ABSTRACT

This research presents a real case of connection of oil wells in subsea environment to the production platforms with the use of ships of the type PLSV – Pipe Laying Support Vessels. The objective of this study is to maximize the oil production curve in the horizon considered, which is due to the best exploitation of the outsourced fleet. Specificities of the situation are considered like, for example, technical constraints of each vessel for the required activities, the availability of the PLSVs, materials for connection and the end of the previous phase, called completion. Considering all this set of the problem characteristics, it was developed a Mixed-Integer Linear Programming (MILP) formulation with innovative aspects in relation to the literature, especially with respect to the increase of the production curve due to the operation of injector wells and to the natural decline of producer wells during their operation, in the course of time. As the results obtained in the tests of the mathematical formulation were satisfactory for small instances, but with a high computational time for a great number of activities, two suitable constructive heuristics were elaborated for the resolution of larger problems. Numerical experiments were conducted, in small scale, to verify the robustness of the algorithms. Next, the proposed methods were applied to a real case of an oil company and relevant gains were observed.

Keywords: Operations Research. Routing Problem. Oil industry.

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Produção de petróleo no Brasil no horizonte 2004-2016 (ANP, 2017).....	16
Figura 2 - Etapas para obtenção da produção de petróleo	18
Figura 3 - Declínio natural e efeito da entrada de poço injetor no volume de produção de um poço produtor	23
Figura 4 - Exemplo de gráfico de Gantt para o problema em questão	25
Figura 5 - Esquema do problema piloto para teste da formulação matemática.....	51
Figura 6 - Gráfico de Gantt com visão recursos e atividades para caso piloto.....	55
Figura 7 - Gráfico de Gantt com visão recursos e atividades para caso piloto com acréscimo de um <i>PLSV</i>	56
Figura 8 - Gráfico de Gantt com visão recursos para caso piloto com redução de um <i>PLSV</i>	56
Figura 9 - Esquema de localização dos poços e UEPs para os testes computacionais ampliados	58
Figura 10 - Tempo de processamento <i>versus</i> o número de roteiros por embarcação, por cenário de <i>PLSVs</i>	61
Figura 11 - Tempo de processamento <i>versus</i> valor da função objetivo em cenários de igual quantidade total de roteiros.....	62
Figura 12 - Número de nós restantes <i>versus</i> o número da iteração na resolução dos casos de multiplicação RB constante apresentados	65
Figura 13 - Detalhe do número de nós restantes <i>versus</i> o número da iteração para o caso de 6 <i>PLSVs</i>	65
Figura 14 - Pseudocódigo da heurística construtiva 1	70
Figura 15 - Recorte do gráfico de Gantt com o detalhe dos cenários de 4 <i>PLSVs</i> da instância I do teste da HC1 com dados reais.....	83
Figura 16 - Pseudocódigo da heurística construtiva 2.....	87
Figura 17 - Recorte do gráfico de Gantt com o detalhe dos cenários de 4 <i>PLSVs</i> da instância I do teste da HC2 com dados reais.....	98
Figura 18 - Perfil de entrada em operação de poços produtores (Realizado x HC1)	105
Figura 19 - Perfil de entrada em operação de poços injetores (Realizado x HC1).....	106
Figura 20 - Perfil acumulado de entrada em operação de poços produtores (Realizado x HC1 x HC2)	108

Figura 21 - Perfil acumulado de entrada em operação de poços injetores (Realizado x HC1 x HC2)	109
Figura 22 - Perfil acumulado de curva de produção, por período avaliado (Realizado x HC1 x HC2)	110

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Possíveis dimensões e características de problemas de roteirização de veículos (Belfiore, 2006)	30
Tabela 2 - Tempos de traslado entre as atividades (em dias)	52
Tabela 3 - Parâmetros de entrada para caso piloto	52
Tabela 4 - Índices das variáveis X_{ijrb} positivas na solução ótima	53
Tabela 5 - Dados de saída de tempo e ordem de atendimento, por roteiro-embarcação	54
Tabela 6 - Quantidade de dutos e tempos de carregamento para caso piloto	55
Tabela 7 - Quadro resumo dos casos piloto para teste da formulação matemática	57
Tabela 8 - Insumos para os testes computacionais ampliados	57
Tabela 9 - Testes computacionais realizados utilizando o modelo proposto	59
Tabela 10 - Número total de iterações <i>versus</i> número de nós analisados	66
Tabela 11 - Comparativo dos resultados ótimos e da HC1	74
Tabela 12 - Resultados de potencial de produção nos testes da HC1 com dados reais	78
Tabela 13 - Resultados normalizados dos testes da HC1 com dados reais	80
Tabela 14 - Detalhe dos resultados dos cenários de 4 <i>PLSVs</i> da instância I dos testes da HC1 com dados reais	81
Tabela 15 - Comparativo dos resultados ótimos, HC1 e HC2	90
Tabela 16 - Resultados de potencial de produção nos testes da HC2 com dados reais	92
Tabela 17 - Resultados normalizados dos testes da HC2 com dados reais	94
Tabela 18 - Evolução percentual dos volumes de produção entre HC2 e HC1 nas instâncias com dados reais	95
Tabela 19 - Detalhe dos resultados dos cenários de 4 <i>PLSVs</i> da instância I dos testes da HC2 com dados reais	96
Tabela 20 - Modelo de dados de realização das atividades com <i>PLSVs</i>	101
Tabela 21 - Número de <i>PLSVs</i> , por categoria, a serem utilizados na heurística construtiva	103
Tabela 22 - Tabela de diferenças de datas de entrada dos poços – HC1 X Caso real	104
Tabela 23 - Tabela de diferenças de volume produzido – HC1 X Caso real	105
Tabela 24 - Tabela de diferenças de datas de entrada dos poços – HC2 X Caso real	107
Tabela 25 - Tabela de diferenças de datas de volume produzido – HC2 X Caso real	107

LISTA DE SIGLAS

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

CVD – Conexão Vertical Direta

DP – Desenvolvimento da Produção

IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

FSMVRPMT – Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Multiple Trips

FSMVRPTW – Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows

GRASP – Greedy Randomized Adaptive Search Procedure

HC1 – Heurística Construtiva 1

HC2 – Heurística Construtiva 2

MTVRP – Multiple Trip Vehicle Routing Problem

MTVRPTW – Multiple Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows

PEM – Plano Exploratório Mínimo

PLIM – Programação Linear Inteira Mista

PLSV – Pipe Laying Support Vessels

PRV – Problema de Roteamento de Veículos

TSP – Traveling-Salesman Problem

UEH – Umbilical Eletro-Hidráulico

UEP – Unidade Estacionária de Produção

VPL – Valor Presente Líquido

VRP – Vehicle Routing Problem

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Definição do objeto de estudo e caracterização do problema	16
2.1. Definição do objeto de estudo	16
2.2. Conceitos fundamentais de projetos petrolíferos	18
2.3. Enunciado da problemática, relevância e metodologia.....	20
3. Revisão da literatura	27
3.1. Roteirização de veículos	27
3.2. Roteirização de veículos com frota heterogênea	31
3.3. Múltiplos roteiros por embarcação	32
3.4. Roteirização e programação de navios	34
3.5. Programação de atividades em projetos petrolíferos	36
4. Formulação matemática	41
4.1. Elaboração do modelo matemático.....	41
4.2. Caso-piloto para a formulação matemática	51
5. Elaboração das heurísticas construtivas	67
5.1. Heurística Construtiva 1 (HC1)	67
5.2. Comparação da HC1 com os resultados ótimos	73
5.3. Casos-piloto de aplicação da HC1	75
5.4. Heurística Construtiva 2 (HC2)	84
5.5. Comparação da HC2 com os resultados ótimos	90
5.6. Casos-piloto de aplicação da HC2	92
6. Aplicação ao caso real	100
6.1. Aplicação das heurísticas construtivas ao conjunto completo de dados.....	100

6.2.	Comparação da HC1 com o realizado	104
6.3.	Comparação da HC2 com o realizado	107
7.	Conclusões e futuras pesquisas	112
8.	Referências Bibliográficas	114

1. Introdução

Segundo o Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis de 2017, divulgado pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), a indústria do petróleo brasileira tem, cada vez mais, ampliado suas operações em alto-mar (*offshore*) – com aumento de reservas de petróleo provadas e volume de produção de óleo e gás –, lançando-se para descobertas e produção em águas cada vez mais profundas.

As atividades realizadas em ambiente marítimo são de alto risco e complexidade tecnológica, exigindo a utilização de embarcações específicas para as operações de construção de poços submarinos (as chamadas sondas, que são utilizadas para as atividades de perfuração e completação dos poços submarinos) e conexão destes poços às plataformas de produção (realizadas pelos barcos chamados *PLSV – Pipe Laying Support Vessels*), como aborda Bianco *et al.* (2014). Estas embarcações existem em número limitado, o que exige uma gestão eficiente destes recursos que são contratados de terceiros. Estes recursos são críticos para uma companhia deste ramo empresarial não somente pelo seu alto custo, mas também porque a priorização de um determinado poço implica na postergação de outros.

O crescimento da carteira de projetos de uma empresa deste setor e, conseqüentemente, do número de poços a serem perfurados e interligados às unidades de produção faz com que haja uma priorização dos mesmos e, assim, uma complexa programação de curto e longo prazo é necessária. Como as atividades também possuem alto grau de imprevisibilidade devido a condições de mar e datas de entrega de materiais ou equipamentos atrelados, é necessária uma revisão frequente nesta programação que, por ora, é feita sem o apoio de uma metodologia formal.

Há outros recursos – não somente estas embarcações – que também são considerados críticos pela companhia: ANM (árvore de natal molhada, que é um conjunto de válvulas de segurança para evitar derramamentos de fluido dos poços), linhas flexíveis (para interligação dos poços à unidade de produção, levando o fluido do fundo do mar para a superfície), a UEP (unidade estacionária de produção, conhecida normalmente como plataforma de produção), dentre outros itens que Neves *et al.* (2012) apresentam em seu trabalho. Será incluída a disponibilidade de alguns destes recursos nesta problemática como restrições, dado que eles afetam o momento em que os

PLSVs podem começar a atuar, pois são ferramentas necessárias (pré-requisitos) para o acontecimento das operações em alto-mar.

A não-concomitância de embarcações para a realização de tarefas em um mesmo poço, a viabilidade técnica na realização de determinada atividade de interligação e o cuidado na formação dos roteiros – isto é, o conjunto de linhas que serão embarcadas nos *PLSVs* de uma só vez, na base de carregamento – são outros pontos de destaque no trabalho. As questões de declínio da produção dos poços em operação e influência dos poços injetores sobre a produção dos mesmos são diferenciais com relação ao que se pode verificar na literatura.

Tendo em vista todas estas questões levantadas, o objetivo deste trabalho é estabelecer um procedimento que visa maximizar a curva de produção de óleo da companhia durante determinado horizonte de tempo. E para que este objetivo seja alcançado atendendo às restrições do problema, é necessário que a utilização da frota de *PLSVs* seja a melhor possível. Como as diárias destas embarcações são de valor elevado, é importante que os navios sejam utilizados da melhor forma possível, reduzindo sua ociosidade e organizando-os de modo a aumentar o resultado de produção.

O trabalho está estruturado em 8 capítulos. O primeiro consiste nesta introdução, que contextualiza o cenário de atuação da empresa e traz as linhas gerais daquilo que se propõe estudar. Já o Capítulo 2 versa sobre a definição de objetivos e caracterização do problema, no qual se discorrerá sobre conceitos do ramo e de projetos petrolíferos e informações gerais sobre o fornecimento de matérias-primas levando, assim, à enunciação do problema, sua relevância, bem como são apresentados breve metodologia, características e restrições do problema.

O Capítulo 3 aborda a revisão da literatura, focando em cada um dos tópicos que compõem o problema. Com a observação detalhada daquilo que já foi estudado, pode-se obter melhor compreensão do que pode ser utilizado como ponto de partida para elaboração do modelo desejado e quais são os principais diferenciais e contribuições do atual trabalho.

O Capítulo 4 traz a formulação matemática do problema, abordando todas as características e restrições da situação real. Cada conjunto de restrições e função objetivo são explicadas, bem como os resultados dos testes realizados por meio da programação em *software* apropriado. Para maiores instâncias, foram elaboradas duas heurísticas construtivas, as quais são tema do Capítulo 5. Nele serão abordadas as lógicas de construção, os algoritmos, os testes para verificar o

comportamento das mesmas, bem como os resultados obtidos em versões simplificadas. O Capítulo 6 traz os resultados quando efetuado o comparativo do resultado de ambas heurísticas com o cenário real.

O Capítulo 7 apresenta as conclusões do trabalho e sugestões de futuras pesquisas relacionadas. Finalizando, o Capítulo 8 trata das referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

2. Definição do objeto de estudo e caracterização do problema

2.1. Definição do objeto de estudo

A indústria do petróleo tem apresentado crescimento expressivo no Brasil desde a última década, especialmente com importantes descobertas de acumulações de óleo na camada Pré-Sal, em águas ultra-profundas (em lâminas d'água acima de 2000 metros de profundidade). São 12,0 bilhões de barris de reservas provadas marítimas no país, sendo que a produção no mar em 2016 foi de cerca de 864 milhões de barris de petróleo (ANP, 2017). A Figura 1 apresenta a evolução da produção de petróleo no Brasil entre os anos de 2004 e 2016.

Figura 1 - Produção de petróleo no Brasil no horizonte 2004-2016 (ANP, 2017)

O ramo petrolífero, especialmente o submarino, é caracterizado por incertezas desde a análise do volume de óleo ou gás no campo, na fase exploratória, valendo-se de técnicas de geologia e geofísica, passando pela construção de poços marítimos – definições de trajetória, comprimento, diâmetro, localização – e condições de escoamento – características de pressão,

permeabilidade, viscosidade – destes hidrocarbonetos até a superfície, chegando à plataforma de produção. Amostragens e informações destas jazidas são escassas e os resultados são sujeitos a variabilidades.

O desenvolvimento de tecnologias que propiciem a exploração destas novas acumulações tem sido um enorme desafio para a indústria brasileira, que tem se capacitado cada vez mais para atender prontamente as necessidades dos novos projetos destinados a cada uma das áreas a serem desenvolvidas (BNDES, 2012).

Por serem itens de alta complexidade e que operam em severas condições, os mesmos possuem elevados custos e alto *lead time* de fabricação (Neves *et al.*, 2012) e, portanto, exigem uma alta dose de planejamento antecipado para contar com estes itens a tempo. E como, por ora, as indústrias nacional e internacional não possuem estrutura suficiente para entregar toda a demanda, isto configura uma forte restrição à elaboração antecipada dos projetos.

Sendo assim, por esta visão inicial, pode-se notar que é uma situação complexa e dependente de inúmeros atores, repleta de imprevisibilidades no qual decisões errôneas referentes à aplicação de recursos físicos levam a perdas consideráveis.

O objeto de estudo deste trabalho é o estabelecimento uma sistemática que otimize a utilização dos recursos físicos de uma companhia petrolífera, em vista da maximização da curva de produção de óleo, o que leva a um melhor resultado econômico para a empresa. Os principais recursos que serão considerados são as embarcações do tipo *PLSV*, responsáveis pelos lançamentos de dutos flexíveis e umbilicais eletro-hidráulicos (UEH) de controle entre as plataformas de produção e os poços produtores e injetores de fluidos em alto-mar. Através da roteirização destas embarcações, de frota heterogênea, sujeitas a restrições específicas, buscar-se-á a redução da ociosidade por questões de espera e alocação das atividades ao longo do tempo para cada barco.

2.2. Conceitos fundamentais de projetos petrolíferos

Para melhor esclarecimento, faz-se necessário apresentar as principais fases de um projeto de produção de petróleo, com base no modelo de contrato de concessão (ANP, 2014). A Figura 2 apresenta as seguintes etapas:

- a) Fase exploratória: caracterizada, principalmente, pelo Programa Exploratório Mínimo (PEM), no qual a ANP acorda com a empresa ganhadora da licitação quais são as atividades essenciais – sobretudo de geologia e geofísica - a serem realizadas naquele determinado bloco concedido;
- b) Avaliação: caso durante o PEM, a companhia tenha indícios que a leve a se interessar por estudos mais profundos, ela deve gerar o Plano de Avaliação da Descoberta para áreas que devem ser retidas;
- c) Declaração de comercialidade: realizada após a avaliação inicial, na qual concluiu-se que o campo é economicamente viável e que, a partir dali, será realizado um projeto abrangente para obtenção do petróleo acumulado, iniciando a fase de desenvolvimento da produção. Na prática, a declaração de comercialidade é um marco e não uma etapa;
- d) Desenvolvimento da produção: nesta fase é traçada a estratégia de exploração (extração de recurso natural) do campo através da elaboração de um projeto atrelado a um Plano de Desenvolvimento entregue à ANP, que acompanha as ações do operador do campo;
- e) Manutenção da Produção: fase que compreende a produção em si, a operação das plataformas de acordo com as medições e controles da ANP.

Figura 2 - Etapas para obtenção da produção de petróleo

Ter-se-á como foco a fase que despende mais recursos da companhia e na qual verifica-se o maior número de atividades em alto-mar: a fase de desenvolvimento da produção (DP). Um sistema de produção marítimo de um típico projeto de DP de um campo de petróleo é composto por 3 itens: uma unidade estacionária de produção (UEP, conhecida também por plataforma de produção), uma série de poços (produtores ou injetores de fluidos) e equipamentos responsáveis utilizados para interligar estes dois primeiros itens (Neves *et al.*, 2012).

Explicando sucintamente a estrutura de um projeto de desenvolvimento da produção, serão abordadas as equipes técnicas que compõem um projeto e será traçado um resumo das atividades físicas realizadas.

As equipes técnicas principais de um projeto de petróleo *offshore* são:

- Engenharia de Reservatórios: o principal motivo de um projeto de exploração de petróleo é obter o óleo que se encontra a quilômetros de distância da superfície marítima. A engenharia de reservatórios é a responsável por, a partir dos dados coletados pela geologia e geofísica nas sísmicas exploratórias e avaliações de poços, gerar um modelo de simulação que represente as condições físicas e contemple a localização daquele determinado volume de óleo a ser extraído. É responsável por definir onde, quantos e de que tipo serão os poços;

- Engenharia de Poço: a partir dos resultados de reservatório, a engenharia de poço estuda qual a melhor forma de se construir um poço de petróleo, isto é, qual o melhor caminho que ligue o leito marinho até o reservatório físico onde se encontra o óleo. Importante que a construção contemple o contato com a maior área possível do reservatório e que seja feita de modo seguro, com a quantidade de fases ideal. São duas as principais fases da construção de um poço: perfuração, na qual se fura e reveste cada uma das fases, cada vez mais profundas; e a completação, na qual se equipa o poço com válvulas e artefatos de segurança, deixando-o preparado para a produção;

- Engenharia Submarina/Elevação e Escoamento: responsável por estudar as melhores condições para trazer o petróleo do leito submarino até a plataforma de produção, através de dutos, no processo chamado interligação. Verificam qual é o posicionamento ideal de lançamento, diâmetro dos dutos, minimizando a perda de carga;

- Engenharia de Construção e Montagem: responsável pelo projeto e fabricação da UEP, que receberá e realizará o processamento primário do petróleo recebido diretamente das camadas profundas.

2.3. Enunciado da problemática, relevância e metodologia

No caso em questão, a empresa encontra-se em um cenário na qual possui uma diversa gama de projetos de desenvolvimento da produção em elaboração, paralelamente.

Com base no discorrido no item de conceitos fundamentais, tendo como referência as atividades do poço, pode-se notar que as três etapas principais pelo qual o mesmo passa, em ordem, são: a perfuração, a completação e a interligação. Devido ao grande número de projetos e da quantidade de poços em cada um deles, ocorre que diversos poços encontram-se, simultaneamente, em alguma operação de confecção.

Neste trabalho, haverá foco, especialmente, na etapa de interligação dos poços, fase esta que precede imediatamente o início de operação dos poços, sendo realizada pelos *PLSVs*. Cabe, neste momento, esclarecer que a operação de interligação da linha à plataforma é denominada *pull-in* e a interligação à ANM do poço é chamada CVD (conexão vertical direta).

De um modo geral, o processo completo de interligação consiste de três etapas:

- a) carregamento do *PLSV* com as linhas a serem lançadas posteriormente, etapa esta que ocorre em uma base de carregamento;
- b) navegação até a locação do poço onde estas linhas serão efetivamente lançadas;
- c) lançamento das linhas entre o poço e a UEP (ou entre UEP e poço).

Notar que o processo de carregamento pode ser realizado com linhas de mais de um poço e nem todas as linhas de um mesmo poço ficam em um mesmo lote carregado. Isto explica-se devido ao fato de a data de chegada das linhas (dutos e UEH) poder ser distinta e a capacidade de armazenamento do barco ser limitada.

O intuito é estabelecer, mediante as premissas e restrições existentes, qual é o roteiro mais adequado a cada um dos navios, levando a um cenário otimizado da curva de produção da empresa.

Serão consideradas as seguintes premissas:

- os poços produtores têm 3 linhas a serem conectadas (dois dutos flexíveis – um de produção e outro de serviço – e mais um UEH) e os injetores podem ter 2 ou 3 linhas (a depender se injetam 1 ou 2 tipos de fluido, mais o UEH);
- a posição dos poços é fixada pela equipe de reservatórios do projeto;
- todas as linhas serão lançadas entre a cabeça do poço e a plataforma (não necessariamente neste sentido), ou seja, não havendo equipamento intermediário que funcione como *hub* de linhas;
- será também considerado como premissa o fato de já haver uma UEP instalada antes do efetivo lançamento das linhas;
- uma tarefa, após ser iniciada, não pode ser interrompida;
- não existe relação de precedência entre as atividades de um mesmo poço.

Os dados de entrada para o problema são:

- tempo de carregamento para cada uma das linhas a serem conectadas (em dias);
- tempo de lançamento para cada uma das linhas (em dias);
- tempo de navegação entre cada uma das locações - entre base e poço ou entre poços, no caso do roteiro ser direto entre dois poços, havendo carregamento prévio (em dias);
- produção e declínio esperados por poço, pois a produção de um poço de petróleo decai no decorrer do tempo (em barril/dia);
- comprimento das linhas a serem interligadas (em Km);
- o tipo de poço (se são injetores ou produtores) e seus potenciais de produção ou injeção;
- a relação de poços injetores e seus respectivos produtores, ou seja, a qual poço produtor cada injetor atende, aumentando o seu volume de produção.

Por sua vez, as restrições serão:

- lâmina d'água (profundidade de atuação) e capacidade de lançamento (em toneladas), ou seja, viabilidade técnica dos *PLSVs*;
- capacidade de carregamento(estocagem) de cada *PLSV*;
- só pode ocorrer a interligação após o fim da completação;
- a data de chegada dos dutos e UEH à base deve preceder o carregamento para posterior lançamento das linhas;
- não poderá ocorrer concomitância de atividades em um mesmo poço, ou seja, não será possível a utilização de duas embarcações *PLSV* ao mesmo tempo para realização de atividades de interligação;
- tempo de comissionamento, que é o tempo necessário, após a interligação de todas as linhas de um poço, para testes antes da entrada dele em funcionamento.

Um dos pontos-chave e diferencial do estudo é a questão de declínio dos poços produtores no decorrer do tempo e o efeito da inclusão de poços injetores no passar do tempo. Um poço produtor começa a produzir com o máximo de seu volume, valor este que se chama de potencial inicial de produção e, no decorrer do tempo, tem este valor reduzido, devido ao declínio natural de produção que o reservatório possui, fato explicado pelo decréscimo de pressão das jazidas. Já os poços injetores, sejam de água ou de gás, repressurizam o reservatório, adicionando uma parcela de produção de óleo àquele campo nos próximos períodos.

Graficamente, é interessante apresentarmos, para melhor compreensão e entendimento do problema, o declínio natural de um poço produtor bem como o efeito de um poço injetor no volume de produção de seu poço produtor atrelado. Este comportamento inerente aos poços de petróleo é mostrado na Figura 3.

Figura 3 - Declínio natural e efeito da entrada de poço injetor no volume de produção de um poço produtor

Pela Figura 3, é possível exemplificar numericamente esta questão. São considerados dois poços, um produtor e outro injetor. O poço produtor entra em operação no instante 10 e tem potencial de 50 mil bpd (barris por dia), o que explica a subida repentina neste instante. A partir deste instante, o poço produtor começa a declinar. O poço injetor que é atrelado a este produtor inicia sua operação no instante 20 e tem a capacidade de incrementar o atual potencial do produtor em 6%. Sendo assim, se não houvesse poço injetor, a produção continuaria decaindo e seguiria a linha de cor azul.

Há casos em que há mais de um poço injetor atrelado a um produtor. Nestas situações, a produção é incrementada pela multiplicação cumulativa das frações adicionadas por cada poço injetor. Este aumento de produção expresso através de um percentual é uma simplificação extraída dos volumes previstos por curvas de produção geradas pelas áreas de reservatório.

Sendo assim, depara-se com uma questão altamente combinatória a qual se valerá de técnicas de pesquisa operacional para sua resolução com vistas à maximização do potencial de produção disponível. Inicialmente, será apresentada a formulação matemática do problema, com a aplicação a uma situação simplificada, com menor número de variáveis. Como é esperado que não se possa obter uma solução ótima para o problema completo, devido a sua complexidade combinatória, será utilizada, em seguida, uma heurística para obter uma solução de alta qualidade.

Resumindo tudo que foi exposto até então, pode-se dizer que o problema em questão consiste na programação de atividades de interligação de dutos (também chamados de linhas) entre plataformas de produção e poços de petróleo situados em alto-mar, afastados até 300 Km da costa brasileira. Existem dois tipos de poços: os produtores e os injetores. Os produtores são os responsáveis, efetivamente, pela produção de óleo e possuem a peculiaridade de ter a sua produção declinando no decorrer do tempo. O segundo tipo de poço, injetor, é responsável por repressurizar a jazida e, com isso, incrementar o volume produzido do poço produtor que esteja associado a ele.

Para que um poço entre em operação, é necessário que todos os três dutos referentes a este poço tenham sido interligados. Estes dutos, quando entregues pelos fornecedores de materiais à empresa em questão, ficam armazenados na base de carregamento, que é única, até a sua aplicação. Para que possam ser executadas tais tarefas, é necessário que já tenha sido executada uma etapa de construção do poço chamada de completação além dos materiais já terem sido entregues na base, como abordado anteriormente.

Há uma série de embarcações do tipo *PLSV* disponíveis para executar estas atividades. Contudo, nem todos *PLSVs* podem realizar todas as tarefas. Esta característica denomina-se viabilidade técnica. Denomina-se roteiro o conjunto de linhas que serão interligadas sucessivamente por um *PLSV* sem necessidade dele retornar à base para coletar outras linhas. Os dutos a serem carregados em cada roteiro não precisam ser de um mesmo poço nem de uma mesma plataforma. E este é um ponto interessante do problema pois a elaboração do roteiro é parte importante que definirá um pequeno percurso de interligação, caracterizando a roteirização desta embarcação. É relevante salientar que o carregamento deve ocorrer, portanto, integralmente antes de o barco navegar para as locações a serem atendidas. Outra restrição do problema é a não-concomitância, que vem a ser o fato de não ser possível a execução de duas ou mais atividades de um mesmo poço ao mesmo tempo.

Sendo assim, tendo em consideração os potenciais de produção e injeção, as datas de disponibilização do material e finalização da completação bem como as outras restrições (capacidade de cada barco, viabilidade técnica, não-concomitância etc.), busca-se um procedimento que resolva a situação-problema e apresente uma solução de boa qualidade em um tempo de processamento computacional adequado. Como resposta, o procedimento deve apresentar qual *PLSV* realizará qual atividade de interligação e apontar a partir de qual instante cada uma delas ocorrerá.

Um exemplo de resultado esperado é aquilo que se apresenta no gráfico de Gantt da Figura 4. Os carregamentos ocorrem antes do barco sair para realizar as interligações. Existem navegações entre a fase de carregamento e as atividades de interligação bem como entre estas atividades, exceto quando elas ocorrem no mesmo poço (ou em poços muito próximos).

Figura 4 - Exemplo de gráfico de Gantt para o problema em questão

As marcações em amarelo sinalizam o final da interligação das 3 linhas de um mesmo poço, o que indica que ele está pronto para ser comissionado (fase de testes operacionais) e entrar em operação. Pode-se observar também neste exemplo que não ocorre concomitância entre as atividades. Ou seja, não há intersecção em termos de tempo entre as atividades de um mesmo poço. Outro ponto o qual merece foco é que todo carregamento dá início a um novo roteiro.

Sendo assim, através deste resumo, espera-se realizar o esclarecimento a respeito do processo de interligação, o que colabora para melhor compreensão do conteúdo do trabalho.

2.4. Justificativa do estudo

Na indústria de exploração e produção de petróleo, os valores de investimento são muito elevados sendo, por exemplo, a diária das sondas de perfuração/completação da ordem de US\$ 500 mil (Soares e Leite, 2014) e a dos *PLSVs*, cerca de US\$ 350 mil (SINAVAL, 2017). Portanto, a correta programação dos barcos com a destinação às melhores locações onde se possa realizar as atividades é imprescindível para a otimização de recursos físicos e monetários.

Ainda, através do estudo, espera-se obter a ordem de interligação que maximize o resultado da empresa, gerando um procedimento computacional que aloque as atividades, automaticamente,

segundo os critérios definidos, em um cronograma que atenda até o longo prazo pois, atualmente, este sequenciamento é feito sem uma metodologia formal.

Conforme contato com as gerências de programação de recursos críticos – a nível corporativo e das unidades de negócio (descentralizadas por região geográfica e campos produtores) – e equipes técnica e de planejamento de equipamentos submarinos, foram obtidas informações sobre a necessidade de geração de cronogramas de horizonte anual, mas também plurianual, periodicamente, para finalidade de planejamento de curto, médio e longo prazo. Isto ocorre, respectivamente, por questões predominantemente operacionais (alocação de ferramentas, detalhamento da atividade, elaboração de procedimento executivo, etc.) ou para planejamento das equipes de projeto e elaboração de plano de negócios corporativo, onde realiza-se previsão de verba de investimento e custo operacional, além da projeção de receita para os próximos anos.

Este cronograma, como é elaborado através de reuniões entre as equipes de planejamento e sem uma metodologia única, fica sujeito a não-otimizações das tarefas de interligação, podendo até possuir atividades alocadas em *PLSVs* que não realizam as mesmas ou com durações não condizentes com a realidade, o que leva a um planejamento passível de falhas. Por não haver metodologia específica para esta previsão de interligações, a ordem do curto prazo definida em reuniões conforme expectativa que as áreas demandantes têm de que os poços fiquem prontos. Para o longo prazo, prevê-se apenas alocação ao decorrer de cada ano, sem especificar intervalos de início e fim de cada atividade separadamente.

Ademais, o processo como está onera as equipes de programação das embarcações quando há alguma decisão estratégica de *portfolio* que altera a ordem de entrada em operação das plataformas de produção e, com isso, modifica grande parte dos dados que alimentam o nivelamento do cronograma de *PLSVs*. Quando isto ocorre, são necessárias reuniões de alinhamento para que ocorra redistribuição das atividades aos barcos de acordo com as novas premissas.

Sendo assim, uma metodologia formal de análise, com base em técnicas de otimização, viria a agregar bastante no processo de planejamento destas embarcações.

3. Revisão da literatura

O problema a ser tratado pode ser visto como um problema de roteirização de veículos (no caso, embarcações) com frota heterogênea, múltiplos roteiros por embarcação dentro da temática de desenvolvimento de campos petrolíferos. Roteirização, por definir o percurso de cada um dos barcos. Frota heterogênea, pois as embarcações diferem entre si em termos de capacidade de armazenamento e de lançamento de linhas. Múltiplos roteiros por conta de, no período de análise cada embarcação poder voltar à base de carregamento (depósito) para iniciar um novo roteiro, após ter abastecido com os materiais necessários para as atividades deste novo percurso. Isto caracteriza um problema do tipo MVRPMT (*Mix Vehicle Routing Problem with Multiple Trips*).

Segundo Brejon e Belfiore (2006), um dos complicadores de se modelar e resolver um problema de roteamento advém da grande quantidade de parâmetros que pode influenciar cada caso deste. Sendo assim, a adequada classificação dos problemas permite uma melhor compreensão dos aspectos relevantes, para os quais deve-se dar maior atenção, dado que o tipo de problema e seus parâmetros auxiliam no direcionamento da estratégia a ser adotada.

Nos próximos tópicos, serão apresentados alguns trabalhos que já trataram destas temáticas.

3.1. Roteirização de veículos

O problema de roteirização de veículos (ou problema de roteamento de veículos ou, simplesmente, PRV) é amplamente abordado na literatura sendo também um dos problemas de otimização combinatória mais estudados devido a sua relevância prática e também a sua considerável dificuldade (Toth e Vigo, 2002). Com o advento do comércio globalizado, os custos logísticos tornam-se cada vez mais importantes por conta de lidar-se com diversos modais e pelos custos de transporte serem cada vez mais representativos no custo total (Ballou, 2004). E, para esta finalidade, é interessante o investimento em modelos matemáticos que auxiliem as operações, através de otimizações, sejam elas de uso das capacidades dos veículos, das rotas utilizadas, ou de ambas.

Em seu princípio, o PRV tem como preocupação a determinação de rotas ótimas a serem utilizadas por uma frota de veículos, baseada em um ou mais depósitos para servir uma série de clientes visando à minimização do trajeto. Outras restrições – e alterações na função objetivo do problema – são adicionadas conforme as aplicações práticas (Toth e Vigo, 2002).

O problema de programação de veículos é considerado uma generalização do *TSP* – *Traveling-Salesman Problem*, apresentado por Flood (1956), onde consistia na apresentação de um método eficiente para minimização das distâncias percorridas, dentre todas as permutações possíveis dos clientes a serem atendidos. Com base nas ideias originais de Flood, o PRV foi formulado, originalmente, por Dantzig e Ramser (1959) e tem como principal fator de novidade a incorporação da capacidade dos veículos dado que, em uma situação onde o veículo comportasse toda a demanda dos clientes, este problema tornaria-se o *TSP*. Sendo assim, o fato capacidade limitada é o que obriga o veículo a retornar ao depósito para que seja efetuado o carregamento e iniciado um novo ciclo de viagens. Os autores apresentam, ainda, algoritmos para agregação dos pontos de demanda e cita, de forma bem embrionária, o caso de demanda de diferentes produtos e veículos de capacidades distintas.

Christofides e Eilon (1969) abordam que um PRV básico consiste na programação de veículos que partam obrigatoriamente de um depósito central e atendam a clientes dispersos em uma determinada e conhecida região, conforme a demanda de cada um e a capacidade de cada veículo – também conhecidos –, de maneira a minimizar os custos despendidos nesta operação ou minimizar o tempo de percurso. Ou seja, deve ser utilizada uma metodologia, para que sejam definidos os melhores percursos para que, dentro das restrições do problema real, tenha-se a otimização desejada. As condições ressaltadas por Christofides e Eilon são:

- toda demanda dos clientes deve ser atendida;
- as capacidades dos veículos não podem ser violadas;
- o tempo ou a distância total de cada veículo não deve exceder algum limite pré-estabelecido (como, por exemplo, questões contratuais existentes).

Com base nisto, deve-se minimizar os custos de traslado, divididos em custos da frota – custos fixos – e os aqueles necessários para completar as entregas – custos variáveis. Em seguida, aborda os tipos de problemas com os quais se depara com as combinações das restrições existentes,

bem como as principais abordagens de solução para este caso (*branch-and-bound approach, the savings approach e 3-optimal tour method*).

Belfiore (2006) realiza em sua obra um extenso estudo sobre os tipos de roteirização de veículos, com base nas classificações feitas por diversos autores. Com isto, explora a diversidade dos problemas da área de roteirização, culminando na apresentação de uma tabela-resumo sobre a taxonomia dos problemas desta área. Em seguida, apresenta um capítulo sobre as estratégias de resolução e complexidade computacional, apresentando métodos exatos mas bastante focado nas heurísticas utilizadas em cada um dos casos, com um quadro-resumo sobre os tipos de problema, restrições, métodos de solução e função objetivo para cada uma das referências utilizadas. São abordados desde o caso de roteirização básica (*VRP – Vehicle Routing Problem*) até o caso *FSMVRPTW (Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem with Time Windows)*, dentre outros.

A Tabela 1, elaborada a partir dos estudos realizados por Belfiore (2006), apresenta as principais dimensões e características que podem constar em problemas de roteirização de veículos esclarecendo, assim, o vasto leque de aplicação destes estudos.

Tabela 1 - Possíveis dimensões e características de problemas de roteirização de veículos (Belfiore, 2006)

Dimensão	Características
Função objetivo	Minizar custos de distribuição: fixos e variáveis Minimizar a distância total percorrida Minimizar o número de veículos Minimizar a duração total das rotas
Restrições dos veículos	Limite de capacidade em peso e volume Operação de carga e descarga dos veículos Limitação do número de veículos disponível de cada tipo
Restrições junto a fornecedores	Janelas de tempo Atendimento parcial ou total das demandas Restrição de serviço em algum dia da semana
Variáveis de decisão	Roteiro que cada veículo deve percorrer Qual veículo deve atender cada cliente em cada viagem Quantidade transportada de cada fornecedor no veículo Instante do início de atendimento de cada cliente da rota
Tipos de operação	Coleta Entrega Coleta e entrega simultaneamente
Tipo de carga	Fracionada De lotação
Tipo de demanda	Determinística Probabilística
Localização da demanda	Localizada nos nós Localizada nos arcos Localizada nos nós e nos arcos
Tamanho da frota	Limitada Ilimitada
Tipo de frota	Homogênea Heterogênea
Depósito de veículos	Um único depósito Vários depósitos
Jornada de trabalho	Duração Horário de almoço e demais interrupções Permissão para viagens de mais de um dia
Outras hipóteses	Cada veículo pode visitar cada cliente uma vez na rota Cada cliente pertence a uma única rota Um cliente pode pertencer a mais de uma rota

Outra informação importante ao se lidar com problemas de roteirização de veículos é que os mesmos possuem um caráter combinatório muito forte, sendo classificados como NP-completos (Goldbarg e Luna, 2005). Com isso, o resultado ótimo pode ser inalcançável em termos práticos.

3.2. Roteirização de veículos com frota heterogênea

Clarke e Wright (1964) propõem a primeira heurística de economias, como uma evolução do estudo realizado por Dantzig e Ramser (1959), adicionando ao mesmo as questões de demandas variadas nos clientes e múltiplas capacidades dos veículos para que a mesma pudesse ser aplicada a um maior número de instâncias. Com base neste raciocínio, são desfeitos os *links* dos trajetos originais, de modo a incorporar-se novos clientes nas rotas já estabelecidas, não excedendo a capacidade do veículo ao adicionar a demanda deste novo cliente inserido na rota.

Golden *et al.* (1984) apresentam em seu trabalho o problema de determinar o dimensionamento da frota e seu correto *mix*, tanto com vistas aos custos de aquisição quanto aos incorridos nas rotas. O foco está no aluguel (e não na aquisição) de veículos durante determinado período de tempo para atender as necessidades da empresa, modelando-os como possuindo um custo fixo e outro variável, sendo este proporcional à distância percorrida (para combustível, manutenção e mão-de-obra). Embora a formulação matemática se mostre pronta sem maiores complicadores, não era conhecido, até então, método para obtenção de uma solução próxima à ótima. Sendo assim, em seguida, são utilizadas as heurísticas de economia (*Savings, Combined Savings, Optimistic Opportunity Savings, Realistic Opportunity Savings*), *giant tour algorithms, the single partition GT algorithm, the multiple partition GT algorithm*, dentre outras, comparando as eficiências de todas elas. É citado, em suas conclusões, que o trabalho de Fisher e Jaikumar (1981) pode ser utilizado para ampliação dos estudos nesta área. Fisher e Jaikumar apresentam uma formulação de programação inteira para minimização dos custos, considerando frota de veículos heterogênea. Por fim, apresentam uma heurística de inserção que supera os resultados obtidos quando da aplicação da heurística de Clarke e Wright (1964).

Dullaert *et al.* (2002) abordam que, ao serem utilizados veículos de diferentes capacidades, é permitida a maximização da utilização da capacidade dos mesmos, enviando veículos menores –

e, em geral, mais baratos – para áreas com menor concentração de clientes. Além disso, é possível que os clientes exijam que apenas alguns tipos de veículo os atendam devido a restrições de acessibilidade. As diferenças em equipamento, capacidade de carregamento e outras demais técnicas podem causar uma diferente estrutura de custos para cada um deles. Analogamente, pode-se verificar similaridade com o caso de *PLSVs* que atendam a determinados poços. Nem todas embarcações estão aptas para atuarem em todas as profundidades marítimas e a capacidade de armazenamento de cada navio também é distinta. Os autores propõem novas heurísticas, adaptadas, para o problema de roteamento de veículos de frota heterogênea, com janelas de tempo e dimensionamento de frota, tendo por base a heurística de inserção de Solomon (1987), com o diferencial de ampliar o modelo de Solomon para uma frota heterogênea e utilizando ideias de inserção de Golden *et al.* (1984).

3.3. Múltiplos roteiros por embarcação

Esta característica ocorre quando um mesmo veículo ou embarcação efetua mais de um roteiro no horizonte de análise.

Drex1 (2012) aborda este tópico em uma taxonomia sobre os tipos de *VRP*. A nomenclatura utilizada para esta questão é planejamento de múltiplas rotas fechadas para cada veículo, com aplicações em entregas, onde os veículos devem retornar ao depósito mais de uma vez por dia para reabastecimento (ou recarregamento).

Um caso onde existe apenas um veículo que atende uma série de consumidores levando produtos perecíveis, com janelas de tempo, é apresentado por Azi *et al.* (2007), caracterizando um *MTVRPTW* (*Multi Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows*). Inicialmente, os autores propõem uma formulação PLIM para o problema em questão. Devido à especificidade do produto carregado e também ao limite de capacidade do veículo, o modelo matemático estabelece, no resultado, quais as rotas e a ordem na qual devem ser realizadas. O objetivo é reduzir a distância percorrida no decorrer de um dia de entregas. Interessante pontuar algumas características da formulação: fazer a união entre os roteiros e estabelecer o tempo de carregamento necessário na base para cada um deles. Os autores também estabelecem um método exato de resolução que se dá

em duas etapas de programação dinâmica: a primeira para criar rotas factíveis e, a segunda, para aglutinar os roteiros de modo a criar a programação do dia inteiro.

Nesta obra, Azi *et al.*(2007) retomaram este assunto, chamado também de múltiplos usos de um veículo, que havia sido levantado, anteriormente, nos trabalhos de Fleischmann (1990) e Taillard *et al.*(1995). Porém, é o primeiro trabalho a apresentar formulação matemática para a solução exata (Giroudeau *et al.*, 2011). Azi *et al.*(2007) também cita em seu artigo que a motivação para o trabalho é o advento de serviços eletrônicos e entregas de mercadorias *delivery* que foram compradas pela *internet*, mostrando-se intrinsecamente atual com as tendências de mercado.

A partir do trabalho de Azi *et al.*(2007), novas instâncias do problema foram apresentadas. Cattaruzza *et al.* (2014) abordam o MTRVP (*Multi Trip Vehicle Routing Problem*) para uma situação onde, por condições legais, são favorecidas as viagens em veículos de pequeno porte. Com isso, durante um dia de trabalho, é necessário que os veículos retornem para o depósito e realizem carregamentos para outros roteiros. As seguintes condições devem ser satisfeitas no caso deste problema:

- cada rota inicia e é finalizada no depósito;
- cada cliente é visitado apenas uma vez;
- a soma das demandas dos clientes em cada rota não pode exceder a capacidade do veículo, todos de capacidade idêntica;
- a duração de todas as rotas direcionadas a um veículo não pode exceder um período de tempo limite, referente à duração de um dia de trabalho.

É desenvolvido um algoritmo chamado memético, com base em algoritmos genéticos, com analogias às permutações de cromossomos.

Azi *et al.* (2010) retomam os trabalhos de Azi *et al.* (2007), mas focando em um caso com múltiplos veículos e uma série de heurísticas de desconstrução e recriação, tendo como o primeiro passo o atendimento ao maior número possível de consumidores para que depois seja minimizada a distância total percorrida pelos veículos.

Giroudeau *et al.* (2011) abordam que trabalhos na área de dimensionamento de frota e multi-viagem são escassos na literatura e a maioria dos mesmos preocupa-se em resolver, diretamente, estes problemas envolvendo meta-heurísticas, não passando pela parte da formulação exata. Os autores aprimoram a formulação matemática para a obtenção do resultado exato feita por Azi *et al.* (2007) incorporando variáveis que limitam a duração de cada viagem de cada veículo (e não apenas limite da jornada diária). Sendo assim, seu problema é do tipo MTRVRPTW-LD (*Multi Trip Vehicle Routing Problem with Time Windows – limited duration*).

3.4. Roteirização e programação de navios

Dada a característica do problema, é essencial que sejam avaliados estudos realizados sobre o problema de programação e roteirização de navios (*ship routing and scheduling problem*). Estes tratarão especificamente de situações em ambiente marítimo que exigiram a utilização de embarcações, tal qual o problema em questão. Alguns deles abordam casos da indústria petrolífera embora não tratem especificamente do caso de roteirização de *PLSVs*.

Nishi e Izuno (2014) abordam um problema de roteirização e programação de navios de transporte de petróleo bruto de diversos tipos com entregas fracionadas, visando à minimização das distâncias e obedecendo à capacidade dos navios-tanque, que coletam petróleo em vários pontos do mundo e o distribuem a alguns clientes. É citado pelos autores que este problema é um desafio para a indústria petroquímica em termos globais. Nota-se, na formulação matemática utilizada, restrições semelhantes àsquelas utilizadas nas situações de roteirização em ambiente terrestre/rodoviário (capacidade das embarcações, restrições de eliminação de *subtours*, restrições de início e fim das rotas, por exemplo). A partir da relaxação deste problema original, utilizam uma heurística baseada no procedimento de geração de colunas de modo iterativo.

Outro trabalho que retrata o transporte de óleo bruto, com recolhimento e entrega de produtos é aquele elaborado por Hennig *et al.* (2012). Os autores abordam que este é um problema de conhecimento da literatura desde a década de 50 e relevante até hoje por conta do abastecimento das refinarias com determinados tipos de petróleo. Características deste problema são a frota heterogênea, a utilização de múltiplos produtos. Outras questões que o deixam ainda mais complexo são as capacidades de carregamento nos portos, cargas fracionadas e as janelas de tempo

tanto para coleta quanto para entrega. Tem-se a preocupação de construir-se um modelo detalhado para esta situação, com bastantes características reais e forte direcionamento ao atendimento das demandas das refinarias por distintos tipos de óleo. É um problema de otimização no qual pequenas instâncias puderam ser resolvidas de modo ótimo quando se utiliza o procedimento da pré-geração de rotas dos navios. A função objetivo visa à minimização dos custos com combustível e de taxas portuárias. Hennig *et al.* (2015) é uma evolução do trabalho citado anteriormente, trazendo uma formulação mais simples e compacta do modelo além de um detalhamento do procedimento de pré-geração das rotas.

Christiansen *et al.* (2013) trazem, em seu trabalho, um levantamento bibliográfico das obras que trataram o tema de roteirização e programação de navios nos últimos anos (dentro do século XXI). Dentro desta revisão literária, estabelecem quais foram os 4 tipos básicos de modelos publicados, de acordo com suas características: modelos com uma única rota ou conjunto de rotas sem transbordo; modelos de transbordo e rotas de alimentação, nos quais cada porto alimentador é conectado a um porto de transbordo; modelos nos quais alguns portos são classificados como portos de transbordo sem nenhuma restrição no número de portos que uma rota pode visitar; e modelos de multi-rotas sem separação de portos de transbordo ou não. Tamanho e composição da frota também são tópicos elencados no trabalho. Abordam também a relevância deste tema para o desenvolvimento global, apresentando o aumento da frota e da carga a ser transportada, de 1980 a 2010.

Lee e Kim (2015) abordam o problema de roteirização com entregas fracionadas, janelas de tempo e frota heterogênea no contexto de uma empresa de manufatura de aço. O caso em questão lida também com dois tipos de navios: próprios, que podem realizar múltiplas coletas e múltiplas entregas em uma rota; e contratados, que realizam atividades de ponto a ponto. Um modelo PLIM é apresentado para o problema bem como o algoritmo de uma heurística, do tipo *Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS)*. Os testes computacionais são realizados com base em 30 instâncias categorizadas em grupos, de acordo com o número de navios utilizados e volume de carga a ser transportada. O percentual de *gap* da heurística com relação à formulação ótima para pequenas instâncias foi menor que 0,5%.

Assis e Camponogara (2016) tratam do problema de navios aliviadores, que realizam o transporte entre as plataformas de petróleo, que se encontram em alto-mar e o terminal terrestre. A operação é caracterizada como um grafo, no qual os vértices representam justamente o terminal e

as plataformas, bem como variáveis de tempo de viagem. As operações possíveis para o navio são a movimentação, o *offloading*, o *uploading* e a espera. A partir desta caracterização, é utilizado um modelo de programação inteira mista para a resolução do caso em questão. São estabelecidas restrições de factibilidade de rotas, número de navios a serem utilizados, balanço de estoque e de transferência de carga. Devido à complexidade do problema e dificuldade em achar-se uma solução factível, recorre-se a dois métodos heurísticos: *rolling-horizon*, no qual se foca em resolver um curto horizonte de tempo em cada iteração; e *relax-and-fix*, no qual o sub-problema a ser trabalhado é o horizonte de tempo inteiro que se possui dali em diante com relaxação de um período inicial destes sub-problemas.

Rodrigues *et al.* (2017) realizam um estudo sobre roteirização e programação de navios para cabotagem de petróleo. Conta com a questão de produtos diferentes a serem transportados, frota heterogênea de embarcações, plataformas dispersas ao longo do mar e terminais de recebimento ao longo da costa brasileira e janelas de tempo. A modelagem deste problema é do tipo PDPTW (*pick-up and delivery problem with time windows*). O modelo matemático proposto pelos autores abrange uma série de detalhes e, portanto, possui certa extensão. Seu objetivo é a minimização dos custos variáveis com combustíveis e fixos, de atracação em plataformas. Foi utilizada a heurística *relax-and-fix* para a resolução de problemas reais que considerem um curto espaço de tempo (até 7 dias).

3.5. Programação de atividades em projetos petrolíferos

Há, na literatura, alguns estudos que versam sobre a mesma temática deste trabalho. Pereira (2005) realiza um trabalho sobre escalonamento de atividades de desenvolvimento de poços de petróleo, valendo-se da meta-heurística GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) como base para resolução. Para obter a solução final, foram incorporadas também outras técnicas. A meta-heurística GRASP é composta por duas fases: uma fase de construção, para que seja encontrada uma solução inicial; e uma fase de busca local, na qual busca-se que a solução inicial seja, gradativamente, melhorada. Para composição de sua dissertação, são apresentados dois artigos: um para o cenário sem tempo para deslocamento de recursos (Pereira *et al.*, 2005b) e outro considerando o tempo de deslocamento de recursos (Pereira *et al.*, 2005c). São apresentadas,

também, algumas telas e funcionalidades do sistema desenvolvido, bem como seu algoritmo, função objetivo e técnicas de busca.

Há alguns anos, foi elaborado pela empresa considerada no trabalho de Pereira (2005), em parceria com universidades, um *software* que tinha por objetivo realizar o nivelamento e programação de curto, médio e longo prazo das embarcações sondas e *PLSVs*, conjuntamente. Na época de sua elaboração, esta ferramenta foi concebida para realização de simulações a nível macro, porém nunca foi utilizada como a oficial para o planejamento de curto e médio prazo que, costumeiramente, é o foco da companhia. Um horizonte muito grande de tempo serve apenas para análises de nível macro, pois o cenário econômico afeta por demais as atividades de uma empresa de petróleo, além de todas as estratégias que se utilizam para direcionar os investimentos dentro de uma empresa que mescla atividades de *upstream* (atividades de exploração e produção de petróleo, visando à retirada do óleo das camadas subterrâneas) e *downstream* (atividades relacionadas à refinação do petróleo e produção de derivados). Além disso, o principal complicador apontado pelos atuais engenheiros que integram a equipe de programação destes recursos críticos da companhia é que este sistema solicitava um número grande de informações como parâmetros de entrada. Isto implicava em uma limitação do sistema, o que fez com que o mesmo passasse a não ser tão utilizado devido à agilidade que se começou a exigir dentro da empresa. Como consequência, há cerca de cinco anos, tal sistema foi descontinuado dentro da companhia.

A proposta deste trabalho é utilizar, para análise, um horizonte de 12 meses, em uma versão mais simplificada – no que diz respeito a necessidades de informações – e que foque especialmente nos recursos *PLSVs*, dado que as imprevisibilidades nas atividades de sondas (cujas durações das atividades já são, por si só, maiores que as de interligação) são grandes e impõem alterações significativas em termos de frequência e duração das atividades. Ou seja, analisando apenas os *PLSVs*, acredita-se que este universo em estudo tenha uma incerteza menor, tornando-se um meio de análise e previsão mais confiável para curto e médio prazo.

Ainda abordando a área de programação de *PLSVs*, Moura (2012) realizou um trabalho utilizando a analogia de atividades de roteirização com as atividades de *scheduling* de máquinas em paralelo. O problema é representado através de um modelo de programação linear inteira mista e tem por função objetivo a minimização do custo de oportunidade. Ele é resolvido aplicando as seguintes técnicas: uma heurística construtiva que encontra um limitante superior; relaxação

lagrangiana da restrição de capacidades das embarcações para estimar os limitantes inferiores e, por fim, um mecanismo de busca local, que investiga a vizinhança das soluções viáveis, realizando um refinamento visando a encontrar um limitante superior melhor. Este procedimento é repetido até que o critério de parada seja atingido. Seu trabalho não leva em consideração os tempos de deslocamento e considera que a frota de embarcações é homogênea, dentre outras diferenças com este presente estudo.

Bianco *et al.* (2014) realizaram um estudo que avalia se há crescimento de VPL com o aumento do número de *PLSVs* focando, especialmente, em dimensionamento da frota destes barcos. Como dados de entrada, foram utilizadas informações públicas e não detalhadas do planejamento estratégico de uma empresa de petróleo. A partir destes dados, foram estimadas datas de conexão dos poços de cada uma das plataformas a entrar em operação nos próximos anos, caracterizando um trabalho de horizonte plurianual. Com base nestas atividades estimadas, utilizou-se uma heurística para definição da data de mobilização de novas embarcações. O Método de Monte Carlo foi também utilizado para incorporar uma análise probabilística de risco ao problema.

Pereira (2005) e Silva (2012) são trabalhos focados na área de implementação computacional e possuem uma linguagem dedicada a esta área do conhecimento, não ressaltando tanto os aspectos de engenharia e processo presentes no problema em questão. O escopo de ambos os trabalhos é mais abrangente e de olhar menos detalhado do que o deste trabalho, dado que lidam não somente com os recursos *PLSV* mas também com os recursos sonda.

Neste momento, cabe salientar os motivos pelos quais foca-se apenas nas embarcações *PLSVs*, desconsiderando as atividades de sondas que precedem a fase de interligação, de modo detalhado (ou seja, não considerando os intervalos necessários de perfuração e completação mas sim apenas a data de finalização do poço).

As atividades de sonda, além de estarem sujeitas à disponibilidade de materiais e condições de mar, possuem várias fases em sua composição dadas as grandes profundidades com as quais se está trabalhando. Devido ao formato dos poços confeccionados (que podem ser verticais, direcionais ou horizontais), não são raras as vezes que ocorrem travamento das ferramentas utilizadas nestas operações. Com isto, há uma série de tempos perdidos por conta do destravamento

destas ferramentas. Ou, ainda, quando há ruptura ou desconexão das ferramentas pode haver perda de tempo para as atividades chamadas de “pescaria”, na qual há a tentativa de se pinçar com ferramentas específicas aquelas que caíram no fundo deste poço em perfuração. Ademais, a camada de sal que deve ser atravessada na perfuração dos poços de camada “Pré-Sal” é um grande complicador técnico, devido às características plásticas daquele material, o que leva a ter uma imprevisibilidade e grande desvio padrão nos tempos das atividades.

Portanto, dadas as maiores imprevisibilidades a que estão sujeitas as atividades de sondas, ou seja, nas fases de perfuração e completação, este trabalho foca apenas nas atividades de *PLSV*, para interligação dos dutos entre os poços e as plataformas. Um cronograma que unisse todas as atividades de embarcações mostra-se muito útil para efeito de planejamento macro (sem muitos detalhes no resultado), de dimensionamento de recursos a longo prazo. Porém, operacionalmente, ele não se apresenta realista.

Bremenkamp *et al.* (2016) tratam do problema de roteirização de *PLSVs* porém partem de um procedimento de pré-criação de blocos de atividades, compostos por carregamento, navegação até o local das atividades, as atividades a serem realizadas e a navegação de retorno ao porto (base de carregamento). Este procedimento já retira toda a parte combinatória do problema de definição de quais atividades fazem parte de cada roteiro de cada embarcação. Este trabalho não considera os eventuais tempos de deslocamento entre as atividades e nem faz menção à questão de declínio de poços ou acréscimo de produção por conta dos poços injetores. Devido à menor característica combinatória, conseguem solução ótima para alocação destes blocos de atividades nos *PLSVs* e utilizam-se de contagem de tempo discreta, e não contínua.

Como se vê nesta revisão bibliográfica, há trabalhos que abordam a alocação de atividades com *PLSVs* como uma analogia ao problema de *scheduling* em máquinas, considerando cada atividade a ser alocada a um barco como uma tarefa a ser processada em determinada máquina. Assim, por exemplo, as navegações entre locações poderiam ser consideradas como os tempos de *setup* entre atividades a serem processadas em uma mesma máquina; a não-concomitância entre 3 atividades poderia ser tratada como um produto que precisa de 3 processamentos distintos, que não podem ser realizados com simultaneidade, sem ordem.

Todavia, optou-se pela estratégia de resolução baseada em formulações específicas de roteirização por conta de algumas questões peculiares do problema: carregamento conjunto dos

materiais que serão utilizados em atividades de um mesmo roteiro de uma mesma embarcação; por conta de precisar ser controlada a capacidade de estocagem das embarcações, que são heterogêneas; não existe, no problema em questão, uma data de necessidade de entrega, mas sim um desejo de antecipação de todas as atividades para que se aumente o volume de produção; além de guardar um melhor sentido físico com a operação que ocorre, a qual é efetivamente uma roteirização de embarcações.

4. Formulação matemática

Nesta seção, será realizada a modelagem matemática do problema em questão, com o detalhamento de índices, parâmetros e variáveis, bem como das restrições e seu funcionamento. Por fim, serão efetuados testes para verificação da robustez da formulação proposta.

4.1. Elaboração do modelo matemático

O intuito deste modelo matemático é traduzir a situação na qual barcos de interligação (*PLSVs*) realizem a conexão de poços de petróleo às plataformas de produção. Visando à maximização da produção de óleo nestes campos petrolíferos, o modelo dará como resposta, através dos valores assumidos por suas variáveis na solução ótima, a ordem na qual os poços de petróleo devem ser interligados e em qual barco e tempo estas interligações devem acontecer. Ou seja, com isto tem-se a roteirização que otimiza a curva de óleo dos campos em questão. A cada roteiro a ser efetuado, há a necessidade de o barco ir até a base de carregamento e armazenar as linhas a serem utilizadas nas atividades deste próximo roteiro.

O modelo proposto é de programação linear inteira mista (PLIM), no qual há uma intrínseca relação entre os índices i e p . Para cada poço p , há 3 atividades i atreladas a ele, sempre em ordem. Ou seja, para o poço 1, tem-se as atividades 1, 2 e 3. Para o poço 2, tem-se as atividades sequenciais, ou seja, as de número 4, 5 e 6. O conjunto N representa o conjunto das atividades a serem realizadas e o conjunto N^+ representa o conjunto N adicionado das atividades 0 e $I+1$ representativas da base de carregamento (saída e chegada à base).

Índices

- i : atividade;
- j : atividade final do arco;
- h : atividade intermediária;
- b : barco;
- r : roteiro;
- p : poços;
- p^* : poço produtor;
- p' : poço injetor;
- π : período de operação (ordinal) de um poço produtor.

Parâmetros

- P : número total de poços;
 I : número total de atividades;
 B : número total de barcos PLSVs;
 T : número total de dias na análise;
 R : número de roteiros que cada barco está apto a realizar no horizonte de tempo;
 d_{ij} : duração do traslado entre as atividades i e j (em dias);
 s_i : duração da atividade i (em dias);
 m_i^b : 1, caso o barco b seja capaz de realizar a atividade i no poço p ; 0, c.c.;
 W_p^π : potencial de produção, por período de operação π , do poço produtor p^* (barril/dia);
 Inj_p^π : acréscimo de produção, por período de operação do produtor atrelado π , devido ao poço injetor p' (%);
 DC_i : instante a partir do qual a completação, prévia à atividade i , está finalizada;
 DM_i : instante a partir do qual o material da atividade i está disponível para carregamento;
 q_i : quantidade de duto para a atividade i (em Km de duto);
 Q_b : capacidade de armazenamento do barco b (em Km de duto);
 $comis$: tempo para comissionamento da linha após sua instalação (em dias);
 β : taxa de carregamento, em dias/Km de duto.

Variáveis

- X_{ij}^{rb} : 1, se o barco b , na rota r , realiza a atividade j logo após a atividade i ; 0, c. c.;
 Y_i^{rb} : 1, se a atividade i está na rota r do barco b ; 0, c. c.;
 t_i^{rb} : instante de início da atividade i , no roteiro r do barco b ; especialmente para a atividade 0, é o instante no qual o barco deixa o centro de carregamento em cada roteiro r de cada barco b ;
 g_i^{rb} : instante de início da atividade i , no roteiro r do barco b ; contabiliza somente os instantes utilizados nos roteiros e não os cálculos intermediários, como o t_i^{rb} ;
 α_i : variável auxiliar para definição da data de realização da atividade i de cada poço
 $a_{i1,i2}$: 1, caso a atividade $i1$ ocorra antes da atividade $i2$, sendo $i1$ e $i2$ atividades de um mesmo poço; 0, c.c.;
 σ^{rb} : duração do carregamento dos dutos das atividades que compõem o roteiro r do barco b ;
 k_p : instante a partir do qual o poço p pode entrar em operação.
 μ_p^π : 1, se o poço produtor p^* tem seu π -ésimo período de operação dentro do intervalo de análise; 0, c.c.;
 γ_p^π : 1, se o poço injetor p' atua no π -ésimo período de operação de seu respectivo produtor de dentro do intervalo de análise; 0, c.c.;

Modelo

$$MAX \sum_{\pi=1}^T \sum_{p^*/p'} W_{p^*}^{\pi} (\mu_{p^*}^{\pi} + Inj_{p'}^{\pi} \gamma_{p'}^{\pi}) \quad (1)$$

$$\sum_{j \in N^+ \setminus 0} X_{ij}^{rb} = Y_i^{rb} \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (2)$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R Y_i^{rb} = 1 \quad i \in N \quad (3)$$

$$\sum_{i \in N^+} X_{ih}^{rb} - \sum_{j \in N^+} X_{hj}^{rb} = 0 \quad h \in N, \forall r, \forall b \quad (4)$$

$$\sum_{i \in N^+} X_{0i}^{rb} = 1 \quad \forall r, \forall b \quad (5)$$

$$\sum_{i \in N^+} X_{i(I+1)}^{rb} = 1 \quad \forall r, \forall b \quad (6)$$

$$\sum_{i \in N} q_i Y_i^{rb} \leq Q_b \quad \forall r, \forall b \quad (7)$$

$$t_i^{rb} + s_i + d_{ij} - M(1 - X_{ij}^{rb}) \leq t_j^{rb} \quad i \in N^+, j \in N^+, \forall r, \forall b \quad (8)$$

$$t_0^{rb} \geq DM_i Y_i^{rb} + \sigma^{rb} \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (9)$$

$$\sigma^{rb} = \beta \sum_{i \in N} q_i Y_i^{rb} \quad \forall r, \forall b \quad (10)$$

$$t_{l+1}^{rb} + \sigma^{(r+1)b} \leq t_0^{(r+1)b} \quad r = 1, \dots, R-1; \forall b \quad (11)$$

$$Y_i^{rb} \leq m_i^b \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (12)$$

$$t_i^{rb} \geq DC_i \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (13)$$

$$g_i^{rb} \geq t_i^{rb} - M(1 - Y_i^{rb}) \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (14)$$

$$g_i^{rb} \leq t_i^{rb} + M(1 - Y_i^{rb}) \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (15)$$

$$g_i^{rb} \leq MY_i^{rb} \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (16)$$

$$\begin{aligned} k_p &\geq \sum_{r=1}^R \sum_{b=1}^B g_{(3p-2)}^{rb} + s_{3p-2} + \text{comis} \\ k_p &\geq \sum_{r=1}^R \sum_{b=1}^B g_{3p-1}^{rb} + s_{3p-1} + \text{comis} \\ k_p &\geq \sum_{r=1}^R \sum_{b=1}^B g_{3p}^{rb} + s_{3p} + \text{comis} \end{aligned} \quad \forall p \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-2}^{rb} - \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-1}^{rb} + s_{3p-2} &\leq M(1 - a_{3p-2,3p-1}) \\ \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-1}^{rb} - \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-2}^{rb} + s_{3p-1} &\leq Ma_{3p-2,3p-1} \\ \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-1}^{rb} - \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p}^{rb} + s_{3p-1} &\leq M(1 - a_{3p-1,3p}) \\ \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p}^{rb} - \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-1}^{rb} + s_{3p} &\leq Ma_{3p-1,3p} \end{aligned} \quad \forall p \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-2}^{rb} - \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p}^{rb} + s_{3p-2} &\leq M(1 - a_{3p-2,3p}) \\ \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p}^{rb} - \sum_{b=1}^B \sum_{r=1}^R g_{3p-2}^{rb} + s_{3p} &\leq Ma_{3p-2,3p} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \alpha_i &\geq DC_i \\ \alpha_i &\geq DM_i \end{aligned} \quad i \in N \quad (19)$$

$$t_i^{rb} \leq \alpha_i + 120 \quad i \in N, \forall r, \forall b \quad (20)$$

$$X_{ii}^{rb} = 0 \quad i \in N^+, \forall r, \forall b \quad (21)$$

$$\mu_{p^*}^\pi \leq \frac{T - k_{p^*}}{\pi} \quad \forall \pi, \forall p^* \quad (22)$$

$$\pi \gamma_{p'}^\pi + M(1 - \gamma_{p'}^\pi) \geq k_{p'} - k_{p^*} + 1 \quad \forall \pi, \forall par \ p^*/p' \quad (23)$$

$$\mu_{p^*}^\pi \geq \gamma_{p'}^\pi \quad \forall \pi, \forall par \ p^*/p' \quad (24)$$

$$t_i^{rb} \geq 0 \quad i \in N^+, \forall r, \forall b \quad (25)$$

$$g_i^{rb} \geq 0 \quad i \in N^+, \forall r, \forall b \quad (26)$$

$$k_p \geq 0 \quad \forall p \quad (27)$$

$$\alpha_i \geq 0 \quad i \in N \quad (28)$$

$$\sigma^{rb} \geq 0 \quad \forall r, \forall b \quad (29)$$

$$X_{ij}^{rb} \text{ binárias} \quad i \in N^+, j \in N^+, \forall r, \forall b \quad (30)$$

$$Y_i^{rb} \text{ binárias} \quad i \in N^+, \forall r, \forall b \quad (31)$$

$$a_{i1,i2} \text{ binárias} \quad i1, i2 \in N \quad (32)$$

$$\mu_p^\pi \text{ binárias} \quad \forall \pi, \forall p^* \quad (33)$$

$$\gamma_p^\pi \text{ binárias} \quad \forall \pi, \forall p' \quad (34)$$

A função objetivo (1) visa ao maior volume de produção dentro do horizonte de tempo considerado. Neste ponto, vale a pena esclarecer melhor a diferença entre o tempo t e o tempo π : t é o tempo do cronograma, que vai de 0 até o horizonte de análise T , podendo um poço entrar em operação em qualquer ponto deste intervalo; já π é o período de operação do poço produtor, e inicia necessariamente do período 1. Sendo assim, a função objetivo considera a multiplicação, em cada período de operação, do potencial de produção (do poço produtor), (W_p^π) , pelas variáveis que indicam em quais períodos o poço estará produzindo (μ_p^π) e, em quais destes momentos haverá operação do(s) poço(s) injetor(es) atrelado(s), resultando em um fator de aumento de produção dado por $Inj_p^\pi \gamma_p^\pi$. Esta função objetivo poderia ser reescrita como a minimização das perdas de produção de óleo devido aos poços ainda não estarem produzindo. Porém, por motivo de melhor compreensão do modelo optou-se pela maximização da produção no período de interesse. Importante salientar que π é o tempo de operação do poço produtor mesmo quando está se tratando de poços injetores. Neste caso, o π começa a contar a partir da entrada em operação de seu respectivo produtor.

O conjunto de restrições (2) exprime que, se alguma atividade é atendida em determinado roteiro de algum barco ($Y_i^{rb} = 1$), é necessário que haja um arco de saída com destino a uma atividade j (que pode ser uma atividade na base $I+I$ ou para a execução de uma atividade em qualquer outra locação), ou seja, um, e apenas um $X_{ij}^{rb} = 1$.

As restrições (3) implicam que todas as atividades devem ser atendidas. Importante notar que atividades de partida e de chegada à base de carregamento não são consideradas nesta restrição, pois devem ocorrer uma vez em cada roteiro de cada barco, como será visto adiante.

As restrições (4) são as responsáveis pela existência de fluxo nas rotas de cada embarcação. Dado que uma atividade h está sendo atendida, garante-se que, antes dela houve uma atividade i atendida e, após ela, haverá uma atividade j a ser atendida. As atividades i e j podem ser atividades efetuadas na partida e na chegada à base (0 e $I+I$, respectivamente).

Os conjuntos de restrições (5) e (6) são responsáveis pela exigência de partida e chegada à base em cada roteiro de cada PLSV, respectivamente. Em cada rota de cada barco, ele deve sair do nó 0 e deve chegar ao nó $I+I$, ambas atividades representativas da base, sendo que as mesmas não possuem duração, apenas existem para que seja fechado o ciclo. Tempo de carregamento das linhas na base será tratado em outra restrição, apresentada adiante.

A garantia de que a quantidade de dutos a serem carregados em cada roteiro de cada embarcação não ultrapassa a capacidade Q_b do PLSV é assegurada pelas restrições (7). A multiplicação do comprimento de cada duto carregado pela variável binária Y_i^{rb} implica que, quando $Y_i^{rb} = 1$ naquele roteiro daquele barco, as linhas daquela determinada atividade deverão ser carregadas naquele barco. A somatória dos quilômetros das linhas carregadas naquele roteiro não pode ultrapassar a capacidade de armazenamento do PLSV.

As restrições (8) explicam como, dentro de um mesmo roteiro de um mesmo barco, há a continuidade do tempo. Sendo j a atividade imediatamente seguinte à atividade i em um roteiro r de um barco b , o valor de X_{ij}^{rb} é 1 e o valor de $-M(1 - X_{ij}^{rb})$ é zero. M é um número grande, tendo, para esta formulação, o seu valor atribuído como 10000. Com isto, tem-se que $t_i^{rb} + s_i + d_{ij} \leq t_j^{rb}$, ou seja, o instante de início da atividade seguinte, j , é maior ou igual ao instante de início da atividade anterior, i , adicionada do tempo de execução da atividade i - s_i - e do tempo de traslado entre o local onde é executada a atividade i e onde será feita a atividade j - d_{ij} . Como, na formulação como um todo, o intuito é que as atividades sejam realizadas o quanto antes para que os poços entrem em produção e isso favoreça a função objetivo, a tendência é que esta desigualdade ($\leq$) atue como uma igualdade. No caso de j não ser a atividade seguinte de i neste roteiro e embarcação, o valor de $-M(1 - X_{ij}^{rb})$ é $-M$. Com isso, t_j^{rb} não fica limitado para esta rota e embarcação por conta desta atividade predecessora, não havendo interferência.

O conjunto de restrições (9) expressa que um PLSV só possa sair da base carregado a partir do instante em que todas as linhas estejam disponíveis. Sendo assim, a partir do momento em que a linha da atividade i está disponível (DM_i), pode-se somar o valor da duração daquele determinado carregamento σ^{rb} . Este dá o instante mínimo de partida daquele roteiro considerando apenas uma das linhas do roteiro. Para a formulação como um todo, é considerado para o limite t_0^{rb} o instante mais tarde dentre todas as linhas daquele carregamento. É assumido, também, que o carregamento de todas as linhas só poderá ser realizado com todas as linhas do mesmo disponível. Não poderá ser realizado carregamento parcial com, por exemplo, espera da embarcação por apenas uma linha restante para que ela seja carregada sozinha.

O conjunto de restrições (10) traduz o cálculo do tempo a ser gasto no carregamento das linhas de um roteiro (σ^{rb}). Os componentes deste cálculo são: a quantidade (comprimento) de linhas de cada atividade i (q_i), que são ativadas na multiplicação caso o Y_i^{rb} tenha valor 1, o que representa que a atividade i compõe o roteiro r da embarcação b ; e um parâmetro β que representa o tempo, em dias, gasto para o carregamento de cada Km de linha.

As restrições (11) referem-se à transição entre roteiros dentro de mesma embarcação. Ou seja, a continuidade de tempo quando o primeiro roteiro encerra-se (ocorrendo, assim, o retorno para a base de carregamento) e há a preparação para o início do próximo roteiro do mesmo PLSV. Expressam que o instante inicial do próximo roteiro é, no mínimo, o instante final do roteiro anterior acrescido do tempo de carregamento do próximo carregamento. No mínimo, pois pode haver ainda alguma restrição de chegada de material na base que pode impactar mais alguns dias. Num cenário no qual já estão disponíveis os recursos necessários, esta desigualdade deve atuar como uma igualdade.

As restrições (12) avaliam se determinada atividade pode ser realizada pelos barcos da frota. Para tanto, Y_i^{rb} somente poderá ter seu valor maior do que 0 caso o parâmetro m_i^b tenha valor 1. O valor 1 para m_i^b significa que a atividade é viável tecnicamente para este PLSV. Será fornecida uma matriz de parâmetros m_i^b com a finalidade de verificação dos PLSVs que podem ser utilizados para cada uma das tarefas a serem executadas.

O conjunto de restrições (13) impede que atividades de interligação sejam realizadas antes que a atividade de completção referente tenha sido finalizada. Serão fornecidos, como parâmetros de entrada, os instantes de finalização da completção.

As restrições (14) são utilizadas para cálculo dos instantes que são, de fato, utilizados em cada um dos roteiros. Como as variáveis t_i^{rb} são, por vezes, utilizadas para cálculos, aqui são estabelecidas as variáveis g_i^{rb} , que serão variáveis que assumem valores apenas quando a atividade é atendida. Estas variáveis serão importantes nas restrições que vinculam o instante de início de determinada atividade com o instante k_p de finalização das mesmas. Serão igualmente importantes nas restrições que evitam a concomitância de duas embarcações em um mesmo poço, como será visto adiante. Caso Y_i^{rb} tenha valor 1, $g_i^{rb} \geq t_i^{rb}$. Conjuntamente com as restrições (15), que resultam em $g_i^{rb} \leq t_i^{rb}$ para $Y_i^{rb} = 1$, tem-se que g_i^{rb} só pode assumir valor igual a t_i^{rb} . As restrições (16) obrigam que g_i^{rb} tenha valor nulo caso Y_i^{rb} seja zero.

O conjunto de restrições (17) indica o valor do instante mais cedo de início de produção de cada um dos poços. Sabendo que cada poço é composto de 3 atividades de interligação, estas restrições calculam a data mais cedo de finalização de cada uma como se ela fosse a atividade crítica do poço. Estas 3 equações referem-se, respectivamente, à primeira, segunda e terceira atividade de um mesmo poço. Por exemplo, o termo $\sum_{r=1}^R \sum_{b=1}^B g_{(3p-2)}^{rb}$ indica, no somatório de todos roteiros e barcos, qual foi o instante de início da atividade i (no caso, representada por $3p-2$). Dado que somente existe um $g_{(3p-2)}^{rb}$ positivo, garante-se que este somatório expressa exatamente o instante de início da atividade. A este somatório, adiciona-se a duração da atividade s_{3p-2} , de modo a ter o instante de término da atividade. Acresce-se, ainda, o tempo de comissionamento (*comis*) de modo a ter este tempo computado no caso de cada uma destas atividades daquele poço ser a crítica. Analogamente, para estes termos nas equações 2 e 3 expressas no conjunto (17). A data mais cedo k_p é definida, portanto, como o maior valor destas 3 equações, para cada p .

As restrições (18) impedem que mais de uma embarcação atuem ao mesmo tempo em um mesmo poço. Dado que cada poço possui 3 atividades, estas restrições permitem que uma atividade de interligação ou deva ser finalizada antes do início de outra atividade ou que a atividade seja iniciada após o término de uma outra atividade no mesmo poço. São utilizadas as variáveis g_i^{rb} porque as mesmas não são influenciadas por cálculos intermediários, tal qual ocorre com as variáveis t_i^{rb} . As variáveis $a_{i1,i2}$ indicam a ordem na qual as atividades ocorrem. Se ela assume valor 1, significa que a atividade $i1$ acontece antes da atividade $i2$.

As restrições (19) possuem intrínseca relação com o conjunto de restrições (20) e utilizam-se da variável auxiliar α_i para cálculo do prazo limite no qual deve ocorrer o início da interligação

da linha de cada atividade e foi inserida na formulação, especialmente, por conta dos poços injetores. O prazo máximo, assumido como 120 dias após o término da completção e da disponibilidade de materiais (o que ocorrer mais tarde) é chamado de $\alpha_i + 120$, prazo este que, por sua vez, limita o valor de t_i^{rb} , efetivando o que a restrição se propõe a fazer. Vale ressaltar, mais uma vez, que estas restrições são aplicáveis preferencialmente, mas não somente, aos poços injetores dado que os mesmos tendem a ser despriorizados por não contribuírem tanto para o aumento da curva de produção de óleo quanto os poços produtores.

O conjunto de restrições (21) impede os *subtours* de uma atividade para ela própria, ou seja, impede a criação de arcos do tipo $i - i$.

O conjunto de restrições (22) discretiza o período no qual cada poço produtor irá produzir dentro do horizonte de análise T . Dado que o potencial W_p^* de cada poço é dado pelo período π de produção do poço e considera o declínio de produção, é necessário que se saiba durante quantos períodos o poço irá produzir. Importante ressaltar, novamente, a diferença entre o tempo t e o tempo π : t é o tempo do cronograma, que vai de 0 até o horizonte de análise T , podendo um poço entrar em operação em qualquer ponto deste intervalo; já π é o tempo de operação do poço produtor, e inicia necessariamente do período 1. Sendo assim, se um poço produzir por 30 períodos, as variáveis $\mu_p^1, \dots, \mu_p^{30}$ devem valer 1 e, as demais, devem valer 0. O valor de $\frac{T-k_p}{\pi}$ vai se tornando cada vez menor com o aumento do valor de π , dado que $T - k_p$ é um valor constante, oriundo da parcela da formulação que define a data de partida dos poços, trabalhando com variáveis contínuas. Assim, o valor do segundo membro vai limitando, pouco a pouco, o valor de μ_p^π . Dado que o problema é de maximização, μ_p^π tende a ser sempre 1, a não ser que o valor do segundo membro o limite a um valor menor do que 1. Com estas restrições, garante-se que todos μ_p^π serão positivos até o momento de inversão, no qual $\frac{T-k_p}{\pi}$ torna-se menor que 1, o que força μ_p^π assumir valor 0. Esta inversão ocorre exatamente na restrição na qual π converge ao valor de $T - k_p$, assegurando o comportamento desejado.

As restrições (23) são aplicáveis aos poços injetores, tendo por base o instante de entrada de seu respectivo poço produtor (k_p^*). Importante relembrar que π é o período de operação do poço produtor mesmo quando está se tratando de seu respectivo poço injetor. Dado que o valor de $k_{p'} - k_p^*$, a diferença entre o instante de entrada do poço injetor e de seu respectivo produtor, é oriundo

da parte da formulação que trabalha com tempo contínuo, e sabendo que $\gamma_{p'}^\pi$ são variáveis binárias que contabilizam para a maximização da função objetivo, o intuito é que $\gamma_{p'}^\pi$ assumam o valor 1 o quanto antes. Enquanto $k_{p'} - k_{p^*} + 1$ (o segundo membro da restrição 23) possuir um valor maior que o coeficiente π que acompanha $\gamma_{p'}^\pi$, a expressão $1 - \gamma_{p'}^\pi$, obrigatoriamente, assumirá valor 1 para que o primeiro membro seja maior ou igual ao segundo membro. Garante-se que, neste caso, $\gamma_{p'}^\pi$ assumirá valor 0 e não adicione valor à função objetivo. Do contrário, quando a expressão $k_{p'} - k_{p^*} + 1$ tiver um valor menor ou igual ao coeficiente π que acompanha $\gamma_{p'}^\pi$, tem-se que o valor de $\gamma_{p'}^\pi$ poderá ser 0 ou 1 para obedecer a esta restrição. Nesta condição, o modelo escolhe que o valor de $\gamma_{p'}^\pi$ deve ser 1 pois esta decisão incrementa a função objetivo.

Por exemplo, em uma situação na qual o poço produtor entre no instante 5 (ou seja, este é o k_{p^*}) e seu respectivo injetor entre no instante 9 (sendo este o valor de $k_{p'}$), haveria o seguinte cenário: os quatro primeiros períodos de produção do poço produtor não possuiria injetor em operação. Sendo assim, $\gamma_{p'}^1, \gamma_{p'}^2, \gamma_{p'}^3$ e $\gamma_{p'}^4$ devem possuir valor zero. Os termos de $\gamma_{p'}^5$ em diante devem ser positivos (até o limite T de análise, garantido pelas restrições 22 e 24), demonstrando que o injetor já está operando e pode adicionar valor à função objetivo. Este raciocínio explica a necessidade de adicionar uma unidade à expressão $k_{p'} - k_{p^*}$ pois, de outra forma, o termo $\gamma_{p'}^4$ já poderia ter valor 1, o que não é desejável. Isto se explica pois a inequação é do tipo maior ou igual ($\geq$) e permitiria que $4\gamma_{p'}^4$ ($\pi\gamma_{p'}^\pi$, do primeiro membro da restrição 23) fosse maior que 4 (valor de $k_{p'} - k_{p^*}$). Adicionando-se uma unidade, garante-se que apenas do quinto elemento ($\gamma_{p'}^5$) em diante possa assumir valor 1.

O conjunto de restrições (24) possui a finalidade de impedir que um injetor acrescente valor à função objetivo antes da entrada do produtor associado ou após a finalização do horizonte de análise. Assim como nas restrições (23), elas são aplicáveis para cada par de poço – um produtor com seu respectivo injetor.

As restrições (25), (26), (27), (28) e (29) são os domínios das variáveis que, por se relacionarem a tempo, podem assumir valores reais e maiores ou iguais a zero. As restrições (30), (31) e (32), (33) e (34) também versam sobre o domínio das variáveis que, no caso, são binárias.

4.2. Caso-piloto para a formulação matemática

Para que pudesse ser verificada a eficácia da formulação proposta, foi realizado um estudo piloto de um pequeno caso, programado no *software* CPLEX em um computador Dell Studio XPS 8100, de processador Intel Core i7 de 2,93 GHz e memória RAM de 16Gb. O problema contempla todos os fatores abordados na formulação porém, é composto de apenas 2 poços – 1 produtor e 1 injetor e, portanto, constam 6 atividades de interligação – e 2 *PLSVs*. Veja na Figura 5 a configuração deste problema piloto.

Figura 5 - Esquema do problema piloto para teste da formulação matemática

Como dados de entrada do problema, precisa-se dos tempos de traslado d_{ij} , que podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 - Tempos de traslado entre as atividades (em dias)

		Para							
		At. 0	At. 1	At. 2	At. 3	At. 4	At. 5	At. 6	At. 7
De	At. 0	0	2	2	2	3	3	3	0
	At. 1	2	0	0	0	1	1	1	2
	At. 2	2	0	0	0	1	1	1	2
	At. 3	2	0	0	0	1	1	1	2
	At. 4	3	1	1	1	0	0	0	3
	At. 5	3	1	1	1	0	0	0	3
	At. 6	3	1	1	1	0	0	0	3
	At. 7	0	2	2	2	3	3	3	0

Os valores utilizados como parâmetros de entrada para o caso piloto serão todos fictícios, apenas utilizados para validação da formulação. Pode ser visto na Tabela 2 que, para atividades a serem efetuadas no mesmo poço, o tempo de traslado é nulo. Da base, para o poço 1, o tempo é 2 e vice-versa. Da base para o poço 2, o tempo é 3 e vice-versa. Para percursos entre os poços, o tempo de traslado é 1. As atividades 0 e 7 representam a base de carregamento.

Os outros parâmetros de entrada podem ser verificados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros de entrada para caso piloto

p	Tipo	i	s_i	q_i	DC_i	DM_i
1	Produtor	1	3	5	4	3
		2	4	4	4	8
		3	5	6	4	7
		4	5	6	6	2
2	Injetor	5	6	4	6	10
		6	7	5	6	12

Na Tabela 3, há os dados para os dois poços. Em ordem: o tipo do poço, o número de cada uma das atividades atreladas (i), a duração prevista para execução da mesma (s_i), o tamanho do duto de cada atividade (q_i), o instante fim da completação do poço (DC_i) e o instante a partir do qual o material está disponibilizado na base para carregamento (DM_i).

Para este caso, assume-se que as duas embarcações são idênticas e ambas são capazes, tecnicamente, de realizar todas as atividades. Ou seja, m_i^b possui valor 1 para todos os casos,

independente da atividade e do *PLSV* em questão. O limite de armazenamento das embarcações, em cada roteiro, também é igual e assumido como 12 Km de duto. Trabalha-se também com um tempo de 180 dias para análise do volume de produção a ser obtido na configuração ótima que se deseja alcançar. Para cada embarcação foi possibilitado que realizasse até 3 roteiros sequenciais.

A curva de potencial de produção para este teste é assumida com seu valor inicial em 180 (primeiro dia em que ele produzir) e vai decrescendo uma unidade a cada dia de produção. Quanto ao poço injetor (poço 2), assume-se que, quando o mesmo entrar em operação, irá adicionar 3% ao volume produzido no momento pelo poço 1.

Realizando a programação, obtém-se na saída do CPLEX as seguintes variáveis X_{ij}^{rb} com valor positivo, conforme a Tabela 4.

Tabela 4 - Índices das variáveis X_{ij}^{rb} positivas na solução ótima

Índice da variável X_{ij}^{rb}			
<i>i</i>	<i>j</i>	<i>r</i>	<i>b</i>
0	1	1	1
1	7	1	1
0	2	2	1
2	7	2	1
0	5	3	1
5	4	3	1
4	7	3	1
0	3	1	2
3	7	1	2
0	7	2	2
0	6	3	2
6	7	3	2

Analisando o conjunto roteiro e embarcação, pode-se traçar os roteiros definidos no caminho ótimo bem como cruzar os dados com o início do atendimento em cada um destes instantes, como apresenta a Tabela 5.

Tabela 5 - Dados de saída de tempo e ordem de atendimento, por roteiro-embarcação

Embarcação/Roteiro		Percurso/Instantes de início				
b = 1	r = 1	Trajetos	At. 0	At. 1	At. 7	
		g_i^{11}	5,5	7,5	12,5	
	r = 2	Trajetos	At. 0	At. 2	At. 7	
		g_i^{21}	14,5	17	23	
	r = 3	Trajetos	At. 0	At. 5	At. 4	At. 7
		g_i^{31}	28	31,5	38	46
b = 2	r = 1	Trajetos	At. 0	At. 3	At. 7	
		g_i^{12}	10	12	19	
	r = 3	Trajetos	At. 0	At. 6	At. 7	
		g_i^{32}	21,5	24,5	34,5	

Quando se analisa cada um dos roteiros, dentro de cada embarcação, nota-se que os mesmos guardam sentido. Alguns fatos que merecem ser destacados:

- embora a sequência rigorosa de numeração dos roteiros não seja respeitada (por exemplo, na embarcação 2, não há roteiro 2 apenas os roteiros 1 e 3), a resposta guarda sentido. Isto deve-se ao fato de existir múltiplas respostas ótimas. Sendo utilizados dois roteiros de uma mesma embarcação, poderiam ser escolhidos pelo software os roteiros 1 e 2, ou 2 e 3, ou 1 e 3. Em termos de resposta, o que se espera é que os instantes de início do roteiro posterior fossem maiores e sequenciais aos do roteiro anterior;
- analisando os instantes resultantes nas variáveis g_i^{rb} , verifica-se que eles são totalmente condizentes com aquilo que é esperado, de acordo com os dados de entrada. Isto pode ser melhor verificado através de um gráfico de Gantt, com visão de recurso *PLSV* e visão de atividades de poço, conforme apresentado na Figura 6. Pode-se verificar que são obedecidos, os tempos de espera de materiais (no início do percurso de cada barco), carregamentos (de acordo com a quantidade de Km de linhas de dutos em cada roteiro), navegações e período de execução das atividades;

Figura 6 - Gráfico de Gantt com visão recursos e atividades para caso piloto

- os tempos de carregamento são calculados de acordo com as restrições (9) e (10);
- a Tabela 6 apresenta a quantidade de dutos em cada roteiro bem como o tempo, em dias, esperado para o carregamento dos mesmos, em cada roteiro;

Tabela 6 - Quantidade de dutos e tempos de carregamento para caso piloto

	Atividades	Quantidade de duto (Km)	Tempo de carregamento (d)	F. Obj.
Roteiro 1 – Barco 1	1	5	2,5	16357,83
Roteiro 2 - Barco 1	2	4	2	
Roteiro 3 - Barco 1	5 e 4	10	5	
Roteiro 1 - Barco 2	3	6	3	
Roteiro 3 - Barco 2	6	5	2,5	

- quando se realiza uma alteração na quantidade de barcos disponíveis tem-se, como esperado, resultados diferentes na otimização. As Figuras 7 e 8 trazem os resultados para, respectivamente, os casos de acréscimo de uma embarcação (3 embarcações, factíveis para todas as atividades, de capacidade igual ao caso original, com até 2 roteiros por *PLSV*) e caso de decréscimo de uma embarcação (1 embarcação, factível para todas as atividades, de capacidade ainda igual, com até 6 roteiros no *PLSV*). Quanto mais embarcações se possui disponíveis para a geração da roteirização, mais antecipado é o trabalho, em geral. Um quadro resumo pode ser visto na Tabela 7.

Figura 7 - Gráfico de Gantt com visão recursos e atividades para caso piloto com acréscimo de um PLSV

Figura 8 - Gráfico de Gantt com visão recursos para caso piloto com redução de um PLSV

Tabela 7 - Quadro resumo dos casos piloto para teste da formulação matemática

	Instante fim da atividade						Instante entrada poço		F. Obj.
	At.1	At. 2	At.3	At.4	At.5	At.6	Poço 1	Poço 2	
1 PLSV	10,5	28,5	24,5	58	41,5	65	32	68	16.059,36
2 PLSVs	10,5	21	20	43	37,5	31,5	24	46	16.357,83
3 PLSVs	10,5	21	17	13	27	34	24	37	16.401,84

A Tabela 7 mostra que, de maneira geral, quanto mais *PLSVs* são utilizados, o término das tarefas é antecipado e, com isto, os poços entram em operação antes e o valor da função objetivo aumenta. Uma série de testes foram realizados, variando-se a quantidade de *PLSVs*, número de roteiros por embarcação utilizada, quantidade de poços e atividades a serem efetuadas, verificando-se a variação em termos de tempo de processamento e resultado da função objetivo. Foram mapeadas também a quantidade de restrições e de variáveis binárias e reais utilizadas na configuração de cada um dos problemas.

Para a realização do teste completo, o caso inicial apresentado foi extrapolado para um de 9 atividades. A Tabela 8 e a Figura 9 resumem os dados de entrada para os testes computacionais ampliados.

Tabela 8 - Insumos para os testes computacionais ampliados

p	i	si	qi	DCi	DMi	Plataforma
p1	1	3	5	4	3	U1
	2	4	4	4	8	
	3	5	6	4	7	
p2	4	5	6	6	2	U2
	5	6	4	6	10	
	6	7	5	6	12	
p3	7	6	4	4	3	U3
	8	5	7	4	4	
	9	3	5	4	17	

Figura 9 - Esquema de localização dos poços e UEPs para os testes computacionais ampliados

Foi utilizada a mesma unidade computacional para a realização de todos os testes (Dell Studio XPS 8100, de processador Intel Core i7 de 2,93 GHz e memória RAM de 16Gb). A Tabela 9 apresenta os resultados destes testes.

Tabela 9 - Testes computacionais realizados utilizando o modelo proposto

Testes realizados											
Teste	Poços	Atividades	PLSVs	Roteiros	Variáveis Binárias	Variáveis reais	Restrições	Horizonte	Fobj	Tempo processamento	Tempo (s)
I	2	6	1	2	506	43	871	180	infact	0,11s	0,1
II	2	6	1	3	576	60	1018	180	15866,52	30	30,0
III	2	6	1	4	646	77	1165	180	16059,36	3min06s	186,0
IV	2	6	1	5	716	98	1312	180	16059,36	9min33s	573,0
V	2	6	1	6	786	111	1459	180	16059,36	23min26s	1406,0
VI	2	6	1	7	856	128	1606	180	16059,36	1h20min00s	4800,0
VII	2	6	2	1	506	43	870	180	infact	0,11s	0,1
VIII	2	6	2	2	646	77	1164	180	16319,7	1min42s	102,0
IX	2	6	2	3	786	111	1458	180	16357,83	12min56s	776,0
X	2	6	2	4	926	145	1752	180	16357,83	44min41s	2681,0
XI	2	6	3	1	576	60	1016	180	16341,84	4,47s	4,5
XII	2	6	3	2	786	111	1457	180	16401,84	2min31s	191,0
XIII	2	6	3	3	996	162	1898	180	16401,84	2h9min55s	7795,0
XIV	2	6	3	4	1206	213	2339	180	16401,84	24h13min52s	87232,0
XV	2	6	4	1	646	77	1162	180	16381,98	6,3s	6,3
XVI	2	6	4	2	926	145	1750	180	16427,34	3min10s	190,0
XVII	2	6	4	3	1206	213	2338	180	16427,34	4h31min40s	16300,0
XVIII	2	6	4	4	1486	281	2926	180	16427,34	108h44min14s	391454,0
XIX	2	6	5	1	716	94	1308	180	16417,05	7,4s	7,4
XX	2	6	5	2	1066	179	2043	180	16432,53	1h42min42s	6162,0
XXI	2	6	6	1	786	111	1454	180	16432,53	16,89s	16,9
XXII	3	9	2	3	1149	151	2034	180	out (3,47%)	36h34min15s	131655,0

As colunas da Tabela 9 expressam o seguinte:

- teste: mera ordenação do teste;
- poços: quantidade de poços que foi utilizada naquele determinado teste. Foram realizados testes com 2 e 3 poços;
- atividades: dado que cada poço é assumido de ter 3 atividades, o número desta coluna é a multiplicação do número de poços por 3;
- *PLSVs*: número de embarcações *PLSVs* utilizadas como disponíveis em cada um dos testes realizados;
- roteiros: número de roteiros disponíveis, por *PLSV*, em cada um dos testes realizados;
- variáveis binárias: número de variáveis binárias que o modelo utiliza em cada um dos testes. Ou seja, a quantidade de X_{ij}^{rb} , Y_i^{rb} , μ_p^π , γ_p^π e $a_{i1,i2}$ que o problema precisa naquela configuração;
- variáveis reais: como a formulação apresentada vale-se apenas de variáveis binárias e reais, é o número de todas as variáveis que não são binárias. Portanto, é o somatório dos t_i^{rb} , g_i^{rb} , σ^{rb} , α_i e k_p ;
- restrições: número de restrições em cada um dos testes realizados e reflete a quantidade requerida expressa nos conjuntos de (2) a (32) na formulação matemática apresentada. Pode-se notar que a quantidade de variáveis binárias, reais e restrições influencia a complexidade computacional do mesmo e o número das mesmas cresce conforme o porte do problema. Porém, isto não significa, necessariamente, que o problema seja mais demorado de se resolver dado que a quantidade de restrições pode fazer o problema aproximar-se da envoltório convexa, o que facilita sua resolução;
- horizonte: foi utilizado o mesmo horizonte de tempo para apuração do volume de produção possível em cada teste. Ou seja, no decorrer de 180 dias apurar-se-á qual a produção que é obtida no cenário ótimo;
- função objetivo: valor da função objetivo no cenário ótimo de cada teste, que refere-se ao volume produzido acumulado no horizonte de tempo de análise, com a configuração de interligação desejada e sujeita às restrições. Pode-se notar que, nesta coluna, estão utilizadas as expressões “infact” e “out”. A primeira refere-se a situações em que não foi possível obter nenhuma solução viável, ou seja, o problema foi infactível. Isto se explica porque a quantidade (Km) de dutos a serem carregados superou a capacidade de armazenamento das embarcações. A segunda refere-se à

capacidade de processamento ser excedida, quando a árvore do *branch-and-bound* ficou de tamanho superior à capacidade do computador, o que o levou ao problema “*out-of-memory*” no CPLEX;

- Tempo de processamento: tempo que o computador, através do software CPLEX 12.1, levou para obter a configuração ótima. Esta informação foi obtida através da janela de estatísticas do próprio *software*;

- Tempo(s): tempo de processamento de cada teste nivelado na unidade de segundos.

Pode-se notar que, para testes realizados a partir de 3 poços – ou seja, 9 atividades –, não foi possível a resolução ótima por conta de exceder a capacidade de processamento de um computador padrão – conforme esperado dado que o Problema de Roteamento de Veículos clássico é classificado como *NP-hard* –, o que mostra que será necessário um procedimento heurístico de resolução, dado que o volume de dados que se pretende tratar é da ordem de centenas de poços.

Como resultado, na Tabela 9, obteve-se o esperado no valor da função objetivo, dado que um maior número de roteiros por embarcação ou um incremento do número de *PLSVs* propicia um aumento da disponibilidade de recursos para realizar o carregamento e interligação no momento exato que seus pré-requisitos são atendidos. Ou seja, com um aumento de recursos, as atividades de interligação podem ocorrer cada vez mais *just in time*, propiciando que haja uma antecipação e, conseqüentemente, uma produção de óleo antecipada. As Figuras 10 e 11 apresentam detalhes dos resultados dos testes ampliados para a formulação matemática.

Figura 10 - Tempo de processamento *versus* o número de roteiros por embarcação, por cenário de *PLSVs*

Figura 11 - Tempo de processamento *versus* valor da função objetivo em cenários de igual quantidade total de roteiros

A Figura 10 mostra que os cenários com menor número de *PLSVs* apresentam menor tempo computacional para se atingir o resultado ótimo. Cada curva representa um cenário com determinada quantia de *PLSVs*. O eixo das abscissas apresenta o número de roteiros por embarcação. Ou seja, a curva azul apresenta os cenários nos quais 1 *PLSV* podia ter de 3 a 7 roteiros para se obter a solução ótima. Pode-se notar, graficamente, que ocorre o esperado: quanto maior o número de variáveis e restrições do modelo, maior o tempo de processamento para se obter a melhor solução. Pode-se notar também que, quanto maior o número de *PLSVs* para uma mesma quantidade de roteiros possíveis em cada um, aumenta-se o tempo de processamento também.

Já a Figura 11 apresenta o comportamento para testes que possuem a mesma quantidade total de roteiros. Em todos estes casos, há um total de 6 roteiros (resultado da multiplicação do número de barcos pelo número de roteiros em cada um). Este gráfico esclarece que a formulação traz melhores resultados, tanto em termos de tempo de processamento quando em valor da função objetivo, para os testes que possuem uma quantidade maior de *PLSVs*. Este comportamento faz

bastante sentido pois quanto mais embarcações disponíveis, mais prontamente atendida uma atividade será.

Nos testes abordados na Figura 11, há também o mesmo número de variáveis inteiras e reais e quase o mesmo número de restrições, o que garante um bom comparativo entre os resultados das instâncias. Para explicar este fato, outra informação interessante de ser abordada é a função geral que fornece a quantidade de variáveis binárias, de variáveis reais e de restrições, com base nas dimensões das principais informações de entrada do problema. Isto é, de acordo com a quantidade de atividades que serão trabalhadas(I), horizonte de tempo trabalhado(T), número de embarcações(B) e número de roteiros por barco(R), pode-se estabelecer uma função que nos apresenta o porte do problema a ser trabalhado computacionalmente.

Para as variáveis binárias, compostas pelas variáveis X_{ij}^{rb} , Y_i^{rb} , μ_p^π , γ_p^π e $a_{i1,i2}$, tem-se que a função geral é o apresentado nas equações 1 e 2, de acordo com o somatório das dimensões de cada um dos conjuntos de variáveis.

$$f(T, I, B, R) = (I + 2)^2 RB + IRB + T + T + I \quad \text{Eq. 1}$$

$$f(T, I, B, R) = 2T + I + RB(I^2 + 5I + 4) \quad \text{Eq. 2}$$

A equação 1 é apenas o desenvolvimento algébrico intermediário da equação 2. Pode-se notar que existe um termo dependente da multiplicação RB , ou seja, do número de roteiros por embarcação vezes o número de $PLSVs$ do teste em questão. As equações 3 e 4 apresentam a mesma análise para as variáveis reais, que é o conjunto das variáveis t_i^{rb} , k_p , σ^{rb} , g_i^{rb} e α_i .

$$f(T, I, B, R) = 2(I + 2)RB + \frac{I}{3} + RB + I + 1 \quad \text{Eq. 3}$$

$$f(T, I, B, R) = RB(2I + 5) + \frac{4I}{3} + 1 \quad \text{Eq. 4}$$

Pode-se notar que, analogamente ao que ocorre com as equações 1 e 2, existe um termo dependente de RB . Dado que, nos primeiros testes (aqueles de 6 atividades), tem-se um valor constante de I e T , acaba que a variação do número de variáveis binárias e reais varia de acordo com os valores de R e B , predominantemente. Como os casos expressos na Figura 10 possuem

todos um valor de RB constante e igual a 6, seus números de variáveis são iguais. Porém, conforme já abordado, o comportamento da formulação se apresenta diferenciado.

Já a função geral para o número de restrições apresenta uma leve diferença entre estes casos analisados. As equações 5 e 6 explicam o porquê isto ocorre.

$$f(T, I, B, R) = 9RIB + \frac{19I}{3} + 4RB + 3T + B(R - 1) + (I + 2)^2RB + 3(I + 2)RB \quad \text{Eq. 5}$$

$$f(T, I, B, R) = \frac{19I}{3} + 3T + RB(I^2 + 16I + 15) - B \quad \text{Eq. 6}$$

A equação 6 (e seu desenvolvimento intermediário, equação 5) apresenta o mesmo termo RB abordado nas equações anteriores, porém traz um termo isolado ($-B$), o que explica a queda de uma restrição com o aumento de um $PLSV$ embora haja manutenção do valor do termo RB nestes casos analisados na Figura 11.

Ainda sobre a Figura 11 e as diferenças sobre o tempo computacional despendido, pôde-se extrair através do *CPLEX* dados sobre o *branch-and-bound* realizado para estas instâncias. Estas informações referem-se às iterações realizadas pelo software e sobre a quantidade de nós em aberto (ainda a serem analisados). A partir da análise destas informações será possível a inferência do comportamento que leva a um tempo mais favorável para as instâncias de maior número de $PLSVs$. As Figuras 12 e 13 apresentam, graficamente, os dados obtidos.

Figura 12 - Número de nós restantes *versus* o número da iteração na resolução dos casos de multiplicação RB constante apresentados

Figura 13 - Detalhe do número de nós restantes *versus* o número da iteração para o caso de 6 PLSVs

A Figura 12 apresenta, no eixo ordenado, o número sequencial da iteração realizada no *CPLEX* e, no eixo das abscissas, o número de nós em aberto na árvore de análise do *branch-and-bound*. Assim, constitui-se a linha do tempo daquilo que o algoritmo do software está realizando nestes 4 cenários (1 *PLSV* e 6 roteiros cada; 2 *PLSVs* e 3 roteiros cada; 3 *PLSVs* e 2 roteiros cada; e, 6 *PLSVs* e 1 roteiro cada). Nota-se que, independente do cenário, o comportamento ao longo do tempo é o mesmo: aumenta-se o número de nós em aberto da árvore, com períodos de suaves estabilizações deste número até se chegar a um pico, a partir do qual começa a ser reduzido este valor, até que todos os nós sejam avaliados. Esta configuração de dados também nos permite inferir que o *CPLEX* está realizando maiores cortes de ramos das árvores no cenário de mais *PLSVs*, dado que não permite que o número de nós em aberto cresça muito. Esta é uma evidência de que sempre cortes de grande proporção são realizados, provavelmente, com valores muito bons de função objetivo tendo sido encontrados desde o início da resolução computacional.

A Tabela 10 apresenta os valores de número total de nós analisados e número de iterações realizadas pelo *software*, o que corrobora com o que foi discutido até o momento sobre este tópico.

Tabela 10 - Número total de iterações *versus* número de nós analisados

Cenário	Total de nós analisados	Iterações
1 <i>PLSV</i> ; 6 roteiros	2.161.850	40.012.535
2 <i>PLSV</i> ; 3 roteiros	1.421.432	23.346.143
3 <i>PLSV</i> ; 2 roteiros	277.547	4.431.317
6 <i>PLSV</i> ; 1 roteiro	31.711	519.072

Portanto, dadas as análises sobre os resultados obtidos na formulação matemática, entende-se que os mesmos são de grande relevância e representam fielmente as características do problema em questão. Contudo, em decorrência da obtenção de solução ótima apenas para pequenas instâncias, faz-se necessário aprofundar os estudos para o desenvolvimento de uma heurística, o que será tratado no capítulo 5.

5. Elaboração das heurísticas construtivas

O objetivo deste capítulo é a elaboração de procedimentos heurísticos que sejam capazes de resolver instâncias maiores – os problemas de cunho real são da ordem de centenas de atividades – do problema de interligação de poços de petróleo *offshore* com a utilização de embarcações do tipo *PLSV*. Como verificou-se no capítulo 4, com a formulação matemática do problema foi possível obter soluções ótimas para instâncias pequenas deste problema (6 atividades) com sucesso. As etapas percorridas até o momento – especialmente a revisão de literatura e elaboração do modelo matemático, com os resultados ótimos obtidos – denotam o conhecimento das circunstâncias do problema para a elaboração de uma heurística adequada.

Para tanto, serão elaboradas duas heurísticas construtivas (HC1 e HC2) pautadas nas características principais e limitantes da situação: instante de chegada dos materiais na base, instante de finalização da completação, viabilidade técnica das embarcações, capacidade de carregamento de cada embarcação, distâncias entre plataformas (e seus poços) e não-paralelismo de atividades de um mesmo poço. O intuito dela será prover uma solução de boa qualidade para o problema de alocação das embarcações às atividades de interligação.

A seguir, serão abordadas as duas estratégias heurísticas e seus resultados.

5.1. Heurística Construtiva 1 (HC1)

A ideia geral da primeira heurística é criar uma lista de prontidão (*lista_pro*) a partir da qual exista uma ordem de alocação das atividades aos *PLSVs*, os quais se encontrarão vazios no momento inicial do algoritmo. O conceito genérico da lista de prontidão é inserir as atividades em ordem crescente de sua data de disponibilidade (isto é, tanto de materiais quanto de completação finalizada). Em paralelo a esta relação, é criada uma outra listagem (*ativ_pri*) com os números das atividades às quais se referem os instantes expressos na lista de prontidão. No decorrer das alocações, as rotinas e *loopings* do algoritmo traduzirão as principais características do problema, evitando que as restrições sejam infringidas. O algoritmo alocará os tempos de carregamento, navegação e a duração da atividade em si e também indicará os momentos nos quais deve-se fechar o carregamento e voltar à base para dar prosseguimento a novas atividades.

O pseudocódigo da HC1 encontra-se na Figura 14. Para os dados de entrada (índices e parâmetros), foi utilizada a mesma notação constante no modelo matemático. As demais variáveis são autoexplicativas. Em seguida ao pseudocódigo, serão detalhadas as principais etapas deste algoritmo.

```

1  Dados de entrada:  $d_{ij}(i, j \in N^+)$ ,  $s_i (i \in N)$ ,  $m_i^b(i \in N, b \in B)$ ,  $W_{p^*}^\pi(p^* \in N^{prod}, \pi \in \Pi)$ ,  $DC_i(i \in N)$ ,  $DM_i(i \in N)$ ,  $q_i(i$ 
2   $\in N)$ ,  $Q_b(b \in B)$ ,  $comis$ ,  $Inj_p^\pi(p' \in N^{inj}, \pi \in \Pi)$ ,  $\beta$ 
3  Saída: alocação de atividades aos barcos, atendendo às condições do problema
4  Inicializar os barcos, sem nenhuma pré-alocação
5  Criar lista de prontidão (lista_pro) onde constarão os instantes de liberação, considerando os desempates
6  Ordenar as atividades dentro da lista de prioridades (ativ_pri) em ordem crescente de prontidão,
7  fazendo relação/paralelo com a lista de prontidão (lista_pro)
8   $t = 0$ 
9  Enquanto  $t < T$  faça
10     Enquanto  $lista\_pro[0] \leq t$  e há barco com espaço disponível faça
11          $b = 0$ 
12          $cont\_n\_viab = -1$ 
13         Enquanto  $b < B$  faça
14             Se  $(m[b][ativ\_pri[0]] > 0$  e barco  $b$  estiver vago no intervalo  $t$  e a disponibilidade
15             do material for até o momento de início do carregamento) então
16                 Se há espaço para armazenagem da linha no barco  $b$  então
17                     Atribuir linha da atividade da primeira posição ao barco  $b$ 
18                     Aloque, na programação do barco  $b$ , os dias necessários para
19                     realização da operação (car + nav + ativ)
20                     Marcar atividade como alocada
21                     Reorganizar atividades do mesmo poço
22                      $b = B - 1$ 
23             Senão
24                 /*Analisar a factibilidade em termos de espaço na embarcação
25                 das atividades ainda não alocadas*/
26                 Enquanto não forem esgotadas as atividades não-alocadas e não ser
27                 encontrada uma atividade factível (viabilidade técnica, espaço na
28                 embarcação e material disponível no início do carregamento) para
29                 aquele barco faça
30                     Se houver alguma atividade passível de ser alocada no
31                     barco  $b$  naquele intervalo  $t$  então
32                         Inserir a atividade nas primeiras posições das listas
33                     Fim Se
34                 Fim enquanto
35                 Se não houver atividade a ser alocada então
36                     Fecha carregamento do barco  $b$ 
37                     Enviar barco de volta à base e computa a navegação do
38                     mesmo
39                 Fim Se
40             Fim Se
41         Senão

```

```

42      Se não tiver sido alocada a ativ_pri[0] por conta de disponibilidade de
43      material no momento de início do carregamento então
44          Enquanto não forem varridas todas atividades ainda não alocadas ou
45          encontrada alguma com disponibilidade de carregamento para aquele barco
46          naquele instante t faça
47              Se for encontrada atividade que atende restrição de
48              viabilidade técnica, disponibilidade na base para
49              carregamento e capacidade do barco então
50                  Trazer tal atividade para o topo da lista
51              Fim Se
52          Fim Enquanto
53      Se não foi encontrada atividade alocável então
54          Fecha carregamento do barco b
55          Enviar barco de volta à base e computa a navegação do
56          mesmo
57      Fim Se
58      Fim Se
59      Se determinado barco não for viável tecnicamente ou não estiver vago ou a
60      atividade não estava com prontidão no início deste roteiro do barco então
61          cont_n_viab = cont_n_viab + 1;
62      Fim Se
63      Fim Se
64      b = b + 1
65      Se cont_n_viab = B - 1 então
66          Adiciona 1 unidade de tempo na primeira atividade da lista de
67          priorização
68          Reordena atividades da lista de prioridades
69      Fim Se
70      Fim Enquanto
71      Fim Enquanto
72      t = t + 1
73      Fim Enquanto

```

Figura 14 - Pseudocódigo da heurística construtiva 1

Neste algoritmo, todos os barcos iniciam-se vagos, sem nenhuma pré-alocação (linha 4). A seguir, é criada uma lista de prontidão das atividades de interligação com base na ordem crescente do máximo entre a data de disponibilidade dos materiais na base e a data fim da completção menos

o tempo de navegação até a locação do poço (a este cálculo, chama-se de prontidão da atividade). Importante salientar que a lista de prontidão é uma lista na qual constam os tempos (instantes) mínimos para início do carregamento da atividade. Em paralelo, há uma lista que traz o número das atividades, que será chamada de lista de prioridades. A atividade que consta em determinada posição nesta lista possui seu tempo na mesma posição na lista de prontidão. Nos movimentos que ocorrerem no decorrer do algoritmo, elas continuam mantendo esta relação entre posições nas listas para uma atividade e seu respectivo tempo. São critérios de desempate, na ordem, para a classificação da atividade nas listas de prontidão e de prioridade: se o poço é produtor e seu potencial de produção; número de linhas interligadas no mesmo poço desta atividade; se injetor, número de linhas já interligadas ao produtor em que está atrelado; e menor comprimento de linha (isto é apresentado resumidamente nas linhas 5 a 7 do algoritmo). Transformando isto em uma fórmula, o critério de desempate é uma ponderação por atividade do seguinte modo:

$$Desempate[i] = 100000.tipo.potencial + 10000.(interl_demais_linhas_poço) + 1000.(linhas_poço_prod_atrelado) + 100 - q[i]$$

Onde:

- *tipo*: parâmetro binário, que vale 1 se é uma atividade de poço produtor e 0, se é uma atividade de um poço injetor;
- *potencial*: potencial do poço produtor/injetor;
- *interl_demais_linhas_poço*: interligação das demais linhas do poço em questão; como cada poço tem 3 linhas, aqui é apurado se as outras duas linhas do poço já foram interligadas, resultando em um valor 0 ou 1 ou 2;
- *linhas_poço_prod_atrelado*: em caso de estarmos tratando de um poço injetor, esta parcela releva o fato de que o poço produtor ao qual ele está associado já teve suas linhas interligadas, seja parcialmente ou integralmente;
- $100 - q[i]$: quanto menor o comprimento da linha da atividade em questão, maior será sua ponderação; isto faz com que poços que tenham menor comprimento de linha tenham prioridade para interligação, no caso em que todos os outros quesitos tenham empatado.

Se ainda assim houver empate entre atividades, é escolhida a de menor índice como mais prioritária.

O *looping* principal do algoritmo (linhas 9 a 73) tem como base o tempo, que inicia no 0. Neste determinado instante t , verifica-se se há algum barco disponível (vago) e também alguma atividade que tenha prontidão neste instante; se sim, verificar, na ordem sequencial dos barcos, se o barco em questão possui viabilidade técnica e o material está disponível no início do carregamento de determinado roteiro daquele barco (expresso nas linhas 8 a 15 do algoritmo).

Caso estejam satisfeitas as condições do parágrafo anterior, verifica-se se o barco possui capacidade de estocagem livre para receber a linha em questão (linha 16); se sim, alocar a atividade ao barco (carregamento, navegação e tempo de atividade), realocando na lista de prioridades as atividades do mesmo poço para o instante imediatamente seguinte ao fim da atividade recém-alocada, e atribuindo-se um tempo M (número grande) para esta que fora alocada (linhas 17 a 22 do algoritmo); se não, verificar se este barco pode ter seu carregamento fechado (através da verificação de que não há outra atividade que pode ainda ser realizada neste barco, o que ocorre a partir da linha 23). No caso de o barco não poder ter seu carregamento fechado, localizar a atividade que pode ser realizada neste barco ainda neste determinado instante e trazê-la para o topo da lista de prioridades (linhas 26 a 34).

Se o barco puder ter seu carregamento fechado por não comportar a estocagem de mais uma linha disponível para iniciar a operação de lançamento no instante t , fechar o carregamento e já planejar também a volta do barco à base (linhas 35 a 39). Caso a questão que restringe a alocação não seja o espaço na embarcação mas sim a disponibilidade para carregamento na base no início daquele determinado carregamento, percorrer a lista de atividades procurando alguma que tenha tal disponibilidade e possa ter seu lançamento iniciado no instante t sendo que, caso ela seja encontrada, deve ser colocada no topo da lista (linhas 42 a 52); caso não tenha sido encontrada atividade neste t que atenda tais condições, fecha-se o carregamento (linhas 53 a 57).

Nas linhas 59 a 62, há uma condicional que adiciona uma unidade em um contador caso naquele instante t o barco tenha possuído uma limitação de capacidade técnica ou não estiver vago ou a atividade a ser alocada não tinha disponibilidade no início do carregamento em questão. Ou seja, para um determinado instante t , percorre-se toda a frota de barcos (linha 65) e a mesma está com todos os barcos indisponíveis por algum motivo. Este indicador vai ser importante pois quando ele se iguala ao número de barcos da frota, deve-se incrementar o contador de tempo do algoritmo, o que ocorre nas linhas 65 a 69. As linhas 70 a 73 acabam por finalizar os *loopings*. O algoritmo

termina quando todas as datas de prontidão das tarefas forem maiores (possuírem valor de M grande) que o limite máximo (T), o que sempre acabará por infringir as condições de entrada no *looping* nas linhas 9 e 10.

5.2. Comparação da HCl com os resultados ótimos

O primeiro teste a ser realizado com a então proposta de heurística construtiva é compará-la com os resultados obtidos através da programação do modelo MILP (seção 4.2) no CPLEX. Este é um bom parâmetro para verificar qual é o *gap* médio que está se obtendo com relação à melhor solução possível. Para esta etapa, foram utilizados 30 problemas de pequeno porte. Estes 30 problemas foram obtidos em 6 conjuntos, todos eles utilizando-se 5 instâncias, que variam em quantidade de *PLSVs* e roteiros: 1 *PLSV* e 6 roteiros; 2 *PLSVs* e 3 roteiros; 3 *PLSVs* e 2 roteiros; 4 *PLSVs* e 2 roteiros; 3 *PLSVs* e 2 roteiros. Os demais dados são iguais àqueles utilizados na seção que trata dos testes da formulação matemática (seção 4.1).

O primeiro conjunto (I) é idêntico a alguns dos testes já realizados e apresentados na Tabela 3. Os 5 outros conjuntos foram obtidos com as seguintes variações:

- II) inversão das distâncias das plataformas à base (o que era a distância de uma plataforma até a base no caso original agora é a distância da outra plataforma até a base e vice-versa);
- III) colocando-se um comprimento das linhas igual a 4 Km, de modo que caibam até 3 linhas em cada roteiro;
- IV) alterando-se o comprimento das linhas para 8 Km, de modo que caiba apenas 1 linha por roteiro;
- V) modificando os tempos de interligação para maiores – de (3,4,5,5,6,7) para (10,12,15,7,9,10);
- VI) e com a completação do poço injetor sendo finalizada antes daquela do poço produtor.

Assim, chega-se a uma gama de problemas com diferentes características que formam um conjunto teste que possibilita testar o comportamento da heurística de um modo mais abrangente. Os resultados podem ser verificados na Tabela 11.

Tabela 11 - Comparativo dos resultados ótimos e da HC1

Ótimo										Heurística Construtiva			Gap
Conjunto	Poços	Atividades	PLSVs	Roteiros	Fobj	Tempo processamento	Tempo (s)	K1	K2	Fobj	K1	K2	
I	2	6	1	6	16.059,4	23min26s	1406	31,5	68	14.923,7	59	65	7,07%
	2	6	2	3	16.357,8	12min56s	776	24	46	16.192,5	32	40	1,01%
	2	6	3	2	16.401,8	2min31s	191	24	37	16.288,3	29	37	0,69%
	2	6	4	2	16.427,3	3min10s	190	24	31,5	16.288,3	29	37	0,85%
	2	6	5	2	16.432,5	1h42min42s	6162	24	31	16.288,3	29	37	0,88%
II	2	6	1	6	15.963,0	1h21min11s	4871	35	69	14.636,3	64	60	8,31%
	2	6	2	3	16.291,9	9min01s	541	27	46	16.149,7	34	37	0,87%
	2	6	3	2	16.369,7	2min35s	155	26	35	16.155,1	34	36	1,31%
	2	6	4	2	16.396,4	6min34s	214	25	34	16.155,1	34	36	1,47%
	2	6	5	2	16.417,3	29min39s	1779	25	30	16.155,1	34	36	1,60%
III	2	6	1	6	16.155,3	1h47min50s	6470	30	59	15.397,6	50	63	4,69%
	2	6	2	3	16.387,3	1h28min32s	5312	23	44	16.133,9	34	40	1,55%
	2	6	3	2	16.426,6	6min47s	407	23	36	16.318,2	28	36	0,66%
	2	6	4	2	16.452,1	6h07min11s	22031	23	31	16.318,2	28	36	0,81%
	2	6	5	2	16.452,1	7h58min57s	28737	23	31	16.318,2	28	36	0,81%
IV	2	6	1	6	15.712,7	3s	3	40	87	13.994,0	72	87	10,94%
	2	6	2	3	16.268,0	1s	1	27	51	15.876,4	40	51	2,41%
	2	6	3	2	16.356,2	0,82s	0,82	25	42	16.045,2	36	45	1,90%
	2	6	4	2	16.381,1	1s85	1,85	25	37	16.045,2	36	45	2,05%
	2	6	5	2	16.401,6	1s98	1,98	25	33	16.045,2	36	45	2,17%
V	2	6	1	6	14.866,9	17min12s	1032	57	101	12.606,0	89	98	15,21%
	2	6	2	3	15.489,6	3min38s	218	48	63	15.076,1	57	49	2,67%
	2	6	3	2	15.567,4	1min31s	91	48	46,5	15.134,8	56	48	2,78%
	2	6	4	2	15.567,4	1min48s	108	47,5	45	15.134,8	56	48	2,78%
	2	6	5	2	15.567,4	1h05min25s	3925	47,5	39	15.134,8	56	48	2,78%
VI	2	6	1	6	15.712,1	13min49s	829	41	77,5	14.219,2	70	57	9,50%
	2	6	2	3	16.061,9	13min18s	798	35	48	15.649,8	45	37	2,57%
	2	6	3	2	16.129,8	1min	60	35	35	15.804,3	43	37	2,02%
	2	6	4	2	16.129,8	6s57	6,57	35	31,5	15.804,3	43	37	2,02%
	2	6	5	2	16.129,8	24s	24	35	33	15.804,3	43	37	2,02%
K1 - instante de entrada em operação do poço 1 (produtor)/K2 - instante de entrada em operação do poço 2 (injetor)										Gap médio			3,21%

A Tabela 11 apresenta, em seu lado esquerdo, os resultados tendo por base o modelo matemático proposto no Capítulo 4. Cada conjunto de 5 linhas nesta Tabela referem-se a um dos subgrupos citados no início deste capítulo. Em seu lado direito, constam os resultados obtidos na heurística construtiva. Pode-se notar que os *gaps* com relação aos resultados ótimos variaram entre 0,66% e 15,21%. Os maiores *gaps* foram observados nas instâncias com apenas 1 *PLSV*, o que guarda coerência com o esperado pois mostra que, numa situação de grande restrição, a solução heurística se afasta do resultado ótimo devido à pequena quantidade de embarcações disponíveis em cada *t*. Sendo assim, quanto mais restrita a quantidade de barcos, mais importante o critério de escolha que a heurística apresenta.

Nas instâncias que possuem 2 *PLSVs* ou mais, o maior *gap* foi de 2,67%, no cenário em que se aumentou os tempos de interligação, no conjunto V. Pode-se observar também que, a heurística construtiva apresenta um patamar de resultado constante ou muito similar nas instâncias de 3 a 5 *PLSVs* para todos os conjuntos analisados. Ou seja, pode-se constatar que a inclusão de *PLSVs* não alterou o funcionamento da heurística e seu resultado nestes conjuntos a partir deste ponto. Para os casos de resolução ótima, esta mesma formação de patamar foi observada nos conjuntos V (estabilização do resultado ótimo em 15.567,42) e VI (estabilização do resultado ótimo em 16.129,80) e em menor escala nos demais conjuntos. Portanto, há uma convergência de comportamento de ambas as resoluções.

A média de *gaps* com relação ao cenário ótimo nestas pequenas instâncias foi de 3,21%, o que representa um resultado bastante interessante para uma heurística construtiva.

Os resultados da heurística podem sofrer significativas variações de acordo com os dados de entrada e sua dispersão. Ou seja, o comportamento de estabilização do resultado a partir da inclusão de um determinado número de *PLSVs* pode ser algo atrelado também à configuração dos dados. Para ampliar o entendimento sobre a heurística, portanto, é necessário verificar como ela se comporta com dados reais, o que será visto no item 5.3.

5.3. Casos-piloto de aplicação da HCl

Nesta etapa, para testar a eficácia dos resultados desta heurística construtiva, foram realizados testes com instâncias reduzidas do problema, utilizando-se dados reais. Esta etapa será importante para verificar se o comportamento apresentado está de acordo com esperado e se o mesmo apresenta peculiaridades não mapeadas até então.

Os dados reais foram coletados considerando o planejamento de um ano inteiro (janeiro a dezembro) e versam sobre:

- o potencial de produção (se poço produtor);
- declínio de produção do poço (se poço produtor);
- taxa de injeção (se poço injetor);
- informações de viabilidade técnica de cada PLSV para cada atividade;
- data fim de completação de cada poço;
- data da chegada de materiais de cada atividade;
- comprimento de cada linha;
- duração prevista da atividade de interligação;
- tempo de navegação entre unidades de produção (para poços que são interligados a uma mesma plataforma de produção, foi considerado tempo de traslado nulo);
- informações de qual(is) injetor(es) atende qual produtor;

Foram tomados os devidos cuidados para se manter o sigilo dos dados reais, de modo a não caracterizar os poços ou plataformas específicas sobre as quais se está falando, bem como para informações específicas técnicas de *PLSVs* e demais. A produção, por exemplo, foi alterada pela aplicação de fator multiplicativo, o que não prejudica as características do problema.

Para melhor avaliar, foram divididas as instâncias em 9 cenários, de acordo com dois critérios: o número de *PLSVs* a serem utilizados e a flexibilidade dos mesmos. A flexibilidade foi definida através do número de atividades que determinado *PLSV* atende dentro do *portfolio* de tarefas. Aqueles que atendiam a poucas tarefas dentro do *portfolio* como um todo foram caracterizados como de baixa flexibilidade. Do contrário, aqueles que atendiam a elevado número de tarefas dentro do *portfolio*, foram considerados como de alta flexibilidade. Os intermediários, foram incluídos no grupo de média flexibilidade. Tomou-se o cuidado de que, nos casos mais restritivos, houvesse ao menos um *PLSV* que atendesse a cada atividade.

Trabalhando-se com 3 níveis em cada critério (utilização de 4, 5 ou 6 *PLSVs* e categorias de alta, média e baixa flexibilidade) e efetuando o cruzamento entre critérios, chegou-se aos 9 cenários. Para verificar uma representatividade estatística, foram consideradas 30 instâncias de dados, cada uma composta pelas atividades a serem interligadas em duas plataformas distintas. Cada uma destas instâncias possui entre 33 e 45 atividades para interligação. Dado que há 30 instâncias e cada uma possui 9 cenários, foram realizados 270 testes no total.

Importante salientar que cada caso utilizado possui características próprias, isto é, pode possuir datas de completção e chegada de materiais mais próximas ou mais espaçadas; pode contar com *PLSVs* mais ou menos flexíveis. Pode ocorrer de *PLSVs* de média flexibilidade para alguma atividade em específico serem mais restritivos do que *PLSVs* de baixa flexibilidade, dado que se olhou a flexibilidade do ponto de vista do *portfolio* de atividades e não para cada atividade isoladamente. Não seria possível considerar a flexibilidade de *PLSV* por atividade pois, assim, haveria *PLSVs* caracterizados de modo diferente a serem destinados para um mesmo conjunto de atividades que formam uma instância. Ou seja, para uma atividade, um *PLSV* poderia ser de baixa flexibilidade enquanto, para outra, este mesmo *PLSV* poderia ser de média flexibilidade. Sendo assim, o critério de classificá-lo do ponto de vista do *portfolio* parece adequado. Os resultados dos testes são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Resultados de potencial de produção nos testes da HC1 com dados reais

Cenários									
Instâncias	Baixa flexibilidade			Média flexibilidade			Alta flexibilidade		
	4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos
I	37.882,18	38.386,76	38.958,38	37.228,64	39.634,72	38.600,60	36.940,59	38.374,17	39.049,66
II	49.080,35	55.359,41	54.862,02	51.990,57	53.305,19	54.553,68	50.808,68	53.839,94	55.093,68
III	39.433,73	41.355,90	42.120,89	40.008,41	41.026,81	42.048,41	39.780,18	42.176,79	42.267,29
IV	34.162,75	34.103,35	34.613,71	34.460,69	34.858,90	35.303,66	35.219,97	35.101,07	34.854,66
V	43.589,02	46.144,69	46.819,02	46.219,21	46.993,70	47.443,86	44.422,02	46.294,01	46.804,21
VI	36.759,68	39.229,01	39.929,21	37.944,66	38.783,61	39.796,11	35.972,16	38.735,65	39.890,54
VII	38.261,07	39.765,82	40.117,31	38.831,79	38.750,91	39.766,17	39.109,09	38.868,05	39.954,68
VIII	38.492,43	38.654,64	38.748,99	38.271,89	38.720,64	38.720,64	38.450,77	38.842,35	38.919,23
IX	52.118,06	54.913,93	54.820,17	52.374,96	52.477,46	52.424,75	54.763,82	55.455,09	55.788,24
X	40.405,35	41.058,88	41.092,49	40.966,71	41.287,93	41.220,84	41.308,22	41.287,93	41.425,79
XI	33.778,03	33.778,05	34.080,17	34.106,11	34.169,31	34.064,33	34.201,37	34.264,54	34.305,34
XII	45.664,36	45.995,04	45.675,67	46.123,85	46.342,40	46.374,18	46.439,89	46.536,19	46.536,19
XIII	36.867,44	39.255,86	39.276,04	39.291,53	39.205,63	39.153,47	39.409,57	39.479,80	39.465,49
XIV	38.907,38	39.444,09	39.246,24	37.629,48	39.233,80	38.977,35	38.967,94	39.366,39	39.486,63
XV	47.315,01	47.793,45	48.668,79	45.942,96	48.476,38	48.421,27	47.453,96	47.529,90	47.648,41
XVI	60.147,05	63.770,60	63.979,31	60.893,29	62.192,96	62.123,57	62.157,80	63.445,14	64.400,98
XVII	49.653,90	50.661,36	51.152,08	49.233,64	50.922,16	50.795,22	49.377,15	51.167,00	51.169,79
XVIII	42.768,13	43.555,21	44.045,93	42.827,78	44.145,16	44.292,25	42.467,30	43.952,54	44.084,02
XIX	56.028,97	54.891,27	56.209,88	54.469,35	55.768,80	56.229,40	54.359,27	55.443,08	56.035,52
XX	55.321,05	55.390,50	55.722,49	54.898,90	55.642,92	56.044,43	54.903,81	55.752,48	55.983,93
XXI	57.036,54	58.134,54	58.097,25	57.278,94	58.432,14	58.424,18	58.226,27	58.661,18	58.573,63
XXII	50.603,87	50.963,93	51.188,05	50.889,61	51.367,98	51.379,34	51.203,87	51.473,82	51.569,34
XXIII	62.929,55	62.975,45	63.162,70	63.104,06	63.498,06	62.587,40	63.111,83	63.585,94	63.618,99
XXIV	55.275,01	56.338,75	56.251,19	55.666,93	56.469,06	56.594,23	55.453,11	56.498,95	56.708,09
XXV	54.697,71	56.325,99	56.229,14	55.239,19	56.425,10	56.651,35	55.796,35	56.417,55	56.733,29
XXVI	53.756,51	55.353,72	57.599,06	54.513,49	59.524,61	60.679,23	60.305,49	61.012,42	61.155,61
XXVII	69.725,75	71.839,25	72.747,09	68.897,43	75.085,13	75.764,54	75.348,67	76.528,69	77.463,62
XXVIII	58.416,36	60.607,91	58.813,29	57.589,00	61.666,18	62.972,59	62.767,54	63.093,85	63.289,55
XXIX	51.743,22	51.017,05	52.944,27	53.863,52	54.935,88	56.378,61	56.192,07	56.414,82	56.458,11
XXX	62.914,03	62.784,11	63.840,93	60.558,80	66.861,32	68.505,30	67.657,56	68.166,88	68.617,99
Média	48.457,82	49.661,62	50.033,73	48.710,51	50.206,83	50.543,03	49.752,54	50.592,21	50.911,75

Todos os procedimentos referentes a heurísticas foram programados e rodados em um computador HP Pavilion, de processador Intel Celeron, 2.13 GHz, 4 Gb de memória RAM. O tempo de processamento de cada instância, quando rodada separadamente, foi da ordem de 0,1s, o que pode ser devido a imprecisão na medição, por ser um valor muito baixo.

Ao analisar os dados da Tabela 12, percebe-se que, na grande maioria dos casos, os resultados comportam-se de acordo com o esperado. Ou seja, quando se compara apenas testes de 4 *PLSVs*, dentro de uma mesma instância, o resultado obtido para embarcações de baixa flexibilidade é menor que o resultado para barcos de média flexibilidade que, por sua vez, possuem valor menor de função objetivo que os cenários de *PLSVs* de alta flexibilidade. Analogamente, para testes considerando apenas 5 *PLSVs* ou 6 *PLSVs* dentro de uma mesma instância. Já quando se compara, dentro de uma mesma instância, resultados obtidos dentro de barcos de um mesmo tipo de flexibilidade, tem-se resultados melhores com 6 *PLSVs* do que com 5 *PLSVs* que, por sua vez, são melhores que os resultados com 4 *PLSVs*.

Todavia, existem alguns casos em que pode-se notar que, dentro de uma mesma instância, em seus 9 cenários, nem sempre os resultados melhoram com o aumento do número de *PLSVs* ou com a melhora de sua flexibilidade. Isto deve-se ao fato que esta heurística construtiva é míope, isto é, ela não enxerga a consequência da alocação de atividades no futuro para que isto interfira nas alocações presentes. Sendo assim, qualquer alteração, sob a óptica e lógica da heurística, interfere nas disponibilidades imediatas de embarcações para se realizar a alocação. *A priori*, a interligação de poços injetores frente a poços produtores garantem um acréscimo menor à curva de produção de óleo, dado que poços injetores não produzem por si só, mas sim incrementam a produção de poços produtores já em operação.

O que se verifica nas instâncias resolvidas é que, ao realizar o somatório de todos os instantes de conclusão de todas as atividades em testes de uma mesma instância, verifica-se uma redução conforme o incremento de *PLSVs* ou aumento de sua flexibilidade, o que é um bom indicador de que as atividades estão sendo antecipadas. Contudo, pela miopia da heurística, acabam sendo antecipadas, quando comparado às instâncias mais restritivas, as atividades de injeção e o critério de desempate acaba não sendo suficiente para corrigir este desvio, afinal, ele apenas é um desempate entre as tarefas que tem prontidão para aquele instante no qual está sendo analisada a alocação.

De todo modo, ao analisar-se o resultado global, nota-se que o comportamento da heurística está dentro do esperado, de acordo com dois critérios de análise. O primeiro, pela média de produção das 30 instâncias de cada cenário (como apresenta a Tabela 12); e o segundo, através de normalização, na qual, para cada instância, define-se o melhor resultado de um cenário como 100. Para os demais resultados, sempre iguais ou inferiores, calcula-se a proporção em uma escala de 0 a 100 e tira-se a média das 30 instâncias. O resultado, de acordo com este segundo critério de análise, encontra-se na Tabela 13.

Tabela 13 - Resultados normalizados dos testes da HC1 com dados reais

Cenários									
	Baixa flexibilidade			Média flexibilidade			Alta flexibilidade		
	4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos
I	95,6	96,9	98,3	93,9	100,0	97,4	93,2	96,8	98,5
II	88,7	100,0	99,1	93,9	96,3	98,5	91,8	97,3	99,5
III	93,3	97,8	99,7	94,7	97,1	99,5	94,1	99,8	100,0
IV	96,8	96,6	98,0	97,6	98,7	100,0	99,8	99,4	98,7
V	91,9	97,3	98,7	97,4	99,1	100,0	93,6	97,6	98,7
VI	92,1	98,2	100,0	95,0	97,1	99,7	90,1	97,0	99,9
VII	95,4	99,1	100,0	96,8	96,6	99,1	97,5	96,9	99,6
VIII	98,9	99,3	99,6	98,3	99,5	99,5	98,8	99,8	100,0
IX	93,4	98,4	98,3	93,9	94,1	94,0	98,2	99,4	100,0
X	97,5	99,1	99,2	98,9	99,7	99,5	99,7	99,7	100,0
XI	98,5	98,5	99,3	99,4	99,6	99,3	99,7	99,9	100,0
XII	98,1	98,8	98,2	99,1	99,6	99,7	99,8	100,0	100,0
XIII	93,4	99,4	99,5	99,5	99,3	99,2	99,8	100,0	100,0
XIV	98,5	99,9	99,4	95,3	99,4	98,7	98,7	99,7	100,0
XV	97,2	98,2	100,0	94,4	99,6	99,5	97,5	97,7	97,9
XVI	93,4	99,0	99,3	94,6	96,6	96,5	96,5	98,5	100,0
XVII	97,0	99,0	100,0	96,2	99,5	99,3	96,5	100,0	100,0
XVIII	96,6	98,3	99,4	96,7	99,7	100,0	95,9	99,2	99,5
XIX	99,6	97,6	100,0	96,9	99,2	100,0	96,7	98,6	99,7
XX	98,7	98,8	99,4	98,0	99,3	100,0	98,0	99,5	99,9
XXI	97,2	99,1	99,0	97,6	99,6	99,6	99,3	100,0	99,9
XXII	98,1	98,8	99,3	98,7	99,6	99,6	99,3	99,8	100,0
XXIII	98,9	99,0	99,3	99,2	99,8	98,4	99,2	99,9	100,0
XXIV	97,5	99,3	99,2	98,2	99,6	99,8	97,8	99,6	100,0
XXV	96,4	99,3	99,1	97,4	99,5	99,9	98,3	99,4	100,0
XXVI	87,9	90,5	94,2	89,1	97,3	99,2	98,6	99,8	100,0
XXVII	90,0	92,7	93,9	88,9	96,9	97,8	97,3	98,8	100,0
XXVIII	92,3	95,8	92,9	91,0	97,4	99,5	99,2	99,7	100,0
XXIX	91,6	90,4	93,8	95,4	97,3	99,9	99,5	99,9	100,0
XXX	91,7	91,5	93,0	88,3	97,4	99,8	98,6	99,3	100,0
Média	95,2	97,6	98,3	95,8	98,5	99,1	97,4	99,1	99,7

A partir da Tabela 13, pode-se ver mais claramente – sem a interferência dos diferentes volumes de potencial de produção ou número de atividades em questão – que o resultado obtido pela heurística é bastante satisfatório em termos de coerência com a flexibilidade e número de embarcações utilizadas.

Para melhor verificar o fenômeno que ocorre em algumas instâncias de, em cenários com maior flexibilidade ocorrer um resultado inferior ao de um cenário de menor flexibilidade, será detalhado um pouco o comportamento dos cenários de 4 *PLSVs* da instância I.

A Tabela 14 apresenta informações sobre os poços considerados bem como as datas finais de interligação de cada atividade e de cada poço.

Tabela 14 - Detalhe dos resultados dos cenários de 4 *PLSVs* da instância I dos testes da HC1 com dados reais

	Baixa Flexibilidade		Média Flexibilidade		Alta Flexibilidade		
Atividade	tempo (dias)						Tipo
	Fim Ativ	Fim poço	Fim Ativ	Fim poço	Fim Ativ	Fim poço	
0	27	103	49	104	62	108	Prod
1	48		22		21		
2	100		101		105		
3	44	63	66	69	37	62	Prod
4	19		18		15		
5	60		37		59		
6	94	97	90	93	40	94	Prod
7	35		18		18		
8	70		72		91		
9	130	133	130	133	130	133	Inj
10	-		-		-		
11	98		93		76		
12	-	74	-	49	-	87	Inj
13	71		29		36		
14	32		46		84		
15	160	163	100	103	57	95	Inj
16	-		-		-		
17	122		70		92		
18	77	80	79	82	42	45	Inj
19	-		-		-		
20	-		-		-		
21	100	103	44	47	61	64	Inj
22	-		-		-		
23	-		-		-		
24	32	35	79	82	70	73	Prod
25	-		-		-		
26	17		22		19		
27	24	40	11	34	24	49	Prod
28	14		19		16		
29	37		31		46		
30	24	27	27	30	42	45	Inj
31	-		-		-		
32	-		-		-		
33	118	121	113	116	113	116	Inj
34	-		-		-		
35	106		24		24		

Uma primeira informação que pode-se extrair da tabela é que, de modo geral, alguns poços produtores estão sendo postergados em instâncias mais flexíveis enquanto poços injetores estão sendo antecipados. Como se mensura a eficiência da alocação através da medida de potencial de produção de óleo, tem-se que poços produtores são mais valorados. Porém, ocorre que devido à limitação de viabilidade técnica das embarcações ocorrem diferenças que, à primeira vista, podem parecer incoerentes. Esta diferente alocação é explicada pela diferença

entre os *PLSVs*. O conceito de flexibilidade dos *PLSVs* advém do conceito de flexibilidade para com o *portfolio* e não levando em consideração apenas o conjunto de atividades de cada um dos testes. Isto fará sentido com o problema como um todo.

Portanto, foram utilizados 9 conjuntos de *PLSVs* para que os mesmos cenários, em diferentes instâncias, fossem passíveis de comparação. Por exemplo, todas instâncias de alta flexibilidade e utilização de 6 *PLSVs* contaram com os mesmos 6 barcos servindo como base para os testes. Assim, há o bônus de trabalhar na mesma base mas pode-se ter o ônus de, em algumas instâncias, pontualmente, termos *PLSVs* mais flexíveis em instâncias de baixa flexibilidade do que na de média.

Como citado anteriormente, ao somarmos os instantes de finalização de todas as atividades de um teste, pode-se verificar que, quanto mais flexível a instância, menor este somatório. Isto é um indicativo de que o algoritmo da heurística está considerando uma antecipação de atividades. Contudo, ainda podem ser obtidas melhorias no que se refere à visão de futuro da heurística. Ou seja, ao optar-se pela alocação de uma atividade, a heurística não consegue, naquele momento, prever os impactos que isto traz nas atividades ainda por alocar. Neste caso da Tabela 14, observa-se que, ao somarmos os instantes de finalização das atividades de baixa flexibilidade, tem-se um total de 1659 dias; na média flexibilidade, tem-se 1390 dias; já na alta flexibilidade, tem-se o total de 1380 dias. Contudo, essa redução não é verificada diretamente nos poços produtores, como seria o desejado.

Vale salientar que algumas atividades não possuem instante de término descrito na Tabela 14 pois são atividades *dummy*: quando algum poço precisava sofrer manutenção para voltar a operar ou quando alguma linha do poço já havia sido anteriormente interligada, inseriu-se uma linha fictícia que possui duração nula e comprimento nulo. Assim, ela pode ser considerada interligada a qualquer momento pelo algoritmo e isto não afeta os resultados.

Mais detalhes sobre esta instância podem ser vistos na Figura 15.

Figura 15 - Recorte do gráfico de Gantt com o detalhe dos cenários de 4 *PLSVs* da instância I do teste da HC1 com dados reais

Neste gráfico de Gantt da Figura 15, pode-se ver mais claramente que é dada preferência a atividades de poços injetores do que de produtores nos cenários de barcos de maior flexibilidade. Pode-se ver, através da escala de cores a ordem de alocação neste recorte do início do período bem como a quais poços do teste e atividade elas se referem. Os números das atividades encontram-se em parênteses.

Vale ressaltar que o exemplo dado na Figura 15 é aquele apresentado pelas exceções dado que, olhando o comportamento dos testes como um todo e, especialmente, dos resultados nas Tabelas 12 e 13, pode-se afirmar que o comportamento está dentro do esperado. Isto significa que, na visão consolidada, resultados com maior número de *PLSVs* são superiores àqueles com menor número destas embarcações. De mesmo modo, no conjunto de testes, *PLSVs* de maior flexibilidade apresentam melhores resultados do que aqueles cenários com *PLSV* de menor flexibilidade.

Quanto maior o número de dados com os quais se trabalha, espera-se um melhor resultado em termos de aproveitamento de ociosidade nas embarcações pois haverá um problema combinatório maior e mais opções de antecipação de atividades produtoras e injetoras. Quando há poucas atividades, corre-se o risco de, no decorrer do ano, haver concentração de atividades a serem interligadas em determinados períodos. Em um *portfolio* de atividades maior isso tende a ser minimizado, com mais tarefas a serem realizadas em todos os períodos. Ou seja, o funcionamento da heurística depende também da dispersão das tarefas no decorrer do tempo.

Como tentativa de sanar algumas distorções e melhorar o resultado do procedimento heurístico, será elaborada uma segunda versão de heurística construtiva, a HC2, como será apresentado na sequência.

5.4. Heurística Construtiva 2 (HC2)

Buscando a obtenção de melhores resultados, foi elaborada uma segunda heurística construtiva, a HC2, tendo por base o próprio algoritmo da HC1. A Figura 16 apresenta o algoritmo desta nova heurística construtiva. Em sequência, as principais diferenças com a HC1 serão destacadas.

```

1  Dados de entrada:  $d_{ij}(i, j \in N^+)$ ,  $s_i(i \in N)$ ,  $m_i^b(i \in N, b \in B)$ ,  $W_{p^*}^\pi(p^* \in N^{prod}, \pi \in \Pi)$ ,  $DC_i(i \in N)$ ,  $DM_i(i \in N)$ ,  $q_i(i$ 
2   $\in N)$ ,  $Q_b(b \in B)$ ,  $comis$ ,  $Inv_p^\pi(p' \in N^{inj}, \pi \in \Pi)$ ,  $\beta$ 
3  Saída: alocação de atividades aos barcos, atendendo às condições do problema
4  - Inicializar os barcos, sem nenhuma pré-alocação
5  - Ordenar os barcos, do menos flexível ( $b = 0$ ) para o mais flexível ( $b = B-1$ )
6  - Criar lista de prontidão (lista_pro) onde constarão os instantes de liberação, considerando os desempates
7  - Criar lista de datas finais de interligação (df_pr) onde constará a menor data de término de interligação
8  de cada atividade, considerando o tempo atual do algoritmo, duração da atividade e navegação
9  - Ordenar as atividades, dentro da lista de prioridades (ativ_pri) em ordem crescente de prontidão,
10 fazendo relação/paralelo com a lista de prontidão (lista_pro). Após isso, para as atividades que já
11 tiverem prontidão imediata, ordenar pela ordem crescente data final de interligação (df_pr)
12  $t = 0$ 
13 Enquanto  $t < T$  faça
14     Enquanto lista_pro[0]  $\leq t$  e há barco com espaço disponível faça
15          $b = 0$ 
16         cont_n_viab = -1
17         Enquanto  $b < B$  faça
18             Se (m[b][ativ_pri[1]] > 0 e barco b estiver vago no intervalo t e a disponibilidade
19             do material for até o momento de início do carregamento e for uma atividade de
20             poço produtor) então
21                 Se as demais atividades deste mesmo poço produtor em análise já
22                 tiverem sido efetuadas então
23                     Se ativ_pri[0] não é produtora ou é produtora e não teve as
24                     outras atividades do mesmo poço interligadas então
25                         - Inverter ativ_pri[0] e ativ_pri[1], realizando as
26                         alterações relacionadas em lista_pro e df_pr
27                         - Calcular ociosidade do barco até alocação de ativ_pri[1]
28                     Fim Se
29                     Se ativ_pri[0] é produtora e teve as outras atividades do mesmo
30                     poço interligadas então
31                         Se potencial adicionado pelo poço da ativ_pri[1] até o
32                         fim do horizonte de tempo for maior que o adicionado pelo poço
33                         da ativ_pri[0] então
34                             - Inverter ativ_pri[0] e ativ_pri[1], realizando as
35                             alterações relacionadas em lista_pro e df_pr
36                             - Calcular ociosidade do barco até alocação de ativ_pri[1]
37                         Fim Se
38                     Fim Se
39                 Fim Se
40             Fim Se

```

```

41      Se ( $m[b][ativ\_pri[0]] > 0$  e barco  $b$  estiver vago no intervalo  $t$  e a disponibilidade
42      do material for até o momento de início do carregamento) então
43          Se há espaço para armazenagem da linha no barco  $b$  então
44              - Atribuir linha da atividade da primeira posição ao barco  $b$ 
45              - Aloque, na programação do barco  $b$ , os dias necessários para
46              realização da operação (car + nav + ativ + ociosidade, quando
47              esta for aplicável)
48              - Marcar atividade como alocada
49              - Reorganizar atividades do mesmo poço, colocando tempo  $M$ 
50              para  $lista\_pro[0]$  e  $df\_pr[0]$ , organizando primeiramente em
51              ordem crescente de  $lista\_pro$  e usando o critério de desempate;
52              para as atividades que já possuem valor de  $lista\_pro \leq t$ ,
53              reordenar em ordem crescente de  $df\_pr$ 
54               $b = B - 1$ 
55          Senão
56              /* Analisar a factibilidade em termos de espaço na embarcação
57              das atividades ainda não alocadas */
58              Enquanto não forem esgotadas as atividades não-alocadas e não ser
59              encontrada uma atividade factível (viabilidade técnica, espaço na
60              embarcação e material disponível no início do carregamento) para
61              aquele barco faça
62                  Se houver alguma atividade passível de ser alocada no
63                  barco  $b$  naquele intervalo  $t$  então
64                      Inserir a atividade nas primeiras posições das listas
65                      ( $ativ\_pri[0]$ ,  $lista\_pro[0]$  e  $df\_pr[0]$ )
66                  Fim Se
67              Fim enquanto
68              Se não houver atividade a ser alocada então
69                  - Fecha carregamento do barco  $b$ 
70                  - Enviar barco de volta à base e computa a navegação do
71                  mesmo
72              Fim Se
73          Fim Se
74      Senão
75          Se não tiver sido alocada a  $ativ\_pri[0]$  por conta de disponibilidade de
76          material no momento de início do carregamento então
77              Enquanto não forem varridas todas atividades ainda não alocadas ou
78              encontrada alguma com disponibilidade de carregamento para aquele barco
79              naquele instante  $t$  faça
80                  Se for encontrada atividade que atende restrição de
81                  viabilidade técnica, disponibilidade na base para
82                  carregamento e capacidade do barco então

```



```

83                                     Trazer tal atividade para o topo da lista
84                                     Fim Se
85                                     Fim Enquanto
86                                     Se não foi encontrada atividade alocável então
87                                         - Fecha carregamento do barco b
88                                         - Enviar barco de volta à base e computa a navegação do
89                                         mesmo
90                                     Fim Se
91                                     Fim Se
92                                     Se determinado barco não for viável tecnicamente ou não estiver vago ou a
93                                     atividade não estava com prontidão no início deste roteiro do barco então
94                                          $cont\_n\_viab = cont\_n\_viab + 1;$ 
95                                     Fim Se
96                                     Fim Se
97                                      $b = b + 1$ 
98                                     Se  $cont\_n\_viab = B - 1$  então
99                                         - Adiciona 1 unidade de tempo na primeira atividade da lista de
100                                         priorização
101                                         - Reordenar atividades do mesmo poço, organizando primeiramente em
102                                         ordem crescente de lista_pro e usando o critério de desempate; para as
103                                         atividades que já possuem valor de lista_pro  $\leq t$ , reordenar em ordem
104                                         crescente de df_pr, usando também o desempate
105                                     Fim Se
106                                     Fim Enquanto
107                                     Fim Enquanto
108                                      $t = t + 1$ 
109 Fim Enquanto

```

Figura 16 - Pseudocódigo da heurística construtiva 2

As principais alterações que foram realizadas com relação ao algoritmo da Heurística Construtiva anterior (HC1) são:

- ordenação dos *PLSVs* é realizada em ordem crescente de flexibilidade (linha 5), ou seja, os barcos de menor numeração são aqueles mais restritos. O intuito de ordenar os barcos desta forma é que as embarcações mais flexíveis sejam deixadas disponíveis para momentos em que haja uma maior concorrência entre as atividades por disponibilidade nos barcos. O fato de alocar, mais cedo, uma atividade em um *PLSV* mais restrito, mantém barcos mais viáveis para as demais alocações, o que

resulta em uma maior probabilidade de se ter opção (disponibilidade) de alocação de sucesso para as outras tarefas. Tal flexibilidade é medida pelo número de tarefas que são factíveis de ser realizada em cada embarcação neste conjunto de atividades analisado. Aqueles que possuem viabilidade técnica para realizar maior número das tarefas em questão são considerados mais flexíveis. Com isso, pode-se obter uma ordenação de barcos de acordo com a flexibilidade;

- a criação da lista *df_pr* (linhas 7 e 8) é um artifício para que sejam computadas as datas mínimas de finalização de interligação de cada atividade. Esta lista é utilizada para que o critério de alocação não seja exclusivamente dependente do instante de prontidão e seu respectivo critério de desempate. A primeira triagem das reordenações das listas – que acontecem quando houve alguma alocação de atividade, alteração do tempo *t* do algoritmo, alteração do instante de prontidão de alguma atividade por indisponibilidade de barcos no momento, além do início do algoritmo – continua ocorrendo pela ordem crescente da *lista_pro*. Contudo, para todas as atividades que têm seu instante de prontidão menor ou igual ao tempo *t* do algoritmo (ou seja, todas aquelas que já teriam material e completação disponíveis para serem alocadas), é realizada uma nova ordenação que tem por base a lista *df_pr*, que ordena este conjunto de atividades em ordem crescente de data fim de interligação. A estimativa utilizada para o valor de *df_pr* para cada atividade é a soma do tempo atual com a duração da interligação, carregamento e navegação daquelas atividades em específico. Em caso de empate, o mesmo critério de desempate apresentado anteriormente, no algoritmo da heurística construtiva 1 (Figura 14), continua sendo utilizado. O conceito de alocação segundo este critério de *df_pr* é que as atividades sejam finalizadas o quanto antes pois, como existem atividades de durações diversas, é de interesse que as atividades sejam finalizadas e, com isso, é provável que as partidas de poços, após a interligação de suas 3 linhas, venham a ocorrer mais cedo. Sendo assim, de modo geral, atividades mais curtas e que já tenham prontidão acabam tendo maior prioridade neste critério de alocação;

- entre as linhas 18 e 40 deste algoritmo, foi inserida uma rotina prévia à análise da alocação. Esta nova rotina tem por objetivo avaliar, pontualmente, casos de alteração da ordenação proposta quando o valor de produção adicionado pela atividade que se encontra na segunda posição da lista for maior que o valor adicionado de produção da atividade da primeira posição da lista. Para que esta inversão da ordem das atividades possa ocorrer, o primeiro critério a ser atendido é a atividade da segunda posição (*ativ_pri[1]*) atender aos quesitos de viabilidade técnica no barco em questão, bem como este barco estar vago no instante da alocação; necessita também possuir disponibilidade

do material no momento do início daquele específico carregamento do barco em questão e ser uma atividade de poço produtor. Atendendo a estas condições, avalia-se se as duas outras atividades do poço (da atividade que se encontra na segunda posição) já foram efetuadas. Esta é uma condição importante pois a inversão só ocorrerá caso seja possível ganho “imediato” de óleo, logo após esta interligação ocorrer. Importante ressaltar que esta inversão de atividades possibilita que aquelas que ainda não atingiram o momento de prontidão possam já ser alocadas caso atendam estas condições, deixando aquele barco específico ocioso durante alguns dias, recebendo a atividade logo em seguida. Há dois casos a serem pontuados como possíveis de ocorrer. O primeiro, quando a atividade que está na primeira posição (*ativ_pri[0]*) é uma atividade produtora e que já possuiu as suas duas outras atividades do poço interligadas. Neste caso, é efetuada uma comparação do potencial de produção que cada um dos poços poderia adicionar para escolher se as posições são mantidas ou ocorre a inversão. Esta comparação é uma estimativa baseada na multiplicação do potencial inicial de produção vezes o tempo que o mesmo poderia produzir, ou seja, o horizonte de tempo total analisado, menos a data fim desta atividade, reduzido do tempo de comissionamento. O segundo caso, em que a atividade na primeira posição advém de um poço injetor ou, então, de um poço produtor que ainda não possuiu seus outros dois dutos interligados. Nesta situação, a inversão é feita sem nenhuma outra análise prévia além daquelas que já foram realizadas. Esta inversão pode, ocasionalmente, gerar um tempo de ociosidade – a diferença entre o tempo atual e o efetivo momento de prontidão da atividade, quando o material da mesma ainda não se encontra disponível –, que é importante que seja devidamente alocado e interfira na extensão das atividades e utilização das embarcações;

- as rotinas expressas entre as linhas 49-53 e 101-104 apresentam as execuções das reordenações das listas de atividades. A alteração que ocorreu já foi explicada, anteriormente, no tópico referente à criação da lista *df_pr*: ocorre uma primeira ordenação, tal qual no algoritmo da heurística 1, com base na *lista_pro*; todavia, foi incluída uma continuidade desta rotina, que ordena as atividades que, no instante *t* do algoritmo, já atingiram a prontidão. Para este conjunto de atividades, que já estão no topo da lista, ocorre uma nova reordenação pela ordem crescente dos valores de *df_pr*, data fim de interligação. O critério de desempate apresentado continua sendo utilizado;

- importante que seja esclarecido e definido que a notação *ativ_pri[1]* refere-se à segunda atividade na lista de priorização, tal qual *ativ_pri[0]* é a atividade na primeira posição nesta determinada lista.

5.5. Comparação da HC2 com os resultados ótimos

Mantendo-se o mesmo conjunto de 30 testes teóricos, foi aplicada a HC2 para verificar seu comportamento com relação ao resultado ótimo e à HC1. Os resultados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Comparativo dos resultados ótimos, HC1 e HC2

Ótimo							
Conjunto	Poços	Atividades	PLSVs	Roteiros	Fobj	K1	K2
I	2	6	1	6	16.059,4	31,5	68
	2	6	2	3	16.357,8	24	46
	2	6	3	2	16.401,8	24	37
	2	6	4	2	16.427,3	24	31,5
	2	6	5	2	16.432,5	24	31
II	2	6	1	6	15.963,0	35	69
	2	6	2	3	16.291,9	27	46
	2	6	3	2	16.369,7	26	35
	2	6	4	2	16.396,4	25	34
	2	6	5	2	16.417,3	25	30
III	2	6	1	6	16.155,3	30	59
	2	6	2	3	16.387,3	23	44
	2	6	3	2	16.426,6	23	36
	2	6	4	2	16.452,1	23	31
	2	6	5	2	16.452,1	23	31
IV	2	6	1	6	15.712,7	40	87
	2	6	2	3	16.268,0	27	51
	2	6	3	2	16.356,2	25	42
	2	6	4	2	16.381,1	25	37
	2	6	5	2	16.401,6	25	33
V	2	6	1	6	14.866,9	57	101
	2	6	2	3	15.489,6	48	63
	2	6	3	2	15.567,4	48	46,5
	2	6	4	2	15.567,4	47,5	45
	2	6	5	2	15.567,4	47,5	39
VI	2	6	1	6	15.712,1	41	77,5
	2	6	2	3	16.061,9	35	48
	2	6	3	2	16.129,8	35	35
	2	6	4	2	16.129,8	35	31,5
	2	6	5	2	16.129,8	35	33
K1 - instante de início de operação do poço 1 (produtor) K2 - instante de início de operação do poço 2 (injetor)							
HC1						Gap	
Fobj	K1	K2					
14.923,7	59	65				7,07%	
16.192,5	32	40				1,01%	
16.288,3	29	37				0,69%	
16.288,3	29	37				0,85%	
16.288,3	29	37				0,88%	
14.636,3	64	60				8,31%	
16.149,7	34	37				0,87%	
16.155,1	34	36				1,31%	
16.155,1	34	36				1,47%	
16.155,1	34	36				1,60%	
15.397,6	50	63				4,69%	
16.133,9	34	40				1,55%	
16.318,2	28	36				0,66%	
16.318,2	28	36				0,81%	
16.318,2	28	36				0,81%	
13.994,0	72	87				10,94%	
15.876,4	40	51				2,41%	
16.045,2	36	45				1,90%	
16.045,2	36	45				2,05%	
16.045,2	36	45				2,17%	
12.606,0	89	98				15,21%	
15.076,1	57	49				2,67%	
15.134,8	56	48				2,78%	
15.134,8	56	48				2,78%	
15.134,8	56	48				2,78%	
14.219,2	70	57				9,50%	
15.649,8	45	37				2,57%	
15.804,3	43	37				2,02%	
15.804,3	43	37				2,02%	
15.804,3	43	37				2,02%	
Gap médio						3,21%	
HC2						Gap	
Fobj	K1	K2					
15.770,6	41	65				1,80%	
16.215,2	31	41				0,87%	
16.230,7	31	38				1,04%	
16.230,7	31	38				1,20%	
16.230,7	31	38				1,23%	
15.736,7	42	64				1,42%	
16.149,7	34	37				0,87%	
16.155,1	34	36				1,31%	
16.155,1	34	36				1,47%	
16.155,1	34	36				1,60%	
15.741,5	42	63				2,56%	
16.158,5	33	41				1,40%	
16.262,6	30	37				1,00%	
16.262,6	30	37				1,15%	
16.262,6	30	37				1,15%	
15.712,7	40	87				0,00%	
15.871,3	40	52				2,44%	
16.040,1	36	46				1,93%	
16.040,1	36	46				2,08%	
16.040,1	36	46				2,20%	
11.782,2	98	60				20,75%	
15.076,1	57	48				2,67%	
15.134,8	56	49				2,78%	
15.134,8	56	49				2,78%	
15.134,8	56	49				2,78%	
15.409,9	49	70				1,92%	
15.665,3	46	38				2,47%	
15.759,0	44	38				2,30%	
15.759,0	44	38				2,30%	
15.759,0	44	38				2,30%	
Gap médio						2,39%	

Pode-se notar na Tabela 15 que a aplicação da HC2 em comparação com a HC1 apresentou melhores resultados, em geral, em situações mais restritivas (com 1 e 2 *PLSVs*). Para as demais instâncias, o resultado ficou igual ou sensivelmente menor, devido ao novo critério de alocação. Houve o atingimento de um resultado ótimo no cenário de 1 *PLSV* do conjunto IV, favorecido pelo novo critério de alocação que privilegia atividades de menor duração em uma situação de igual prontidão. Neste caso em específico, sempre haverá uma linha por embarcação em cada roteiro devido ao seu comprimento fixo e a ordem de alocação fica em função da data fim de interligação, o que acaba coincidindo com a alocação ótima.

Em contrapartida, também houve um teste no qual houve um delta de 20,75% com relação ao ótimo, pois foram privilegiadas as interligações de menor duração que, neste caso, são as de poços injetores. Sendo assim, para esta configuração específica testada, a heurística não teve uma boa performance.

O comportamento de estabilização do resultado da função objetivo, dentro de cada conjunto, a partir dos cenários de 3 *PLSVs* mantém-se, assim como foi observado no comparativo entre os resultados ótimos e os alcançados através da HC1.

De modo global, o resultado médio de *gap* dos testes com a HC2 foi reduzido, de 3,21% para 2,39%. Pelas situações que serão trabalhadas posteriormente, com um maior número de atividades, estarem sujeitas a uma maior restrição de número de *PLSVs*, induz-se que o comportamento desta heurística, provavelmente, será adequado, haja visto o que se pôde verificar nas instâncias de 1 e 2 *PLSVs*.

É importante salientar que os *gaps* obtidos nesta fase do trabalho, *a priori*, apresentam-se pequenos pois o horizonte de trabalho é de 180 dias. Caso este horizonte fosse sendo reduzido, a tendência do *gap* seria aumentar pois haveria uma menor diferença entre os dias de efetiva produção entre os casos ótimo e simulado pela heurística. Contudo, trabalhar com um horizonte maior de tempo faz sentido com o caso real, haja vista a ordem de grandeza da duração das atividades de interligação.

A seguir, na seção 5.6, será apresentado o comportamento da HC2 em instâncias pequenas com dados reais.

5.6. Casos-piloto de aplicação da HC2

Assim como foi feito com a HC1 na seção 5.3, foram realizados testes com pequenas instâncias de modo a verificar o comportamento do algoritmo. Os dados de testes também são os mesmos utilizados na HC1, com 30 instâncias e 9 cenários, com os níveis de 4, 5 e 6 *PLSVs*, de baixa, média e alta flexibilidade. Os resultados são expressos na Tabela 16.

Tabela 16 - Resultados de potencial de produção nos testes da HC2 com dados reais

		Cenários								
		Baixa flexibilidade			Média flexibilidade			Alta flexibilidade		
		4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos
Instâncias	I	37.616,87	37.908,48	38.753,13	38.107,59	39.339,64	39.693,13	38.250,70	39.246,88	39.525,05
	II	51.462,04	54.236,97	56.004,57	52.435,00	54.670,11	54.679,16	54.248,55	55.868,26	56.826,23
	III	38.225,00	40.216,04	41.217,46	41.172,66	40.868,02	41.453,89	40.158,02	41.339,30	42.875,20
	IV	32.238,36	34.044,93	34.450,70	34.669,13	34.870,25	34.924,71	34.406,29	35.042,11	35.244,38
	V	44.629,41	44.685,11	47.233,95	46.072,09	46.984,04	47.502,40	46.072,09	46.012,37	47.816,67
	VI	36.489,31	38.111,23	39.417,43	38.329,98	39.905,51	40.466,57	37.673,33	39.667,02	40.060,59
	VII	36.584,93	37.973,06	40.083,53	39.711,27	39.929,34	40.256,77	39.339,05	40.496,14	41.242,98
	VIII	37.820,16	38.570,43	38.850,41	38.786,34	39.049,46	39.462,77	41.095,46	41.423,68	41.497,99
	IX	53.085,09	55.077,40	57.173,08	54.472,39	54.464,77	54.675,11	56.369,38	58.972,34	58.422,17
	X	40.900,17	41.124,19	41.552,25	42.196,40	42.602,71	43.195,50	42.457,69	44.068,68	43.708,64
	XI	33.778,03	33.849,46	34.809,80	34.235,35	36.713,91	36.785,25	36.820,91	37.912,01	37.209,35
	XII	45.724,84	45.724,84	46.734,57	45.912,23	47.933,35	48.522,59	47.151,93	48.416,20	50.767,58
	XIII	37.748,25	38.760,61	39.981,20	38.646,48	39.297,43	40.500,19	39.148,09	41.400,69	40.577,21
	XIV	38.879,75	39.458,23	40.532,30	39.820,26	39.701,82	39.569,54	40.663,30	41.421,79	41.246,68
	XV	46.462,61	47.880,87	48.098,98	46.615,58	48.473,69	49.151,22	48.367,43	49.487,20	49.874,77
	XVI	59.547,46	62.590,50	63.688,02	63.207,66	64.475,84	63.861,59	63.125,36	63.361,79	67.603,05
	XVII	48.550,68	48.905,20	50.235,68	49.686,80	49.390,81	50.451,23	51.153,93	52.226,14	52.205,87
	XVIII	42.414,35	43.091,25	42.701,52	44.177,42	44.775,72	45.046,09	43.434,30	44.539,07	45.989,99
	XIX	53.552,05	53.422,43	55.154,10	53.945,58	55.194,88	56.729,31	56.043,87	55.473,91	57.425,68
	XX	58.119,75	58.299,58	57.747,32	58.865,31	56.601,31	60.940,09	56.826,36	62.950,31	60.618,82
	XXI	60.411,20	60.784,61	60.712,23	58.565,18	63.223,82	62.499,95	60.515,64	63.047,80	61.948,32
	XXII	53.589,21	53.816,26	52.589,17	52.806,95	54.727,51	55.787,01	52.337,26	54.178,29	57.412,10
	XXIII	64.233,31	64.611,79	64.518,69	64.750,95	63.675,16	66.977,10	66.096,27	68.046,81	68.926,15
	XXIV	57.413,97	58.519,14	57.639,95	56.735,21	59.006,29	59.128,53	59.111,04	61.458,55	62.689,10
	XXV	58.306,53	58.704,69	58.003,91	57.988,39	59.505,16	60.796,63	58.438,73	58.869,62	61.724,93
	XXVI	56.856,12	58.915,28	59.035,26	53.459,77	60.263,75	61.101,14	61.457,51	61.857,25	64.219,59
	XXVII	72.392,46	74.824,89	75.044,18	68.335,43	75.350,13	77.056,49	76.531,91	79.360,30	79.977,34
	XXVIII	59.255,62	61.381,57	61.258,68	55.616,48	62.590,25	63.613,86	64.748,05	65.873,80	65.722,16
	XXIX	52.750,83	51.600,43	54.630,27	52.418,11	56.138,27	57.955,29	58.058,41	58.769,69	61.251,63
	XXX	64.458,21	66.311,54	66.563,38	61.024,21	67.997,19	71.351,96	67.602,09	70.831,97	70.398,03
	Média	49.116,55	50.113,37	50.813,86	49.425,54	51.257,34	52.137,84	51.256,77	52.720,67	53.500,28

Assim como ocorreu com os resultados da HC1 em pequenas instâncias com dados reais, ao verificar-se os resultados obtidos, na Tabela 16, nota-se que, na grande maioria dos testes, os resultados comportaram-se de acordo com o esperado. Isto é, quando comparados apenas cenários

de 4 *PLSVs*, dentro de uma mesma instância, o resultado obtido para embarcações de baixa flexibilidade é menor que o resultado para barcos de média flexibilidade que, por sua vez, possuem valor menor de função objetivo que os cenários de *PLSVs* de alta flexibilidade. O mesmo ocorre para testes considerando apenas 5 *PLSVs* ou 6 *PLSVs* dentro de uma mesma instância. Já quando se compara, dentro de uma mesma instância, resultados obtidos dentro de barcos de um mesmo tipo de flexibilidade, são obtidos resultados superiores com 6 *PLSVs* do que com 5 *PLSVs* que, por sua vez, são melhores que aqueles com 4 *PLSVs*.

Contudo, há alguns casos em que se pode verificar que, dentro de uma mesma instância, em seus 9 cenários, nem sempre os resultados melhoram com o aumento do número de *PLSVs* ou com o nível de flexibilidade. Ou seja, a mudança do critério de alocação melhorou o resultado obtido, como será apresentado à frente, mas não acabou totalmente com a miopia da heurística e algumas distorções continuam a ocorrer, neste sentido.

Sendo assim, ao analisar-se o resultado global, nota-se que o comportamento da heurística está dentro do esperado, de acordo com mesmos dois critérios de análise. O primeiro, pela média de produção das 30 instâncias de cada cenário (como apresenta a Tabela 16); e o segundo, através de normalização do resultado, como mostra a Tabela 17.

Tabela 17 - Resultados normalizados dos testes da HC2 com dados reais

		Cenários								
		Baixa	Baixa	Baixa	Média	Média	Média	Alta	Alta	Alta
		4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos
Instâncias	I	94,8	95,5	97,6	96,0	99,1	100,0	96,4	98,9	99,6
	II	90,6	95,4	98,6	92,3	96,2	96,2	95,5	98,3	100,0
	III	89,2	93,8	96,1	96,0	95,3	96,7	93,7	96,4	100,0
	IV	91,5	96,6	97,7	98,4	98,9	99,1	97,6	99,4	100,0
	V	93,3	93,5	98,8	96,4	98,3	99,3	96,4	96,2	100,0
	VI	90,2	94,2	97,4	94,7	98,6	100,0	93,1	98,0	99,0
	VII	88,7	92,1	97,2	96,3	96,8	97,6	95,4	98,2	100,0
	VIII	91,1	92,9	93,6	93,5	94,1	95,1	99,0	99,8	100,0
	IX	90,0	93,4	96,9	92,4	92,4	92,7	95,6	100,0	99,1
	X	92,8	93,3	94,3	95,8	96,7	98,0	96,3	100,0	99,2
	XI	89,1	89,3	91,8	90,3	96,8	97,0	97,1	100,0	98,1
	XII	90,1	90,1	92,1	90,4	94,4	95,6	92,9	95,4	100,0
	XIII	91,2	93,6	96,6	93,3	94,9	97,8	94,6	100,0	98,0
	XIV	93,9	95,3	97,9	96,1	95,8	95,5	98,2	100,0	99,6
	XV	93,2	96,0	96,4	93,5	97,2	98,5	97,0	99,2	100,0
	XVI	88,1	92,6	94,2	93,5	95,4	94,5	93,4	93,7	100,0
	XVII	93,0	93,6	96,2	95,1	94,6	96,6	97,9	100,0	100,0
	XVIII	92,2	93,7	92,8	96,1	97,4	97,9	94,4	96,8	100,0
	XIX	93,3	93,0	96,0	93,9	96,1	98,8	97,6	96,6	100,0
	XX	92,3	92,6	91,7	93,5	89,9	96,8	90,3	100,0	96,3
	XXI	95,6	96,1	96,0	92,6	100,0	98,9	95,7	99,7	98,0
	XXII	93,3	93,7	91,6	92,0	95,3	97,2	91,2	94,4	100,0
	XXIII	93,2	93,7	93,6	93,9	92,4	97,2	95,9	98,7	100,0
	XXIV	91,6	93,3	91,9	90,5	94,1	94,3	94,3	98,0	100,0
	XXV	94,5	95,1	94,0	93,9	96,4	98,5	94,7	95,4	100,0
	XXVI	88,5	91,7	91,9	83,2	93,8	95,1	95,7	96,3	100,0
	XXVII	90,5	93,6	93,8	85,4	94,2	96,3	95,7	99,2	100,0
	XXVIII	90,0	93,2	93,0	84,4	95,0	96,6	98,3	100,0	99,8
	XXIX	86,1	84,2	89,2	85,6	91,7	94,6	94,8	95,9	100,0
	XXX	90,3	92,9	93,3	85,5	95,3	100,0	94,7	99,3	98,7
	Média	91,4	93,3	94,7	92,5	95,6	97,1	95,4	98,1	99,5

A partir da Tabela 17, normalizada, pode-se confirmar aquilo que já foi visto na Tabela 15, através de suas médias, e verificar, sem a interferência dos diferentes volumes de potencial de produção ou número de atividades do teste, que o resultado obtido pela HC2 é coerente tanto com o aumento/redução da flexibilidade quanto com o número de embarcações utilizadas. É possível verificar que, na maioria dos casos o melhor resultado é obtido com 6 *PLSVs* de alta flexibilidade.

Pode-se, neste momento, também traçar um comparativo entre os resultados da HC1 e HC2 para este conjunto de 270 testes. A Tabela 18 apresenta a evolução percentual do volume de produção obtido através dos dois algoritmos.

Tabela 18 - Evolução percentual dos volumes de produção entre HC2 e HC1 nas instâncias com dados reais

		Cenários								
		Baixa flexibilidade			Média flexibilidade			Alta flexibilidade		
		4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos	4 barcos	5 barcos	6 barcos
Instâncias	I	-0,7%	-1,2%	-0,5%	2,4%	-0,7%	2,8%	3,5%	2,3%	1,2%
	II	4,9%	-2,0%	2,1%	0,9%	2,6%	0,2%	6,8%	3,8%	3,1%
	III	-3,1%	-2,8%	-2,1%	2,9%	-0,4%	-1,4%	0,9%	-2,0%	1,4%
	IV	-5,6%	-0,2%	-0,5%	0,6%	0,0%	-1,1%	-2,3%	-0,2%	1,1%
	V	2,4%	-3,2%	0,9%	-0,3%	0,0%	0,1%	3,7%	-0,6%	2,2%
	VI	-0,7%	-2,8%	-1,3%	1,0%	2,9%	1,7%	4,7%	2,4%	0,4%
	VII	-4,4%	-4,5%	-0,1%	2,3%	3,0%	1,2%	0,6%	4,2%	3,2%
	VIII	-1,7%	-0,2%	0,3%	1,3%	0,8%	1,9%	6,9%	6,6%	6,6%
	IX	1,9%	0,3%	4,3%	4,0%	3,8%	4,3%	2,9%	6,3%	4,7%
	X	1,2%	0,2%	1,1%	3,0%	3,2%	4,8%	2,8%	6,7%	5,5%
	XI	0,0%	0,2%	2,1%	0,4%	7,4%	8,0%	7,7%	10,6%	8,5%
	XII	0,1%	-0,6%	2,3%	-0,5%	3,4%	4,6%	1,5%	4,0%	9,1%
	XIII	2,4%	-1,3%	1,8%	-1,6%	0,2%	3,4%	-0,7%	4,9%	2,8%
	XIV	-0,1%	0,0%	3,3%	5,8%	1,2%	1,5%	4,4%	5,2%	4,5%
	XV	-1,8%	0,2%	-1,2%	1,5%	0,0%	1,5%	1,9%	4,1%	4,7%
	XVI	-1,0%	-1,9%	-0,5%	3,8%	3,7%	2,8%	1,6%	-0,1%	5,0%
	XVII	-2,2%	-3,5%	-1,8%	0,9%	-3,0%	-0,7%	3,6%	2,1%	2,0%
	XVIII	-0,8%	-1,1%	-3,1%	3,2%	1,4%	1,7%	2,3%	1,3%	4,3%
	XIX	-4,4%	-2,7%	-1,9%	-1,0%	-1,0%	0,9%	3,1%	0,1%	2,5%
	XX	5,1%	5,3%	3,6%	7,2%	1,7%	8,7%	3,5%	12,9%	8,3%
	XXI	5,9%	4,6%	4,5%	2,2%	8,2%	7,0%	3,9%	7,5%	5,8%
	XXII	5,9%	5,6%	2,7%	3,8%	6,5%	8,6%	2,2%	5,3%	11,3%
	XXIII	2,1%	2,6%	2,1%	2,6%	0,3%	7,0%	4,7%	7,0%	8,3%
	XXIV	3,9%	3,9%	2,5%	1,9%	4,5%	4,5%	6,6%	8,8%	10,5%
	XXV	6,6%	4,2%	3,2%	5,0%	5,5%	7,3%	4,7%	4,3%	8,8%
	XXVI	5,8%	6,4%	2,5%	-1,9%	1,2%	0,7%	1,9%	1,4%	5,0%
	XXVII	3,8%	4,2%	3,2%	-0,8%	0,4%	1,7%	1,6%	3,7%	3,2%
	XXVIII	1,4%	1,3%	4,2%	-3,4%	1,5%	1,0%	3,2%	4,4%	3,8%
	XXIX	1,9%	1,1%	3,2%	-2,7%	2,2%	2,8%	3,3%	4,2%	8,5%
	XXX	2,5%	5,6%	4,3%	0,8%	1,7%	4,2%	-0,1%	3,9%	2,6%
	Média	1,4%	0,9%	1,6%	1,5%	2,1%	3,2%	3,0%	4,2%	5,1%

Os percentuais apresentados na Tabela 18 versam sobre o incremento/decréscimo do volume de produção obtido com a aplicação da HC2 em comparação com a utilização da HC1. De modo geral, pode-se notar que houve uma evolução positiva nos resultados com a aplicação da HC2, sendo mais acentuada nos *PLSVs* de alta flexibilidade e menos relevante nas embarcações menos flexíveis. Houve apenas 60 reduções nos 270 testes. Ou seja, em 77,8% dos testes efetuados, a solução da HC2 foi igual ou superior à da HC1. A maior redução foi de 5,6% em uma instância de baixa flexibilidade e 4 *PLSVs*. O maior incremento foi de 12,9%, em uma instância de alta

flexibilidade e 5 *PLSVs*. Considerando todos os 270 testes realizados, o aumento médio percentual foi de 2,5% no resultado global. Sendo assim, verifica-se que o algoritmo da HC2 mostra-se mais eficiente que o da HC1.

Para uma análise um pouco mais detalhada e para efeitos de comparativo com o que foi apresentado na HC1, a Tabela 19 apresenta os resultados da instância I, em seus cenários com utilização de 4 *PLSVs*, o mesmo exemplo que foi utilizado para análise anteriormente.

Tabela 19 - Detalhe dos resultados dos cenários de 4 *PLSVs* da instância I dos testes da HC2 com dados reais

	Baixa Flexibilidade		Média Flexibilidade		Alta Flexibilidade		
Atividade	tempo (dias)						Tipo
	Fim Ativ	Fim poço	Fim Ativ	Fim poço	Fim Ativ	Fim poço	
0	36	127	115	118	56	102	Prod
1	95		30		36		
2	124		91		99		
3	52	55	59	62	55	58	Prod
4	23		17		19		
5	35		31		31		
6	83	86	77	80	38	93	Prod
7	62		19		23		
8	40		58		90		
9	149	152	130	133	130	133	Inj
10	-		-		-		
11	81		63		83		
12	-	107	-	45	-	48	Inj
13	16		28		23		
14	104		42		45		
15	96	99	93	96	111	114	Inj
16	-		-		-		
17	69		64		70		
18	77	80	119	122	81	84	Inj
19	-		-		-		
20	-		-		-		
21	64	67	50	53	46	49	Inj
22	-		-		-		
23	-		-		-		
24	33	36	41	44	59	62	Prod
25	-		-		-		
26	10		11		9		
27	18	56	25	28	25	28	Prod
28	10		17		17		
29	53		9		9		
30	13	16	8	11	11	14	Inj
31	-		-		-		
32	-		-		-		
33	117	120	113	116	113	116	Inj
34	-		-		-		
35	15		16		12		

No comparativo dos resultados destas instâncias entre a HC1 e a HC2, esta última apresentou um resultado pior em termos de produção com os *PLSVs* de baixa flexibilidade, mas nas demais apresentou desempenho superior. Porém, ao analisarmos o somatório de tempos de finalização das atividades, verifica-se melhorias em todas as instâncias: em baixa flexibilidade, havia um somatório de 1659 dias, e agora a soma é 1475; na média flexibilidade, o somatório era de 1390 dias, e agora a soma é 1326; na alta flexibilidade, era 1380 e na HC2 é 1291.

Isto indica que o algoritmo da HC2 está considerando uma antecipação das atividades como um todo. Através da Figura 17, que apresenta o Gráfico de Gantt desta mesma instância, é possível analisar de um modo mais acurado como o algoritmo está se comportando.

Figura 17 - Recorte do gráfico de Gantt com o detalhe dos cenários de 4 *PLSVs* da instância I do teste da HC2 com dados reais

Atividade de poço produtor
Atividade de poço injetor
Atividade de navegação
Carregamento
Espera

Quando se compara com o gráfico de Gantt originado para esta mesma instância na HC1 (Figura 15), observa-se que, conforme esperado, as primeiras atividades a serem alocadas são as de menor duração, o que está aderente com a nova lógica de priorização das atividades que possuem uma menor data fim de interligação. Nota-se também uma maior antecipação de atividades de poços produtores sendo que, considerando o recorte até o instante 70, pode-se verificar que já há alguns poços com todas suas linhas interligadas, o que indica a possibilidade de iniciar a produção.

Ou seja, pode-se concluir que a HC2 trouxe ganhos relevantes em termos de aumento de volume de produção e redução da miopia da HC1, pois está tendo sucesso em antecipar um maior número de atividades e priorizando mais atividades produtoras.

6. Aplicação ao caso real

6.1. Aplicação das heurísticas construtivas ao conjunto completo de dados

A última etapa de testes das heurísticas construtivas com dados reais foi realizada com um conjunto completo de atividades referentes ao período de um ano de interligações de novos poços e manutenções em poços da Bacia de Santos e de Campos. Há de se considerar que isto não engloba todas as atividades com a utilização de *PLSV* dado que, algumas delas, não trazem ganho de óleo, como interligação de equipamentos, paradas programadas ou emergenciais das embarcações.

Sobre o processo de obtenção de dados, ele envolveu uma série de áreas internas da empresa. Dados técnicos das embarcações e de previsão de finalização da completação puderam ser coletados junto a sistemas da área de gestão de recursos críticos. Informações sobre viabilidade técnica dos *PLSVs* e previsão de duração das atividades puderam ser obtidas de sistemas das gerências de equipamentos submarinos. Já os dados sobre atividades de interligação, comprimento de linhas, tipos de poços, relação entre poços injetores foram coletados junto às gerências de projeto de desenvolvimento da produção de campos de petróleo. Já informações sobre a chegada das linhas na base de carregamento foram obtidas com a coordenação de contratação que atende a estes projetos. Potenciais de produção e de injeção bem como as estimativas de declínio foram obtidas com equipes que realizam o gerenciamento dos reservatórios. Os dados sobre os tempos de navegação entre os poços que atendem a diferentes plataformas ou entre a base de carregamento e os poços foram estimados com base na distância entre cada plataforma e as demais e entre a base de carregamento e cada plataforma. Para tal, utilizou-se uma velocidade média de navegação de um *PLSV* e, assim, obteve-se uma matriz de tempos entre as locações. Importante esclarecer que foi necessária a coleta de dados em dois cenários (previsto e realizado) para que pudesse ser realizado um adequado comparativo. Estas informações que foram citadas dizem respeito à previsão. Para elas, não é possível apresentar um formato único dos dados, pois cada área trabalha com os dados de um modo distinto.

Já aquelas sobre realização versam, especialmente, sobre as datas em que realmente ocorreram as atividades na prática. E tais dados de realização puderam ser acessados em sistema corporativo que traz o histórico de atividades com descrições dos poços e atividades. Em geral, os dados de realização trazem uma parcela dos dados de previsão acrescidos das datas efetivas nas

quais ocorreram as atividades. A Tabela 20 apresenta um extrato do modelo de dados obtidos para a realização, com as principais informações necessárias.

Tabela 20 - Modelo de dados de realização das atividades com *PLSVs*

Nome da locação	Nome do poço	Tipo de tarefa	Descrição	Duração	Data início	Data término	Prefixo recurso	Tipo do recurso	LDA	Bloco

Na Tabela 20, o significado prático de cada coluna é o seguinte:

- nome da locação: identificação de determinado poço para o projeto de desenvolvimento de produção recebendo, normalmente, um nome que identifica a parcela daquele campo e o tipo de poço. Pode ocorrer de o escopo do projeto ser alterado no seu decorrer mas manter o nome ou, então, alterar o nome do poço para o projeto mas o escopo continuar o mesmo;
- nome do poço: sigla do poço para aquele campo, normalmente, atribuído de forma contínua (sigla do campo acrescido de número sequencial). Normalmente esta nomenclatura é a conhecida pelo órgão regulador;
- tipo de tarefa: dado que este sistema do qual são extraídos os dados não trata apenas de atividades com *PLSVs*, este campo tem o intuito de informar se a atividade é uma interligação, manutenção, perfuração, completação ou outra que exija embarcações para sua realização. Neste trabalho, o interesse é, predominantemente, em atividades de interligação;
- descrição: breve descrição de qual é a atividade realizada. No caso de interligação, identifica qual o tipo de linha que está sendo lançada e em qual sentido (do barco para o poço ou do poço para o barco). Neste campo textual encontrou-se o principal problema. Por ser de livre escrita, era necessário realizar o filtro das informações além de contar com falta de informações que deveriam ser deduzidas a partir de outros campos da planilha ou de outras fontes de dados. Este mesmo problema ocorreu nas informações de previsão;
- duração: informa a duração da atividade de interligação em questão;
- data início e data término: datas de início da atividade de interligação em si e sua data final. Para os momentos de carregamento e navegação havia linhas separadas com a informação;
- prefixo do recurso: nome usual pelo qual é conhecido determinado recurso. Se contratado, normalmente, o nome que a embarcação recebe da própria empresa que está tendo seu recurso afretado;

- tipo do recurso: diferentes tipos de embarcação que estão no cronograma. Em nosso caso, o interesse é apenas nas embarcações *PLSV*;
- LDA: lâmina d'água que, em geral, é um dos parâmetros que se observa para definir quais os recursos que serão viáveis tecnicamente;
- bloco: campo no qual as atividades estão sendo realizadas, ou seja, campo no qual determinado poço encontra-se.

O que deve ser salientado é que, além da dificuldade de obtenção dos dados devido ao grande número de atores envolvidos neste processo, houve necessidade de uniformizá-los, dado que cada área utiliza nomenclaturas diferentes para as atividades e poços. Algumas gerências utilizam o nome do poço para o campo, outros o nome do poço para o projeto, modos distintos de denominar as atividades ou, então, informações incompletas. Portanto, houve um intenso trabalho na coleta e manipulação de dados para que fosse possível concluir uma base de dados completa para ser utilizada neste trabalho.

Neste período de referência, havia atividades em 120 poços, totalizando 360 atividades sendo que, algumas delas são *dummy* pois pode haver poços que não exigem as 3 linhas por conta de já terem parte delas sido interligadas anteriormente ou por conta de ser alguma manutenção de linha necessária para que o poço volte a operar.

Na realização, o percentual de dias para os quais os *PLSVs* realizaram atividades que não são consideradas de óleo foi de 13,9% (697 dias em 5016 disponíveis). Foi utilizado um total de 14 barcos no caso real. Contudo, para expressar este volume de atividades, de modo a realizar a simulação do que aconteceria ao aplicarmos uma heurística construtiva, serão desconsideradas 13,9% vezes 14 *PLSVs*, o que dá cerca de 2 *PLSVs*. Portanto, trabalhar-se-á com 12 *PLSVs* para realizar as alocações.

Para definir-se quais seriam os *PLSVs* a serem desconsiderados, calculou-se uma proporção dos *PLSVs* existentes e aqueles que seriam utilizados. Dos 14 *PLSVs* de toda a frota, tem-se que 6 deles são considerados de alta flexibilidade (percentual de atendimento das atividades consideradas igual ou superior a 80%), 5 deles são de média flexibilidade (aqueles que atendem a mais de 40% e a menos de 80% das atividades consideradas) e 4 deles são de baixa flexibilidade (aqueles que atendem a no máximo 40% das atividades do *portfolio* analisado).

A partir disto, foi realizada uma proporção com base nos 12 *PLSVs* que devem ser considerados para a frota. Ou seja, foram multiplicados os números de *PLSVs* de cada categoria

pelo fator multiplicativo 12/14 (ou seja, aproximadamente 0,857) obtendo, assim, números fracionados. Através do arredondamento para o inteiro mais próximo, obtém-se uma quantidade de *PLSVs* que se deseja optando, deste modo, pela redução de um *PLSV* de alta flexibilidade e um de média flexibilidade. A Tabela 21 apresenta, resumidamente, o que se está abordando neste critério.

Tabela 21 - Número de *PLSVs*, por categoria, a serem utilizados na heurística construtiva

	Alta flexibilidade	Média flexibilidade	Baixa flexibilidade
Número de <i>PLSVs</i> original	6	5	3
Fator (12/14)	0,857		
Número de <i>PLSVs</i> aproximado	5,1	4,3	2,6
Número de <i>PLSVs</i> arredondado	5	4	3

Dentro de cada classe de *PLSVs*, para que fosse feita a escolha de qual barco seria retirado da frota foi estabelecido o critério de retirada daquele que estivesse na mediana. Ou seja, na classe de média flexibilidade, por ter 5 *PLSVs*, o central em termos de flexibilidade (ou seja, o terceiro mais e menos flexível, concomitantemente) foi escolhido para ser retirado deste estudo. Para a frota de alta flexibilidade foi utilizado o mesmo critério. Por ter um número par de elementos, poderia haver algum critério de desempate. Porém os *PLSVs* que se encontravam em terceiro e quarto lugar (tanto para os mais e menos flexíveis) eram de especificação técnica igual. Portanto foi retirado um destes, dado que a escolha seria indiferente neste caso. Assim, chega-se aos *PLSVs* da frota que devem ser utilizados para realizar o teste com todo o *portfolio* de atividades.

Teve-se o cuidado de utilizar as mesmas premissas de adaptação de dados – aquelas utilizadas para manutenção da confidencialidade – nos dados de realização obtidos. Tomando por base as datas de término de cada uma das atividades, também se aplicam os valores fixos para comissionamento de poços (3 dias após a última atividade ser interligada), bem como os declínios constantes considerados, influência positiva dos poços injetores no potencial de produção e a ausência de paradas não-programadas para manutenção das unidades de produção que viessem a interferir no resultado. Assim, será possível traçar uma referência comparativa: qual o resultado obtido na realidade, com as premissas adaptadas versus o resultado quando se utiliza esta heurística construtiva sobre os dados planejados.

6.2. Comparação da HC1 com o realizado

Considerando-se o exposto na seção 6.1, pôde-se obter que o valor realizado de potencial de produção oriundo destas novas atividades de interligação é de 268,9 milhões de barris. E o valor que foi obtido através da aplicação do algoritmo da HC1 foi de 277,0 milhões de barris. Ou seja, nesta primeira heurística construtiva, ela demonstrou ser superior em 3,0% ao valor realizado, quando igualadas as premissas, dentro deste período analisado. Vale ressaltar que houve aplicação de fator multiplicativo a alguns dados de entrada, para manutenção da confidencialidade dos mesmos, inclusive os de produção.

As Tabelas 22 e 23 apresentam as variações entre as datas e volume de potencial de produção anual dos poços entre o resultado da HC1 e o valor realizado padronizado. Poços mensurados em atraso significam que a heurística finalizou estes poços com data mais tarde em relação ao resultado do caso real sob padronização. Do contrário, poços em antecipação são aqueles com data de finalização mais cedo do que o caso real padronizado. Ou seja, o comportamento de apresentar poços com datas antecipadas e com produção em acréscimo é aquele que valoriza a situação e garante o sucesso da heurística construtiva apresentada. Houve antecipação tanto de poços produtores quanto de injetores, com relevância de antecipações de grande porte (entrada do poço antecipada em mais de 60 dias). Isto reflete o fato de que, na situação realizada, havia uma maior dispersão nos instantes de conclusão das atividades de um mesmo poço, levando a ficarem prontos mais tarde.

Tabela 22 - Tabela de diferenças de datas de entrada dos poços – HC1 X Caso real

	Atraso em relação ao real				Antecipação em relação ao real				Sem alteração
	Até 15 dias	Entre 16 e 60 dias	Maior que 60 dias	Total	Até 15 dias	Entre 16 e 60 dias	Maior que 60 dias	Total	
Poços Produtores	6	12	18	36	4	14	24	42	0
Poços Injetores	2	2	7	11	5	5	21	31	0
Total	8	14	25	47	9	19	45	73	0

Tabela 23 - Tabela de diferenças de volume produzido – HC1 X Caso real

	Redução (mil barris/ano)				Acréscimo (mil barris/ano)				Sem alteração
	Até 500	Entre 500 e 3000	Maior que 3000	Total	Até 500	Entre 500 e 3000	Maior que 3000	Total	
Poços Produtores	6	20	10	36	6	27	9	42	0

A HC1 também apresentou diferença de comportamento no perfil de entrada em operação dos poços no decorrer do ano. Para haver um incremento na curva de produção, é necessário que os poços operem pelo maior tempo possível no decorrer de determinado período de tempo. Porém, para que isto ocorra, é necessário que todas suas linhas sejam interligadas e não apenas parte delas. As Figuras 18 e 19 apresentam o comparativo entre os dados realizados e o comportamento desta heurística construtiva.

Figura 18 - Perfil de entrada em operação de poços produtores (Realizado x HC1)

Figura 19 - Perfil de entrada em operação de poços injetores (Realizado x HC1)

Na Figura 18, pode-se verificar uma sensível antecipação da entrada de poços produtores, especialmente nos 2º e 3º trimestres, onde reside o ganho da heurística dado que ocorre, ao fim do ano, de alguns poços não serem cumpridos dentro do prazo na versão realizada. Já na Figura 19, nota-se que houve uma intensa mudança no perfil dos poços injetores, com entradas irregulares e antecipadas. Isto condiz com a realidade dado que poços injetores contribuem menos para a curva de produção de óleo então são, normalmente, despriorizados. Outro fato é que poço injetor em operação antes do produtor atrelado, não possui serventia para incremento da curva de produção de óleo. Vale ressaltar aqui que, como há poços que possuem atividades *dummy*, algumas vezes uma ou duas linhas são suficientes para a contagem de um poço a mais em operação, dado que o que importa para a análise é a finalização total da interligação de suas linhas.

6.3. Comparação da HC2 com o realizado

Após a obtenção do resultado da HC1, foram realizadas as melhorias apontadas na seção 5.4 deste trabalho, com vistas a obter um algoritmo mais robusto, a fim de incrementar o resultado. Assim, deu-se origem à heurística construtiva 2 (HC2). A aplicação de seu algoritmo ao mesmo conjunto completo de dados resultou em um valor de 283,1 milhões de barris no período, o que equivale a um aumento de 5,3% com relação ao valor realizado (268,9 milhões de barris, de acordo com a seção 6.2) e 2,2% superior ao valor encontrado pela HC1 (277,0 milhões de barris, de acordo com a seção 6.2). Aliado aos resultados obtidos nos testes intermediários, com instâncias menores, isto confirma que a estratégia HC2 traz relevantes ganhos para o caso em estudo. As Tabelas 24 e 25 apresentam um resumo do comparativo entre o resultado da HC2 e o valor realizado.

Tabela 24 - Tabela de diferenças de datas de entrada dos poços – HC2 X Caso real

	Atraso em relação ao real				Antecipação em relação ao real				Sem alteração
	Até 15 dias	Entre 16 e 60 dias	Maior que 60 dias	Total	Até 15 dias	Entre 16 e 60 dias	Maior que 60 dias	Total	
Poços Produtores	12	10	12	34	5	8	31	44	0
Poços Injetores	2	5	11	18	5	6	13	24	0
Total	14	15	23	52	10	14	44	68	0

Tabela 25 - Tabela de diferenças de datas de volume produzido – HC2 X Caso real

	Redução (mil barris/ano)				Acréscimo (mil barris/ano)				Sem alteração
	Até 500	Entre 500 e 3000	Maior que 3000	Total	Até 500	Entre 500 e 3000	Maior que 3000	Total	
Poços Produtores	13	10	11	34	5	27	12	44	0

Entre os resultados obtidos pela HC1 e HC2, na Tabela 24, pode-se notar que houve um menor número de poços antecipados na HC2 (68 poços antecipados *versus* 73 na HC1), porém houve uma antecipação maior de poços produtores (44 poços na HC2 *versus* 42 poços na HC1) que, efetivamente, fazem a função objetivo ser mais valorada. Já a Tabela 25 nos apresenta que, além de a HC2 antecipar mais poços produtores, o impacto dos poços antecipados foi de um acréscimo relevante, com crescimento dos poços que contribuíram para a curva anual de produção com mais de 3 milhões de barris no ano.

Sendo assim, a estratégia de considerar como critério de alocação as atividades que tivessem a data fim de interligação mais cedo apresentou-se consistente, dado que isso leva a uma conclusão mais precoce de tarefas curtas, o que leva a um encurtamento do prazo de entrada em produção ao fim da interligação de todas as linhas daquele poço.

Todos os procedimentos referentes a heurísticas foram programados e rodados em um computador HP Pavilion, de processador Intel Celeron, 2.13 GHz, 4 Gb de memória RAM. O tempo de processamento da HC1 foi de cerca de 3,2s e da HC2, de cerca de 8,0s.

As Figuras 20 e 21 apresentam o perfil de entrada dos poços, separadamente, produtores e injetores para melhor visualização do efeito de ambas heurísticas, na versão acumulada.

Figura 20 - Perfil acumulado de entrada em operação de poços produtores (Realizado x HC1 x HC2)

Figura 21 - Perfil acumulado de entrada em operação de poços injetores (Realizado x HC1 x HC2)

A Figura 20 expõe que a HC2 promoveu um aumento do número de poços produtores que foram interligados precocemente, enquanto a HC1 promovia um período de interligação mais forte nos meses do 2º e 3º trimestre do período analisado. O conceito de interligar atividades mais curtas, de fim de interligação mais cedo, é o principal fator para a obtenção deste resultado. Outro fator que ajuda a explicar, em um segundo plano, é a inserção da rotina prévia que analisa se a antecipação da segunda atividade contribui mais para a curva de produção de óleo que a primeira da listagem.

Pode-se verificar na Figura 21 que, enquanto a HC1 antecipou bastante as atividades de poços injetores, a HC2 as antecipou de um modo mais sutil. A mudança de lógica da heurística sugere que esta alteração é consequência das atividades injetoras não contribuírem em grande valor com a função objetivo. Por mais que sejam atividades que possam ter sua liberação mais cedo, elas são atividades que possuem uma duração da interligação maior o que, nesta nova lógica da heurística, lhe dá uma prioridade menor para antecipação da interligação. Na HC1 a lógica principal era a data de prontidão, o que explica o comportamento diferenciado.

Outra visão interessante de ser avaliada é a evolução da curva de produção de óleo no decorrer do tempo analisado, nos casos realizado, HC1 e HC2. Estes dados são apresentados na Figura 22, que versa sobre a produção acumulada a cada período considerado.

Figura 22 - Perfil acumulado de curva de produção, por período avaliado (Realizado x HC1 x HC2)

Interessante avaliar, na Figura 22, que o comportamento da produção está associado, fortemente, com o perfil de entrada dos poços produtores. Enquanto a HC2 possui entrada de poços produtores antecipada desde o começo do período de avaliação – o que leva a curva de produção acumulada estar todo o tempo acima da curva de realização –, a HC1, nesta visão acumulada, apresenta-se abaixo da linha de realização durante grande parte do tempo avaliado. A HC1 apresenta-se melhor que a visão realizada nos últimos períodos, resultado do maior número de poços produtores entrando em operação, em especial no 3º trimestre do período avaliado, como apresenta a Figura 18. A partir deste período, pode-se notar que a inclinação do gráfico da HC1 fica mais acentuada do que a inclinação da curva de realização, ressaltando o incremento mais

avanzado neste horizonte de tempo. Esta curva de produção da Figura 22 também conversa diretamente com os resultados apresentados na Figura 20, com a entrada acumulada de poços produtores no decorrer do tempo.

Importante salientar que estes resultados são uma referência da eficácia das heurísticas. Porém, há que se ter em mente que há uma série de fatores que podem contribuir para alterações do resultado, tais como: as durações das tarefas entre o planejado e a realização pois, na prática, elas podem ter uma variação de duração a maior ou a menor a depender de condições de mar; na prática, podem ocorrer problemas relacionados à disponibilidade dos materiais para interligação ou, ainda, nas etapas de construção do poço, impactando na data final de sua completação; podem ocorrer problemas operacionais nas plataformas e poços, o que reduziriam sua produção e, por se estar trabalhando com volumes de potencial de produção, isto foi desconsiderado – ou seja, está se trabalhando com um cenário ideal; os valores de declínio e de acréscimo por poço injetor são valores estimados e que, na vida prática, podem variar quando verifica-se a real condição de operação do poço. O declínio constante de produção apresenta uma boa aproximação com a realidade, porém podem ocorrer flutuações não tão lineares na taxa de produção, efetivamente. Sendo assim, é de suma importância trabalhar com premissas niveladas e consistentes entre os casos que se está comparando para apurar com acurácia os resultados obtidos.

Um resultado de acréscimo de até 5,3% no potencial de produção destes novos poços durante o período analisado apresenta-se de grande relevância ainda mais quando se retoma a justificativa deste projeto, que aborda os montantes com os quais se lida na indústria de petróleo. Vale ressaltar também que isto não implica em um aumento de mesma proporção na curva de óleo da companhia, dado que se está falando apenas deste conjunto de poços que necessitaram de interligação no período de referência, sem considerar os poços que já estavam em produção.

7. Conclusões e futuras pesquisas

Este trabalho abordou o processo de interligação de poços de petróleo a unidades produtoras *offshore*, ou seja, em pleno alto-mar. Dado o crescimento da produção de petróleo brasileiro em ambiente marítimo e, em especial, à contribuição de poços da camada pré-sal neste resultado, é bastante relevante que sejam realizados estudos com vistas à caracterização e busca de melhorias para o processo.

Através da apresentação de características e fases de um projeto de petróleo típico bem como as áreas técnicas que o compõem, foi possível compreender a complexidade existente desde os estudos geológicos até a entrada em produção dos poços de petróleo após a interligação de cada duto com as embarcações do tipo *PLSV*. É necessária uma estratégia bem fundamentada para que o capital investido seja o melhor possível empregado.

Dado que este é um problema de alta combinatoriedade e que possui uma série de restrições práticas em uma situação a qual se deseja otimizar, fica caracterizada a relevância da aplicação de métodos de otimização para sua resolução. E, para tal, quanto melhor o problema for estudado com base na literatura existente, mais avanços podem ser trazidos não apenas em termos de auxílio na resolução, mas também no desenvolvimento de formulações apropriadas para características inovadoras. Este problema diferencia-se dos demais já apresentados na literatura por trazer a questão do declínio dos poços produtores e a contribuição dos poços injetores a partir do momento que estes também são interligados.

No decorrer do trabalho, foi percorrido um caminho de gradativo desenvolvimento, iniciando com a formulação matemática, que levou aos resultados ótimos para os testes de pequenas instâncias, que demonstraram a pertinência da formulação à situação descrita. Após isto, para resolver instâncias maiores, valeu-se da elaboração de duas heurísticas construtivas – chamadas de HC1 e HC2 –, que se aproveitaram das características e restrições gerais do problema para estabelecer um procedimento de ordenação que resultaram em uma melhoria expressiva de, respectivamente, 3,0% e 5,3% no potencial de produção adicionado por estes poços no decorrer deste período analisado quando comparado à situação real. Lembrando que houve também uma fase de testes das heurísticas construtivas com dados de casos reais, mas em problemas de pequenas instâncias para que o comportamento de cada heurística fosse validado.

Sendo assim, pôde-se comprovar que a aplicação de técnicas de Pesquisa Operacional são de fundamental importância para retratar de maneira fidedigna as restrições e peculiaridades do problema abordado. Também foi possível apresentar e modelar de maneira mais realista uma formulação matemática que engloba novas características técnicas da situação-problema, embora de forma aproximada, com um expressivo resultado.

Como futuras pesquisas deste trabalho, sugere-se que o estudo seja evoluído para uma estratégia de busca em vizinhança que seja capaz de investigar permutas de atividades após a alocação inicial que é sugerida pelas heurísticas construtivas. Por ser um problema que conta com um grande número de restrições, elaborar um procedimento avançado representa um grande desafio pois a solução pode perder suas características de factibilidade facilmente. Outra sugestão é realizar análises de cenários com alterações de quantidades de projetos e *PLSVs*, indicando também um tratamento probabilístico para a questão, tendo em vista que incertezas na duração das atividades tais quais causadas por condições marítimas, nem situações de quebras de embarcações ou indisponibilidades operacionais não foram contempladas neste trabalho. Outro fator que pode ser considerado é a restrição de número máximo de *PLSVs* simultâneos sendo carregados na base, o que pode levar a um tempo de ociosidade do *PLSV* enquanto espera a operação de carregamento das linhas do próximo roteiro a ser executado.

Portanto, vê-se que a indústria petrolífera – na qual os montantes de investimento são elevados devido à extremidade tecnológica na qual se trabalha – pode ser auxiliada por técnicas e estudos aprofundados de otimização, dado que existem uma série de recursos trabalhando concomitantemente e essa gama de atividades deve ser sincronizada de modo sinérgico, ou seja, visando à maximização da utilização dos recursos envolvidos.

8. Referências Bibliográficas

- ANP. **Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2017**. Disponível em:
< <http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/anuario-estatistico/3819-anuario-estatistico-2017> >. Acesso em 14/06/2017.
- ANP. **Contrato de concessão para exploração, desenvolvimento e produção de petróleo e gás natural**. Disponível em: <www.anp.gov.br/?dw=44956>. Acesso em: 11/10/2014.
- ARENALES, M.; ARMENTANO, V.; MORABITO, R.; YANASSE, H. **Pesquisa Operacional**. Editoria Elsevier. Rio de Janeiro, 2007.
- ASSIS, L. S.; CAMPONOGARA, E. A MILP model for planning the trips of dynamic positioned tankers with variable travel time. **Transportation Research**, Part E, v. 93, p. 372-388, 2016.
- AZI, N.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. An exact algorithm for a single-vehicle routing problem with time windows and multiple routes. **European Journal of Operational Research**, v. 178, p. 755-766, 2007.
- AZI, N.; GENDREAU, M.; POTVIN, J. An adaptive large neighborhood search for a vehicle routing problem with multiple trips. **European Journal of Operational Research**, 202, p.756-76, 2010.
- BALLOU, R. H. **Gerenciamento da Cadeia de Suprimentos / Logística Empresarial**. 5^a ed. Bookman. Porto Alegre, 2004.
- BELFIORE, P. P. *Scatter Search* para Problemas de Roteirização de Veículos com Frota Heterogênea, Janelas de Tempo e Entregas Fracionadas. **Tese de Doutorado** – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.
- BIANCO, B. P.; GOMES, C. F. S.; CHAVES, M. C. C. Simulação e otimização de logística de embarcações para conexão de poços do Pré-Sal. **XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2014.
- BNDES. **BNDES 60 anos: perspectivas setoriais**. BNDES, 2012.
- BREJON, S. R. C.; BELFIORE, P. P. A importância do enfoque sistêmico para problemas de roteirização de veículos. **Revista Pesquisa e Desenvolvimento Engenharia de Produção**, n. 5, p. 64-86, 2006.
- BREMENKAMP, L. H.; CUNHA, V. A. C.; HAMACHER, S.; PESSÔA, L. S.; RIBAS, P. C. Modelo de Programação Matemática para apoio à decisão da programação de embarcações PLSV. **XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2016.
- CATTARUZZA, D.; ABSI, N.; FEILLET, D.; VIDAL, T. A memetic algorithm for the Multi Trip Vehicle Routing Problem. **European Journal of Operational Research**, 236, p. 833-848, 2014.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. Ship routing and scheduling in the new millennium. **European Journal of Operational Research**, v. 228, p. 467-483, 2013.

CHRISTOFIDES, N.; EILON, S. An algorithm for the vehicle-dispatching problem. **Operational Research Quaterly**, 20, n. 3, p. 309-318, 1969.

CLARKE, G.; WRIGHT, J.W. Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. **Operations Research**, v.12, p. 568–581, 1964.

DANTZIG G. B.; RAMSER J. H. The truck dispatching problem. **Management Science**, v. 6, n. 1, p. 80-91, 1959.

DREXL, M. Rich vehicle routing in theory and practice. **Logistics Research**, v. 5, issue 1, p. 47-63, 2012.

DULLAERT, W., JANSSENS, G. K., SORENSEN, K., VERNIMMEN, B. New heuristics for the fleet size and mix vehicle routing problem with time windows. **Journal of Operational Research Society**, v. 53, p. 1232-1238, 2002.

FISHER. M.; JAIKUMAR, R.; A Generalized Assignment Heuristics For Vehicle Routing. **Networks**, v.11, n.2, p. 109-124, 1981.

FLEISCHMANN, B. The vehicle routing problem with multiple use of vehicles. **Working Paper, Fachbereich Wirtschaftswissenschaften**, Universität Hamburg, Germany, 1990.

FLOOD, M. M. The Traveling-Salesman Problem. **Operations Research**, v. 4, n. 1, p. 61-75, 1956.

GIROUDEAU, R.; NAUD, O.; HERNANDEZ, F.; FEILLET D. **A new exact algorithm to solve the multi-trip vehicle routing problem with time window and limited duration**. Laboratoire d'informatique, de robotique et de microélectronique de Montpellier, 2011.

GOLDBARG, M.C.; LUNA, H.P.L. **Otimização Combinatória e Programação Linear – Modelos e Algoritmos**. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, 2005.

GOLDEN, B.L.; ASSAD, A.; LEVY, L.; GHEYSENS, F. The fleet size and mix vehicle routing problem. **Computers & Operations Research**, v.11, n.1, p. 49-66, 1984.

HENNIG, F.; NYGREEN, B.; CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; FURMAN, K.C.; SONG, J.; KOCIS, G. R.; WARRICK, P.H. Maritime crude oil transportation – a split pickup and split delivery problem. **European Journal of Operational Research**, v. 218, p. 764-774, 2012.

HENNIG, F.; NYGREEN, B.; FURMAN, K. C.; SONG, J. Alternative approaches to the crude oil tanker routing and scheduling problem with split pickup and split delivery. **European Journal of Operational Research**, v. 243, p. 41-51, 2015.

LEE, J.; KIM, B. Industrial ship routing problem with split delivery and two types of vessel. **Expert System with Applications**, v. 42, p. 9012-9023, 2015.

MOURA, V. C. **Programação de frota de embarcações de lançamento de dutos**. Dissertação de Mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

NEVES, M. L.; LAZZARINI, A. L.; BRANDÃO, A. L. S.; CASTRO, J. F. T. Alocação de equipamentos críticos em projetos de produção de petróleo offshore. **Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2012.

NISHI, T.; IZUNO, T. Column generation heuristics for ship routing and scheduling problems in crude oil transportation with split deliveries. **Computers and chemical engineering**, v. 60, p. 329-338, 2014.

PEREIRA, R. A. Escalonamento de atividades de desenvolvimento de poços de petróleo: GRASP. **Dissertação de Mestrado** – Instituto de Computação, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2005.

PEREIRA, R. A.; MOURA, A. V.; SOUZA, C. C. Comparative Experiments with GRASP and Constraint Programming for the Oil Well Drilling Problem. Nikolettseas S.E. Experimental and Efficient Algorithms. **Lecture Notes in Computer Science**, v. 3503, p. 328-340. Berlin, 2005b.

PEREIRA, R. A.; MOURA, A. V.; SOUZA, C. C. Grasp strategies for scheduling activities at oil wells with resource displacement. **Relatório técnico Instituto de Computação da UNICAMP**. Disponível em: < <http://www.ic.unicamp.br/~reltech/2005/05-28.pdf>>. Acesso em 19/06/2017. Campinas, 2005c.

RODRIGUES, V. P.; MORABITO, R.; YAMASHITA, D.; SILVA, B. J. V.; RIBAS, P. C. Abordagens de otimização para um problema de roteirização e programação de navios petroleiros. **Gestão & Produção**, v. 24, n. 4, p. 790-805. São Carlos, 2017.

SILVA, B. N.; GOMES, L. L.; MEDEIROS, R. L. Análise de risco de projetos de desenvolvimento da produção marítima de petróleo: um estudo de caso. **Brazilian Business Review**, v.3, n.2, p. 229-244, 2006.

SILVA, T. S. A. Programação por restrições e escalonamento baseado em restrições: um estudo de caso na programação de recursos para o desenvolvimento de poços de petróleo. **Dissertação de Mestrado** – Instituto de Matemática e Estatística, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2012.

SINAVAL. **PLSV Skandi Açú é batizado na Noruega**. Disponível em: < <http://sinaval.org.br/2016/04/plsv-skandi-acu-e-batizado-na-noruega/>>. Acesso em: 26/10/2017.

SOARES, J. B. C. O.; LEITE, L. S. B. S. Transporte marítimo de carga na Bacia de Campos: uma abordagem por clusterização capacitada e roteirização de embarcações. **XLVI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional**, 2014.

SOLOMON, M. M. Algorithms for the vehicle routing and scheduling problems with the time window constraints. **Operations Research** 35, p. 254-265, 1987.

TAILLARD, E. D.; LAPORTE, G.; GENDREAU, M. Vehicle routing with multiple use of vehicles. **Centre de recherché sur les transports**. Université de Montréal, 1995.

TOTH, P., VIGO, D. The Vehicle Routing Problem. **Society for Industrial and Applied Mathematics**, Philadelphia, 2002.