



Leonardo Helmer Bremenkamp

**Metodologia baseada em programação matemática para
alocação e sequenciamento em embarcações PLSV**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Silvio Hamacher
Co-orientador: Prof. Paulo Cesar Ribas

Rio de Janeiro
Março de 2017



Leonardo Helmer Bremenkamp

**Metodologia baseada em programação matemática para
alocação e sequenciamento em embarcações PLSV**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Departamento de Engenharia Industrial da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Silvio Hamacher

Orientador

Departamento de Engenharia Industrial - PUC-Rio

Prof. Paulo Cesar Ribas

Co-Orientador

Petrobras

Prof. Luciana de Souza Pessôa

Departamento de Engenharia Industrial – PUC-Rio

Prof. Virgilio Jose Martins Ferreira Filho

UFRJ

Prof. Marcio da Silveira Carvalho

Coordenador (a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 10 de Março de 2017.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização do autor, do orientador e da universidade.

Leonardo Helmer Bremenkamp

Graduou-se em Engenharia de Produção pelo Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo – IFES em 2014. Durante a graduação participou do Grupo de Pesquisa NEPES – Núcleo de estudos sobre produção enxuta e sustentável, tendo oportunidade de desenvolver trabalho de iniciação científica que utilizou conceitos de ensino-aprendizagem em manufatura enxuta.

Ficha Catalográfica

Bremenkamp, Leonardo Helmer

Metodologia baseada em programação matemática para alocação e sequenciamento em embarcações PLSV / Leonardo Helmer Bremenkamp ; orientador: Silvio Hamacher ; co-orientador: Paulo Cesar Ribas. – 2017.

93 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Industrial, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Industrial – Teses. 2. Programação Matemática. 3. Programação de Navios. 4. Logística Petrolífera. 5. PLSV. 6. Alocação e Sequenciamento. I. Hamacher, Silvio. II. Ribas, Paulo Cesar. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Industrial. IV. Título.

CDD: 658.5

Aos meus pais, Asdrubal[†] e Ilzira, e aos meus irmãos Gisele e Fabiano.

Agradecimentos

A minha família por todo o empenho dedicado em minha educação e formação, pelos exemplos, princípios e valores a mim transmitidos e por todo apoio, amor e carinho incondicionais a mim fornecidos.

Ao orientador Silvio Hamacher, pelas oportunidades concedidas, pela orientação no desenvolvimento deste trabalho e pelos ensinamentos a mim transmitidos ao longo do mestrado, tanto em sala de aula quanto através do exemplo de excelente professor e profissional.

Ao orientador Paulo Ribas pelas contribuições ao longo de todo o projeto, por sua disponibilidade, orientação e apoio na elaboração deste trabalho.

Aos professores e demais funcionários da PUC-Rio, pelos ensinamentos, orientações e convivência harmoniosa ao longo do mestrado.

À Janaina, Victor, Pedro, Iuri, Tiago, Gabriela, Danuza e demais colegas de trabalho, pela parceria nos projetos desenvolvidos, pelos conhecimentos compartilhados e por tornarem o dia a dia menos exaustivo, proporcionando um ambiente agradável, colaborativo e descontraído.

À Leila, Jessica, Janaina, Nathália, Victor, Dimas, Igor e demais amigos do mestrado, pela parceria nos estudos, momentos de descontração e amizade que ajudaram a transformar estes dois anos em uma experiência ainda mais positiva e prazerosa.

Ao Instituto Tecgraf, à CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos e pelo ótimo ambiente de estudo e trabalho sem os quais o desenvolvimento desta pesquisa não teria sido possível.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para este trabalho.

Resumo

Bremenkamp, Leonardo Helmer; Hamacher, Silvio (Orientador); Ribas, Paulo Cesar (Co-Orientador). **Metodologia baseada em programação matemática para alocação e sequenciamento em embarcações PLSV**. Rio de Janeiro, 2017. 93p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A exploração e produção de petróleo do Pré-sal ocorre em regiões de águas ultra profundas, com condições complexas de instalação e operação de equipamentos. A interligação dos poços, última etapa que antecede o início da operação de produção, é realizada por embarcações de alto custo, especialmente equipadas para este fim, conhecidas como PLSVs (*Pipe Laying Support Vessels*). Esta dissertação visa o desenvolvimento de um modelo de programação matemática capaz de alocar e sequenciar as atividades de interligação de poços submarinos em embarcações PLSV, de forma a maximizar a produção de óleo acumulada durante o horizonte de planejamento. Para tanto, foi utilizado como base um problema real enfrentado pela Petrobras, que permitiu estender a abordagem clássica baseada em máquinas paralelas, com a adição de novas restrições. Para tornar a otimização viável, foi criado um método de resolução que utiliza o conceito de blocos de atividades. Visando reduzir a complexidade de resolução, foram realizados testes utilizando apenas blocos compostos por atividades de poços próximos entre si. Tais estratégias se mostraram eficazes e o modelo foi capaz de gerar soluções de execução viável e de qualidade até 21,5% superiores em produção de óleo quando comparadas à solução contruída pelos especialistas do problema.

Palavras-chaves

Programação Matemática; Programação de Navios; Logística Petrolífera; PLSV; Alocação e Sequenciamento.

Abstract

Bremenkamp, Leonardo Helmer; Hamacher, Silvio (Advisor); Ribas, Paulo Cesar (Co-Advisor). **Mathematical programming based methodology for PLSV vessels assignment and sequencing**. Rio de Janeiro, 2017. 93p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Pre-salt oil exploration and production occurs in ultra-deep water regions, with complex conditions of equipment installation and operation. The wells connections, last stage before the production phase, is carried out by high-cost vessels, specially equipped for this purpose, known as PLSVs (Pipe Laying Support Vessels). This dissertation aims to develop a mathematical programming model to assign and schedule a PLSV fleet, in order to maximize the oil production during the planning horizon. For this purpose, a real problem faced by Petrobras was used, which allowed to extend the classic parallel machine approach, adding new constraints to the problem. To make the optimization feasible, a resolution method was created using the activities blocks concept. In order to reduce the resolution complexity, tests were performed using blocks composed by activities of wells close to each other. These strategies were effective, generating solutions with quality up to 21.5% higher (in oil production) when compared to the solution built by the problem specialists.

Keywords

Mathematical Programming; Ship Scheduling; Oil Logistics; PLSV; Assignment and Sequencing.

Sumário

1. Introdução	12
1.1. Justificativa	13
1.2. Objetivo geral	13
1.3. Objetivos específicos	14
1.4. Delimitação do estudo e contribuições esperadas	14
1.5. Estrutura da dissertação	15
2. Referencial Teórico	16
2.1. Exploração e Produção do Petróleo	16
2.1.1. Exploração	17
2.1.2. Perfuração	18
2.1.3. Produção	19
2.2. Sistemas Submarinos	21
2.2.1. Cabeça de poço	22
2.2.2. Árvore de Natal Molhada (ANM)	22
2.2.3. <i>Manifolds</i>	22
2.2.4. Dutos rígidos	23
2.2.5. Dutos flexíveis	23
2.2.6. Estruturas de fim de dutos	25
2.2.7. Umbilicais	26
2.2.8. Sistema de conexão vertical	26
2.2.9. <i>Jumpers</i>	27
2.2.10. Sistema de controle	27
2.3. Arranjos Submarinos	27
2.4. Interligação de dutos e umbilicais	29
2.5. Programação de Navios	32
2.5.1. O Problema de Programação de PLSVs	33
2.6. Programação de Máquinas Paralelas	36
2.7. Considerações	36

3. Metodologia	38
3.1. Tipo de pesquisa	38
3.2. Etapas da pesquisa	39
3.3. Materiais e métodos	40
3.4. Limitações da pesquisa	41
4. Detalhamento e Modelagem do Problema	42
4.1. Procedimento de criação de blocos	46
4.1.1. Criação de blocos com atividades únicas	48
4.1.2. Criação de novos blocos adicionando atividades aos existentes	49
4.1.3. Criação de blocos de paradas para manutenção do PLSV	51
4.1.4. Identificação de subgrupos dos blocos	51
4.2. Formulação Matemática	51
4.3. Exemplo de aplicação dos modelos	57
5. Aplicações e Resultados	62
5.1. Características da base	62
5.2. Aplicação dos Modelos de Otimização	65
5.3. Análise de sensibilidade do modelo	75
5.3.1. Cenário 1	75
5.3.2. Cenário 2	77
5.3.3. Cenário 3	79
6. Conclusão	82
6.1. Sugestões para trabalhos futuros	83
Referências bibliográficas	85
APÊNDICE I – Dados do exemplo de aplicação dos modelos	88

Lista de Figuras

Figura 1 - Sistema submarino de produção.	21
Figura 2 - <i>Manifold</i> Submarino	23
Figura 3 - Tubos flexíveis armazenados em bobinas	25
Figura 4 - Tubos flexíveis armazenados em cestos	25
Figura 5 - Fatores que influenciam nas decisões de arranjo submarino	28
Figura 6 - Navio PLSV	30
Figura 7 - Modelo para resolução de problemas de PO	39
Figura 8 - Composição básica de um bloco de atividades	46
Figura 9 - Bloco com IRP e FRP de 2 poços	47
Figura 10 - Identificação de IB e FB para blocos com atividades únicas	48
Figura 11 - Identificação do tempo de Setup	49
Figura 12 - Verificação da possibilidade de criação do bloco	49
Figura 13 - Criação de blocos com múltiplas atividades	50
Figura 14 - Identificação de IB e FB para blocos com 2 atividades	50
Figura 15 - Estratégias de resolução dos modelos	53
Figura 16 - Alocação do problema simplificado utilizando Navio Fictício	58
Figura 17 - Alocação do problema simplificado permitindo atrasos	60
Figura 18 - Disponibilidade de PLSVs ao longo do horizonte	63
Figura 19 - Atividades com janela disponível a cada período	64
Figura 20 - Concentração de blocos ao longo do horizonte	65
Figura 21 - Produção acumulada da solução manual	66
Figura 22 - Evolução da solução pela Estratégia 1	67
Figura 23 - Evolução da solução pela Estratégia 2	68
Figura 24 - Blocos por Projeto: evolução da solução pela Estratégia 1	69
Figura 25 - Blocos por Projeto: evolução da solução pela Estratégia 2	70
Figura 26 - Comparação de produção acumulada (Modelo x Manual)	71
Figura 27 - Ocupação dos navios PLSVs ao longo do horizonte	71
Figura 28 - Cronograma gerado a partir da solução do modelo	73
Figura 29 - Exemplo de Poço com atividades em paralelo	74
Figura 30 - Cenário 1 - Evolução da solução pela Estratégia 1	76

Figura 31 - Cenário 1 - Evolução da solução pela Estratégia 2	76
Figura 32 - Cenário 2 - Evolução da solução pela Estratégia 1	78
Figura 33 - Cenário 2 - Evolução da solução pela Estratégia 2	79
Figura 34 - Cenário 3 - Evolução da solução	80
Figura 35 - Exemplo de construção de bloco	93

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Exemplo: Resultados da Estratégia 1	59
Tabela 2 - Exemplo: Resultados da Estratégia 2	61
Tabela 3 - Resultados do Cenário 1	77
Tabela 4 - Resultados do Cenário 2	79
Tabela 5 - Resultados do Cenário 3	81
Tabela 6 - Dados de entrada relacionados às atividades	88
Tabela 7 - Dados de entrada relacionados aos Navios PLSVs	88
Tabela 8 - Potencial dos Poços	89
Tabela 9 - Navios aptos à realização das atividades	89
Tabela 10 - Blocos criados e seus parâmetros	90
Tabela 11 - IRP e FRP dos poços nos blocos criados	91

1 Introdução

Nos últimos anos, o Brasil tornou públicas várias descobertas de petróleo localizadas principalmente em águas profundas, na região conhecida como “camada do Pré-sal”, com reservas que se estendem do litoral do Espírito Santo até Santa Catarina.

Diversas organizações e pesquisadores tentaram quantificar o volume de óleo possível de ser recuperado nessa região, fazendo projeções que chegam próximo a 100 bilhões de barris (Moreira, Pacca e Parente, 2014). Estudos subsequentes estão a confirmar o grande potencial das reservas, e as projeções indicam que o Brasil pode estar entre os países com as maiores reservas do mundo em um futuro próximo (EIA, 2014; Rodrigues e Sauer, 2015).

O país, que até 2006 não era autossuficiente em petróleo, vê a possibilidade de se tornar um grande ator mundial na produção desta *commodity*. Tais condições, se confirmadas, permitirão ao país ser um exportador líquido de petróleo e derivados, durante três ou quatro décadas, resultando também em um grande aumento das receitas públicas (Moreira, Pacca e Parente, 2014; Magalhães e Domingues, 2014).

Por se tratar de regiões de águas ultra profundas, a exploração e produção de petróleo do pré-sal ocorre em condições complexas de instalação de equipamentos no leito oceânico e a longas distâncias da costa marítima. Estes fatores intensificam as dificuldades no desenvolvimento tecnológico de equipamentos e na realização de atividades petrolíferas (Morais, 2013).

Para que a exploração e a produção de um poço ocorram, são necessárias diversas etapas de preparação, que compreendem desde as análises de possíveis regiões de acumulação de petróleo até a efetiva perfuração do poço, preparação para extração de óleo e instalação de equipamentos. Uma das etapas críticas da construção de poços submarinos é a interligação dos poços à Unidade Estacionária de Produção (UEP). Esta é a última atividade que antecede o início da operação de produção de um poço (Alves, 2012).

A interligação é realizada por embarcações especialmente equipadas para lançar e conectar diversos equipamentos no leito oceânico, através de dutos e umbilicais (Lima, 2007). Essas embarcações são denominadas PLSVs (*Pipe Laying Support Vessels*), e se caracterizam por serem recursos de alto custo (Barboza, 2015). A programação destas atividades de interligação em uma frota disponível de embarcações do tipo PLSV se caracteriza como objeto de estudo desta dissertação.

1.1

Justificativa

Uma empresa de petróleo que atua também na logística de preparação dos poços para produção tem o problema de programar a realização de diversas atividades de interligação dos poços sob sua responsabilidade. Como essas atividades são realizadas por navios PLSV, cujo alto custo de operação se reflete em suas taxas diárias de afretamento, em geral são disponibilizadas poucas embarcações para a realização das atividades necessárias. Dessa forma, a utilização destes navios deve ser programada da maneira mais eficiente possível, de modo a reduzir os custos de operação.

Por se tratar da última etapa na construção de poços, com impacto direto no atraso ou adiantamento do início da operação dos mesmos, as atividades de interligação programadas de maneira eficiente nas embarcações disponíveis também permitem a conclusão dos projetos de poços submarinos o mais cedo possível, acarretando maiores períodos produtivos dentro do horizonte de planejamento e, conseqüentemente, maior retorno financeiro pelo aumento da produção e antecipação das receitas.

1.2

Objetivo geral

Este estudo tem o objetivo de desenvolver um modelo de programação matemática capaz de programar as atividades de interligação de poços submarinos, alocando e sequenciando-as em embarcações do tipo PLSV, de forma a maximizar a produção de óleo acumulada durante o horizonte de planejamento.

1.3

Objetivos específicos

- Mapear o problema e o processo de planejamento atualmente utilizado na empresa de estudo;
- Obter, tratar e analisar dados junto à companhia, de maneira a adquirir maior conhecimento dos processos, restrições operacionais, padrões de planejamento e casos de exceção;
- Definir as premissas e o escopo do problema a ser tratado no modelo matemático;
- Elaborar modelo de programação matemática capaz de realizar a programação seguindo as premissas adotadas;
- Aplicar o modelo com os dados da empresa estudada.

1.4

Delimitação do estudo e contribuições esperadas

O estudo foi desenvolvido na Petrobras, sociedade anônima de capital aberto, brasileira, que atua no ramo de energia em diversos setores, estando dentre eles a área objeto deste estudo: a exploração e produção de petróleo.

A Petrobras possui o desafio de programar, anualmente, a entrada de produção de poços submarinos, que representam um acréscimo de produção da ordem de dezenas de milhões de barris de petróleo. Este trabalho se desenvolve no sentido de buscar solução para realizar esta programação de maneira ótima e gerada automaticamente.

O modelo desenvolvido foi testado em um cenário proposto pela área de planejamento de produção da Petrobras, cujas interligações representam parte da demanda do ano de 2016.

A modelagem aqui apresentada contribui para o desenvolvimento do problema, ao estender as abordagens presentes na literatura, pois permite a combinação de atividades de poços distintos em uma mesma viagem, o que torna a formulação e resolução do problema mais desafiadoras. Desta forma, como resultados desta nova abordagem, apresentam-se um procedimento para criação de blocos de atividades, responsável por um pré-processamento dos dados anterior à execução do modelo, e novas restrições para o problema, que o tornam mais aderente à realidade.

Como resultado, têm-se um modelo de programação linear inteira mista capaz de retornar cronogramas de execução de atividades de maneira ótima, dada uma frota disponível.

1.5

Estrutura da dissertação

O presente trabalho está dividido em 6 capítulos, incluindo esse capítulo introdutório. No Capítulo 2 é feita uma revisão do contexto que envolve o problema, apresentando conceitos de exploração e produção de petróleo e de programação de navios. No Capítulo 3 são apresentados a classificação, os métodos e as limitações da pesquisa. No Capítulo 4 o problema é detalhado e são apresentadas as estratégias utilizadas na construção da modelagem matemática, bem como a evolução da formulação do modelo em si. No Capítulo 5 são apresentados os testes realizados e discute-se os resultados obtidos pelo modelo. No Capítulo 6, por fim, são apresentadas as conclusões do estudo.

2

Referencial Teórico

Nesse capítulo busca-se contextualizar as atividades de exploração e produção do petróleo e de programação de navios, bem como apresentar uma breve descrição dos processos logísticos envolvidos, com foco na instalação de dutos submarinos, nos quais se insere o problema de programação de PLSVs.

2.1

Exploração e Produção do Petróleo

O petróleo é um produto formado por combinações de moléculas de carbono e hidrogênio, os hidrocarbonetos, fruto da decomposição de matéria orgânica ao longo de milhões de anos. Acumula-se em bacias sedimentares, ocupando poros rochosos em regiões sujeitas a altíssimas pressões, formando as jazidas onde serão encontrados gás natural, petróleo e água (Thomas, 2001).

O desenvolvimento da indústria petrolífera, que teve início com a substituição do óleo de baleia pela querosene como combustível para a iluminação pública no século XIX, foi impulsionado a partir do momento em que o petróleo e seus derivados substituíram outros combustíveis utilizados para o transporte motorizado. Junto a este fator, Devold (2013) afirma que o desenvolvimento da indústria metalúrgica criou condições de transporte do gás natural por longas distâncias de maneira economicamente viável, o que permitiu aumentar sua exploração e utilização também na geração de energia elétrica. Desta forma, a indústria petrolífera fez parte do crescimento e desenvolvimento das primeiras e maiores empresas multinacionais e tornou-se a principal matriz energética da economia moderna.

Além disso, a ampliação da indústria petroquímica, com a criação de novos materiais sintéticos como borrachas e plásticos largamente utilizados nas mais diversas áreas da sociedade, bem como sua aplicação na indústria de fertilizantes, contribuíram para o maior aproveitamento do petróleo e para o contínuo crescimento da indústria (Devold, 2013).

O ciclo de vida das operações do petróleo inclui a exploração, produção, refino, marketing, transporte, distribuição e utilização pelo consumidor final. Tais operações dividem a indústria em dois grandes segmentos: *upstream*, que trata das atividades de exploração e produção; e *downstream*, responsável pelo refino e comercialização do petróleo e seus derivados (Khan e Islam, 2007). O foco desta seção está na contextualização das atividades da indústria *upstream*, na qual está inserido o problema de programação de PLSVs do qual trata esta dissertação.

2.1.1 Exploração

A fase de exploração, ou prospecção, consiste na análise de dados geológicos e geofísicos das bacias sedimentares com os objetivos de identificar e localizar possíveis áreas de acumulação de petróleo, bem como avaliar o volume de petróleo existente. Esses dados podem ser obtidos através de métodos geológicos, que se propõem a reconstituir as condições de formação e acumulação de hidrocarbonetos em uma região; métodos potenciais, que fazem a análise das estruturas geológicas a partir de medições de propriedades físicas das formações da região analisada; e métodos sísmicos, que fazem o levantamento a partir da reflexão e refração de ondas geradas artificialmente que se propagam no interior da Terra (Thomas, 2001).

O conhecimento geológico sobre as bacias sedimentares é base fundamental para a expansão contínua da atividade exploratória da indústria petrolífera. Por isso, a aquisição de dados através de pesquisas não se limita a ser feita somente pelos concessionários, mas também é realizada por empresas especializadas na aquisição de dados, instituições acadêmicas e pela própria Agência Nacional do Petróleo (ANP), que tem interesse na ampliação do potencial petrolífero, de maneira a fortalecer a indústria do petróleo e garantir receitas à União (ANP, 2015).

Morais (2013) divide a atividade exploratória brasileira ao longo do tempo em cinco fases, de acordo com os objetivos de cada uma delas:

- Explorações pioneiras particulares (1864-1918): buscavam petróleo para a produção de óleos para iluminação;
- Explorações pioneiras pelo Estado (1919-1939): buscavam jazidas para comprovar a existência de petróleo no país;
- Busca do petróleo para reduzir a dependência de importações (1940-1973): tinha o objetivo de reduzir a alta dependência brasileira do petróleo

importado. Nessa fase, foi criada a Petrobras e os levantamentos passam a ser feitos com maior planejamento técnico. Nos últimos anos, decide-se redirecionar as explorações para o mar;

- Explorações para obtenção de autossuficiência (1974-2006): ciclo de importantes descobertas de reservas de petróleo no mar, que levaram ao firme crescimento das reservas brasileiras, atingindo a meta que era perseguida, com maior ou menor ênfase, desde a fundação da Petrobras.
- Era do Pré-sal (2006 em diante): as explorações buscam o aumento das reservas brasileiras de petróleo, objetivando garantir o abastecimento do mercado interno pelas décadas a frente.

Dados os altos custos, na ordem de centenas de milhões de reais, que a perfuração de um poço pode atingir, é necessário que as companhias de petróleo dediquem muito tempo a análises e geração de modelos a partir de bons dados de exploração, partindo para a perfuração em si somente quando os modelos apresentarem boas indicações de rocha geradora e da probabilidade de encontrar petróleo ou gás (Devold, 2013).

2.1.2 Perfuração

De acordo com Thomas (2001), a perfuração de um poço se caracteriza pelo conjunto de atividades e operações necessárias para atravessar as formações geológicas da superfície da crosta terrestre. De maneira resumida, o processo de perfuração pode ser caracterizado pela ação de uma sonda, que atua sobre as rochas com uma coluna de perfuração, que consiste basicamente de comandos (tubos de paredes espessas) e tubos de perfuração (tubos de paredes finas), na qual existe uma broca que avança sobre a formação geológica pela ação da rotação e peso aplicados. Os fragmentos de rocha são removidos continuamente através de um fluido de perfuração (ou lama), que é injetado por bombas na coluna de perfuração e retorna à superfície pelo espaço formado entre as paredes do poço e a coluna. Ao atingir determinada profundidade, a coluna de perfuração é retirada do poço para que seja inserido uma coluna de revestimento de aço e para que ocorra a cimentação do espaço entre as colunas de revestimento e as paredes do poço, de maneira a isolar as rochas atravessadas e a permitir o avanço da perfuração com segurança. Este processo é repetido com brocas de menor diâmetro até que se alcance a

profundidade objetivada, caracterizando as diferentes fases da perfuração a cada diâmetro de broca utilizada.

A ANP (2015) caracteriza os poços perfurados de acordo com os seus objetivos, classificando-os em poços exploratórios, que visam a descoberta de novos campos ou novas jazidas de petróleo; poços exploratórios, que tem a finalidade de extrair o óleo da rocha reservatório; e poços especiais, que visam permitir uma operação que não se enquadra nas situações anteriores, como a produção de água, por exemplo.

O escopo deste trabalho se limita à atuação dos PLSVs na interligação dos poços exploratórios, visando a melhor programação viável no sentido de extração de óleo da rocha reservatório. De acordo com a ANP (2015) os poços exploratórios podem ser de dois tipos:

- De produção: poço que visa drenar uma ou mais jazidas de um campo;
- De injeção: destinado à injeção de fluidos visando melhorar a recuperação de petróleo ou de gás natural ou, ainda, manter a energia do reservatório.

Ao finalizar a perfuração de um poço, é necessário deixá-lo em condições de operar, de forma segura e econômica, durante toda a sua vida produtiva. Para isso é realizada a completação dos poços, que é o conjunto de operações destinadas a equipar o poço para iniciar a produção, ou ainda a injeção de fluidos nos reservatórios. Deve-se buscar otimizar a vazão de produção (ou injeção) e tornar a completação o mais permanente possível, minimizando as necessidades de intervenções futuras para manutenção (Thomas, 2001).

É neste momento, ao fim da perfuração, que o problema de programação de PLSVs se insere. Os poços ficam prontos para serem interligados às plataformas, sendo as interligações, realizadas pelos PLSVs, as últimas atividades críticas de preparação para que se inicie o processo de produção.

2.1.3 Produção

De acordo com Thomas (2001), o padrão de comportamento esperado de um reservatório de óleo é que ele produza óleo, gás natural e água.

O óleo é a parte dos hidrocarbonetos que se mantém no estado líquido quando a mistura é levada à superfície, formado pelo óleo bruto e pelo líquido obtido a partir do gás natural (LGN). O gás produzido é o resultado da combinação de três

partes: do gás livre, proveniente dos hidrocarbonetos que, nas condições do reservatório, já se encontram no estado gasoso; do gás de solução do óleo, que se encontra dissolvida no óleo, quando nas condições de reservatório, porém se desprende quando a mistura é levada à superfície; e o gás de solução da água que, nas condições de reservatório, se encontra dissolvido na água. Já a água produzida pode ser resultado de acumulações em aquíferos ou devido à injeção em projetos que visam aumentar a recuperação de óleo.

Atualmente, óleo e gás são produzidos em quase todas as partes do mundo, a partir de poços de pequeno ou grande porte localizados em terra (produção *onshore*) ou em alto mar (produção *offshore*).

Segundo Devold (2013), a produção *onshore* é de menor custo e pode ser economicamente viável a partir de uma produção de poucas dúzias de barris de petróleo por dia. Nos casos de reservatórios menores, o óleo é simplesmente coletado em um tanque de retenção e recolhido periodicamente por caminhões tanque ou vagões para que possam ser processados em uma refinaria. Já nos poços de alta capacidade, que produzem milhares de barris por dia, o óleo é enviado a partir da planta por oleodutos ou petroleiros.

Já a produção *offshore* requer a utilização de toda uma gama de estruturas e recursos críticos, de alto custo, com especificidades que variam de acordo com as condições dos reservatórios (tamanho e profundidade, por exemplo), formando verdadeiros sistemas de estruturas submarinas, que serão mais detalhados na seção 2.2.

De acordo com dados da ANP (2015), o Brasil produziu o total de 822,9 milhões de barris de petróleo no ano de 2014, colocando o país na 13ª posição no ranking mundial de produtores. Essa quantidade foi proveniente de um total de 9.104 poços, sendo 8.263 localizados em terra e 841 em mar.

Apesar dos poços em mar representarem um percentual pequeno em relação ao número total de poços, a produção desses correspondem a 92,5% do total de petróleo produzido, destacando o sucesso da estratégia de direcionar as explorações para o mar, adotada desde o final da década de 1970. Esta predominância tende a aumentar cada vez mais, estando fortemente atrelada ao crescimento da produção no Pré-sal.

2.2 Sistemas Submarinos

O sistema submarino é o meio que viabiliza o escoamento do fluido produzido até a unidade estacionária de produção. Compreende tudo o que está entre o poço e a plataforma e, em função das características do ambiente em que está instalado e das pressões, temperaturas e propriedades dos fluidos produzidos, é composto por equipamentos de alto custo e materiais nobres, o que resulta em uma parcela significativa do investimento a ser feito na implantação de um campo (Labanca, 2005). Uma visão geral de um sistema submarino pode ser observada na Figura 1.



Figura 1 - Sistema submarino de produção.
Fonte - FMC Technologies (2016)

Entre as vantagens da produção por meio de sistemas submarinos estão a possibilidade de a perfuração e a completação dos poços serem realizadas antes mesmo da instalação da plataforma, além de ser possível conectar poços distantes à unidade de processo, que pode ser uma unidade flutuante, uma plataforma fixa de um campo próximo ou até mesmo uma instalação de processo em terra (Ferreira, 2006).

De acordo com Labanca (2005), Lima (2007) e Bai e Bai (2010), um sistema submarino é formado por componentes, equipamentos e subsistemas tais como cabeça de poço, árvore de natal molhada, *manifolds*, dutos rígidos e flexíveis, estruturas de fim de dutos, umbilicais, sistema de conexão vertical, jumpers, e sistema de controle, que serão apresentados, conforme definição dos autores, nos tópicos a seguir.

2.2.1

Cabeça de poço

De acordo com Bai e Bai (2010), cabeça de poço é o termo utilizado para descrever o componente instalado na superfície de um poço de petróleo, responsável pela vedação das colunas de revestimento. Se configura parte importante do sistema de segurança de um poço por servir de ancoragem para as colunas de revestimento, garantindo maior estabilidade, de maneira a evitar sobrecarga na sonda.

2.2.2

Árvore de Natal Molhada (ANM)

A ANM é um conjunto de válvulas, tubos e acessórios instalados na superfície de um poço perfurado que permitem controlar a produção, além da injeção de água e gás neste poço (Lima, 2007).

O acesso ao poço é permitido através da coluna de produção e do espaço anular. Os diferentes ajustes de válvulas garantem uma grande flexibilidade de alinhamentos, permitindo também despressurizações e passagem de materiais para limpeza e manutenção, em função dos objetivos e necessidades operacionais.

Uma ANM de produção é interligada à plataforma ou a outro equipamento submarino através de uma linha de produção e uma linha de serviço. Além destas, existe a conexão de um umbilical eletro-hidráulico para o controle de válvulas e leitura dos sinais dos sensores. Já em uma ANM de injeção, apesar de ser utilizado o mesmo modelo de árvore, não há a necessidade de uma linha de serviço (Lima, 2007).

2.2.3

Manifolds

Consiste em um arranjo de canos e válvulas projetadas para combinar, distribuir, controlar e monitorar o fluxo de fluidos pelo sistema submarino. São equipamentos utilizados para simplificar o sistema submarino, minimizando a utilização de dutos e otimizando o fluxo pelo sistema (Bai e Bai, 2010).

Dentre as vantagens de sua utilização estão a viabilização de flexibilidade operacional, pois permite a interligação de vários poços a uma plataforma; possível redução de custos; redução do comprimento de dutos e redução do número de dutos conectados à plataforma, o que pode ser importante seja por indisponibilidade de

espaço, seja por incapacidade da plataforma suportar o peso de muitos dutos (Labanca, 2005; Lima, 2007).

Como desvantagem, tem-se que o equipamento pode se configurar como um gargalo de produção, e uma possível indisponibilidade pode trazer impactos muito grandes (Lima, 2007).

Um exemplo de estrutura de um *manifold* submarino pode ser observado na Figura 2.

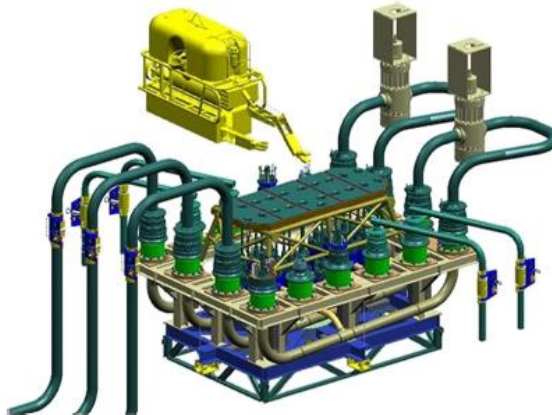


Figura 2 - *Manifold* Submarino
Fonte: Bai e Bai (2010)

2.2.4 Dutos rígidos

De acordo com Lima (2007), são dutos feitos de aço, com paredes espessas feitas de aço carbono, feita para suportar as altas cargas de tração e pressão interna e externa. Pode ser usado tanto no trecho estático (*flowline*) quanto no trecho dinâmico (*riser*), quando fica conectado à plataforma, sujeito à carregamentos durante toda a sua vida útil.

Apesar de possuírem menor flexibilidade quanto ao traçado em relação aos dutos flexíveis, os dutos rígidos apresentam menor custo de fabricação e são capazes de resistir à altas pressões, tornando sua utilização especialmente interessante em águas profundas e ultraprofundas.

2.2.5 Dutos flexíveis

Os dutos flexíveis dividem com os dutos rígidos a responsabilidade de escoar o fluido produzido. Sua estrutura é composta por várias camadas, cada qual com a sua função específica, projetadas para suportar a pressão interna e externa do

processo, bem como todas as cargas das fases de fabricação, transporte, instalação e operação (Labanca, 2005).

Sua estrutura pode variar de acordo com o projeto ou a profundidade em que será instalado. Os projetos de dutos flexíveis se diferenciam principalmente em três estruturas típicas, cada qual mais resistente a um determinado tipo de esforço de acordo com a profundidade a que serão submetidos. Lima (2007) descreve as três estruturas típicas da forma a seguir:

O trecho *top riser*, que é instalado no topo, é o que está submetido às menores trações. De acordo com o fluido a ser transportado, o máximo diferencial de pressão interna em relação à externa pode estar no topo ou no fundo deste trecho, onde soma-se o peso da coluna do fluido à pressão interna. Para fins de projeto, deve-se considerar que o duto deve resistir aos máximos carregamentos, sem considerar a pressão interna do fluido transportado, já que durante a operação poderá haver momentos em que o duto estará vazio.

O trecho *bottom riser*, localizado no fundo, deve suportar a máxima pressão radial externa, além de possíveis compressões axiais geradas por movimentos da plataforma. As principais diferenças em relação aos trechos de topo estão na configuração dos ângulos das armaduras de tração e na espessura das camadas. De acordo com características dos projetos pode haver a inserção de camadas extras.

No trecho *flowline* estático, a principal diferença é a inserção de uma camada extra de isolamento térmico. A principal carga que este trecho recebe é durante o seu lançamento.

Uma das vantagens da utilização dos tubos flexíveis é a possibilidade da produção de longos trechos de linha ser feita em terra. Sua configuração permite que o armazenamento e o transporte sejam feitos em cestos, localizados nos porões dos navios e com grande capacidade de armazenamento, ou em bobinas no convés principal, podendo ficar na posição vertical ou horizontal (Cortat e Vieira, 2006). O armazenamento das linhas flexíveis pode ser visto na Figura 3 e na Figura 4.

Os tubos flexíveis são um dos principais elementos do sistema submarino no contexto do problema estudado. São eles que, assim como os umbilicais, são transportados, lançados e interligados pelas embarcações PLSV nos poços submarinos e demais equipamentos, preparando o sistema para o início da produção de óleo.



Figura 3 - Tubos flexíveis armazenados em bobinas
Fonte – Petrobras (2014)



Figura 4 - Tubos flexíveis armazenados em cestos
Fonte - Cortat e Vieira (2006)

2.2.6 Estruturas de fim de dutos

As estruturas de fim de dutos são responsáveis por fazer a interface de diferentes dutos ou equipamentos.

O PLET (*Pipeline End Termination*) viabiliza a interligação de um duto rígido a um duto flexível ou outro equipamento, através do módulo de conexão vertical. Esse conector permite a recuperação das linhas, de maneira a garantir a manutenibilidade do sistema (Labanca, 2005).

O PLEM (*Pipeline End Manifold*) é um pequeno coletor, ou distribuidor, que tem a função de permitir o compartilhamento de dutos, sem possuir flexibilidade

operacional. É muito utilizado para conectar dois ou mais gasodutos a um gasoduto principal (Labanca, 2005).

2.2.7 Umbilicais

Umbilicais são equipamentos fundamentais para o controle dos poços submarinos, servindo como meio de transporte para a potência hidráulica responsável por acionar válvulas dos equipamentos submarinos, para a potência elétrica responsável pela leitura e coleta dos dados dos equipamentos e para os produtos químicos a serem injetados nos poços e dutos a fim de otimizar o escoamento (Bai e Bai, 2010).

De acordo com Labanca (2005), o projeto do umbilical apresenta diferentes configurações de acordo com a sua aplicação, sendo normalmente composto por:

- Mangueiras: responsáveis pelo transporte da potência hidráulica da UEP para o poço ou *manifold* e pela injeção de produtos químicos. São produzidas com materiais de grande resistência, para suportar os diferenciais de pressão, de maneira a evitar o colapso quando estiverem vazias ou em operações de injeção de produtos químicos menos densos que a água;
- Cabos elétricos: responsáveis por conduzir os sinais elétricos para a aquisição dos dados dos poços e equipamentos pelo sistema de controle;
- Armadura metálica: responsável por proteger as mangueiras e os cabos elétricos das cargas em operações de transporte, instalação e operação;
- Capa polimérica: responsável pela proteção contra a abrasão e raios ultravioleta.

2.2.8 Sistema de conexão vertical

O sistema de conexão vertical é o que viabiliza a conexão dos dutos e umbilicais aos equipamentos sem o auxílio de um mergulhador, utilizando como principal fonte de energia a força da gravidade. A instalação pode ser feita em primeira extremidade, quando se conecta o módulo de conexão vertical para depois lançar o duto, ou em segunda extremidade, quando o duto é lançado e o módulo de conexão vertical é conectado em seguida (Labanca, 2005).

2.2.9 **Jumpers**

Jumper é um pequeno tubo conector utilizado para transportar fluidos de produção entre dois componentes do sistema submarino, como uma ANM e um *Manifold* ou entre dois *Manifolds* (Bai e Bai, 2010). Além de transportar fluidos de produção, também pode ser utilizado para injeção de água nos poços. Assim como os dutos, podem ser rígidos ou flexíveis, com suas características sendo determinadas de acordo com os objetivos de sua utilização e pela distância entre os componentes que serão ligados.

2.2.10 **Sistema de controle**

Sistema que tem a função de controlar a produção dos poços com base na abertura e fechamento das válvulas instaladas na ANM e demais equipamentos. O acionamento das válvulas submarinas é feito através das mangueiras do umbilical, que transmitem a potência hidráulica gerada na plataforma (Labanca, 2005). A aquisição e controle de dados submarinos se dá através de transmissores de pressão e temperatura e medidores de vazão instalados em pontos pré-estabelecidos para acompanhamento do reservatório.

2.3 **Arranjos Submarinos**

A grande quantidade de equipamentos e componentes de um sistema submarino permite a sua organização de diversas maneiras. A escolha de um arranjo submarino traz o desafio de determinar, dentre vários arranjos subjetivos, qual irá apresentar o melhor retorno financeiro, dado que atenda às necessidades de escoamento, as condições de instalação, a continuidade operacional durante a vida útil e aos critérios de segurança, tanto do meio ambiente quanto das pessoas envolvidas (Labanca, 2005).

Devido às características de cada campo, bem como as características ambientais e de produção a ele associadas, os projetos dos equipamentos e a arquitetura final do arranjo submarino tendem a ser exclusivos para cada aplicação. Moreno-Trejo, Kumar e Markeset (2012) discutem uma série de fatores que influenciam na seleção de equipamentos e nas decisões relacionadas aos arranjos submarinos. Tais fatores são apresentados na Figura 5.

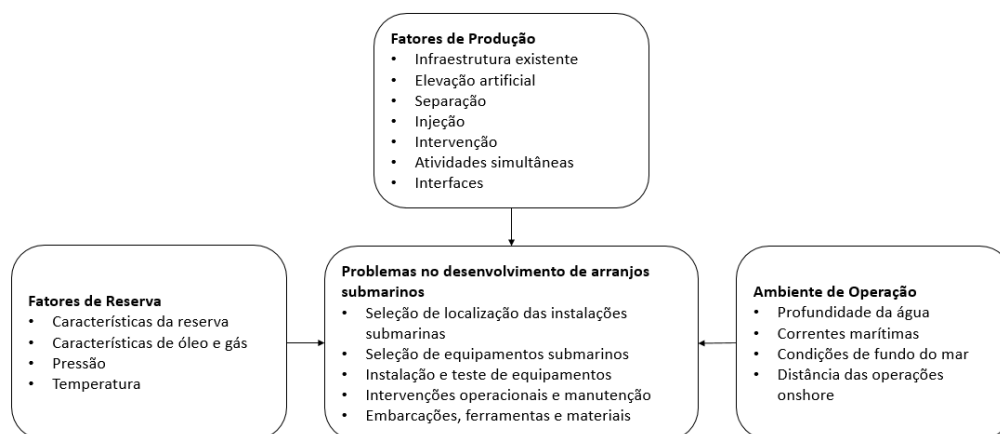


Figura 5 - Fatores que influenciam nas decisões de arranjo submarino

Fonte: Adaptado de Moreno-Trejo, Kumar e Markeset (2012)

De acordo com as características dos arranjos submarinos, Labanca (2005) os distribui em três grupos, conforme descritos a seguir:

- Arranjo com poços satélites: a interligação dos poços é feita direto à UEP. Este arranjo apresenta maior eficiência operacional e é, também, o de maior investimento, em função da grande quantidade de dutos e umbilicais para atender a cada poço individualmente;
- Arranjo com *manifold*: os poços são direcionados para um coletor, ou distribuidor, e então o fluido produzido é escoado para a UEP ou injetado nos poços. Este arranjo é o mais utilizado em águas profundas, pois reduz o número de *risers* chegando à UEP e desta forma, reduz o peso/espaço na unidade. Tem a desvantagem, quando comparado ao arranjo com poços satélites, de ter menor eficiência operacional, que pode ser minimizada dependendo da flexibilidade operacional e da filosofia de manutenção adotada no projeto;
- Arranjo com anel coletor: um anel coletor sai da plataforma e passa por todos os poços, até retornar à plataforma. Este método traz consigo um grande número de conexões dependentes, o que reduz a confiabilidade do projeto.

Na atuação em campos do pré-sal, foco da empresa no problema abordado neste trabalho, a companhia opta pela construção de arranjos com utilização de *manifolds*. Isto implica na necessidade de instalação do equipamento por um navio específico ou por PLSV apto à execução deste tipo de atividade. A empresa conta com um PLSV apto a realizar a instalação deste equipamento, o que torna esta

atividade parte do conjunto a ser programado na frota da companhia para a resolução do problema.

2.4

Interligação de dutos e umbilicais

Para que toda a construção do arranjo submarino seja realizada, além da aquisição dos equipamentos que o compõem, é necessário dispor de embarcações especiais que permitam o lançamento e conectar os diversos equipamentos dentro do mar, o que é feito através dos dutos e umbilicais.

A maior parte das estruturas são construídas em terra e transportada por navios até a locação da qual fará parte do arranjo. A instalação pode ocorrer em águas rasas, profundas ou ultraprofundas, sujeita às condições meteorológicas e marinhas. No fundo do mar, os equipamentos são instalados utilizando robôs que auxiliam no posicionamento e integridade desses equipamentos, os *Remotely Operated Vehicles* – ROV (Serpa, 2012).

O lançamento e a interligação de dutos e umbilicais são realizados por embarcações do tipo PLSV, especialmente equipadas para este fim. Tais embarcações transportam os dutos a serem instalados em bobinas ou cestos, para depois serem lançados na locação a que se destinam (Lima, 2007).

O Navio PLSV é caracterizado por ser monocasco, ter alta potência instalada para suprir o aporte energético solicitado pela quantidade de equipamentos existentes a bordo, área livre de convés para manuseio de linhas e outras operações de bordo ou transporte de equipamentos submarinos, sendo assim, um recurso de alto custo e complexa composição de equipamentos (Barboza, 2015). Um exemplo de navio PLSV pode ser visto na Figura 6.

Bai e Bai (2010) categorizam os PLSVs de acordo com o seu método de lançamento de dutos, que são utilizados em diferentes situações, de acordo com as características dos dutos e do local, tais como profundidade da água e clima. Os três tipos mais comuns são os *S-lay*, *J-lay* e *Reel-lay*.

- Método *S-lay*: neste método é possível que a linha seja construída ao longo da embarcação, na posição horizontal. É utilizado um suporte *Stinger* durante o lançamento para que as tensões no duto, provenientes da ampliação do raio de curvatura no momento da instalação, sejam reduzidas. O nome do método é devido à forma que a linha toma durante

o processo, formando duas regiões de flexões acentuadas, uma nas proximidades da rampa, denominada de *overband*, e outra nas proximidades do fundo do mar, conhecida por *sagband*. Devido aos grandes esforços causados na embarcação e nos próprios dutos, é recomendado para utilização em profundidades rasas.

- Método *J-lay*: neste método, o lançamento dos dutos ocorre na posição vertical, extinguindo a flexão de *overband*. É mais indicada para águas profundas, por reduzir as tensões na linha devido a maior curvatura na região de *sagband*, e é menos suscetível às condições ambientais. A velocidade de lançamento, neste caso, é inferior ao método *S-lay* e sua produtividade também é menor, já que a produção do tubo é dificultada, por estar numa posição vertical na embarcação.
- Método *Reel-lay*: este método se baseia na construção do duto em terra, com o armazenamento feito em carretéis situados no convés da embarcação. Apresenta como restrição a limitação de armazenamento somente para carretéis de grandes diâmetros. É o método mais estável e com redução de custos, visto que não são necessárias estações de trabalho de produção dos tubos dentro da embarcação, além de possuir velocidade de operação em torno de dez vezes maior do que os outros métodos citados. De acordo com as características do navio, pode ser utilizado em conjunto com os métodos *S-lay* e *J-lay*.



Figura 6 - Navio PLSV
Fonte – Cortat e Vieira (2006)

Outro fator qualificador dos navios PLSVs é o Sistema utilizado para a operação. De acordo com Barboza (2015), nesse tipo de embarcação há dois tipos de sistemas:

- Sistema por guindastes: configuração na qual o navio possui uma capacidade de levantar através de guindastes, o que define sua capacidade de lançamento. Para atuar com esse sistema, é indispensável que o navio tenha uma grande área de convés livre para trabalho, movimentação e arranjo de dutos.
- Sistema por torre ou rampa de lançamento: configuração na qual o lançamento é realizado através de uma torre, composta por um conjunto de equipamentos responsáveis pela sustentação, união e direcionamento dos dutos, gerando assim, as condições ideais para o lançamento de acordo com o tipo do duto.

Barboza (2015) afirma ainda que a versatilidade do sistema por torre é combinada com o local de lançamento que, numa embarcação PLSV, pode ser feita na popa, em um dos bordos ou no *moonpool*, cavidade localizada na região central do casco do navio que comunica a torre com o mar. Devido ao tamanho dos equipamentos e o seu peso, o posicionamento da torre no navio influi diretamente na estabilidade da embarcação.

A localização da torre na popa é a configuração mais utilizada em conjunto com o método *Reel-lay*, obtendo uma distribuição de equipamentos em prol de um arranjo de convés que otimize a operação, porém é uma configuração que possui alta suscetibilidade a movimentos verticais durante a operação.

A instalação realizada com a torre localizada pelos bordos do navio gera uma complexibilidade de arranjo de equipamentos ao longo de toda a embarcação, além de provocar instabilidade, o que vem provocando o desuso desta configuração.

Por fim, têm-se a configuração mais utilizada atualmente, que é a utilização de *moonpool*. A utilização do *moonpool* confere à embarcação maior segurança na operação, maior eficiência do sistema de posicionamento e ainda auxilia na redução dos movimentos verticais da embarcação.

A empresa estudada possui contratos com navios PLSVs de diferentes configurações de método de lançamento e sistemas de operação. Tais configurações podem, juntamente a outros fatores como equipamentos instalados e tripulação,

influenciar na aptidão ou não para executar uma atividade específica, caracterizando a frota da empresa como heterogênea.

2.5 Programação de Navios

Os problemas de planejamento e operação de frotas marítimas foram classificados por Lawrence (1972) em três modos de operação: *liner*, *tramp* e industrial.

As operações do tipo *liner* são as que ocorrem através de linhas regulares, semelhantes às utilizadas em serviços de ônibus, em que o navio opera em rotas fechadas com paradas programadas em diversos portos ao longo da viagem, nos quais podem ser feitas operações de carga e descarga. São utilizadas, em geral, por empresas que não possuem demanda o suficiente para justificar o afretamento de um navio inteiro.

As operações do tipo *tramp* podem ser comparadas aos serviços de táxi. Nelas, os navios são enviados onde há demanda para carregamento que normalmente irá ocupar o navio em sua totalidade até que seja descarregado em um ou mais portos de destino. Muito utilizado para atendimento de demandas específicas de empresas ou grupos que operam grandes volumes de commodities.

Já as operações do tipo *industrial* são as que os donos das cargas detêm o controle sobre a frota de navios, sejam próprios ou contratados. Estas são utilizadas para atender suas demandas de insumos ou produtos acabados a um custo de serviço mínimo.

A diferenciação entre os tipos de operações de frota de navios não é bem definida ou mutualmente exclusiva. Uma embarcação pode mudar de regime de operação assim como o controlador de frota pode ter embarcações operando simultaneamente em diferentes regimes (Ronen, 1983).

O primeiro trabalho de revisão a respeito de roteirização e programação de navios foi publicado por Ronen (1983). A partir de então, o trabalho de pesquisa é refeito a cada década, identificando os trabalhos publicados e as tendências de pesquisa e desenvolvimento de novas técnicas na área, resultando na mais completa coleção de trabalhos sobre o tema e suas áreas relacionadas. Ronen (1983), Ronen (1993), Christiansen, Fagerholt e Ronen (2004) e Christiansen *et al.* (2013) reúnem os diferentes problemas de planejamento cobertos pela literatura, com foco no

dimensionamento e composição de frotas, roteirização e programação de navios. As publicações são apresentadas divididas de acordo com os níveis de planejamento estratégico, tático e operacional do problema abordado, bem como do tipo de frota (*liner, tramp e industrial*) a qual o problema pertence.

Christiansen *et al.* (2007) consideram que os problemas de planejamento de transportes marítimos recebem baixa atenção da literatura por serem menos estruturados que os problemas clássicos, devido à larga variedade de problemas e ambientes de operação; por terem baixa visibilidade em relação a outros meios de transporte; por apresentarem alta incerteza nas condições de operação, sendo afetado pelo tempo e problemas mecânicos, provocando reprogramação das atividades; e por ser uma indústria antiga, tradicional e fragmentada, conservadora em relação a novas ideias, dependendo do interesse das organizações para que sejam gerados modelos de estudo.

O problema de programação de navios é tratado para frotas que operam sob os modos *industrial* e *tramp*. Normalmente contempla decisões de médio prazo, se caracterizando como um problema de planejamento do nível tático. Em geral, é tratado com base em modelos de fluxos em rede, associando-se um custo ao deslocamento entre diferentes pontos de atendimento, focando na elaboração de rotas que permitam cumprir à demanda estipulada a um custo mínimo (Christiansen *et al.*, 2007).

2.5.1

O Problema de Programação de PLSVs

O problema de programação de PLSVs apresenta uma característica distinta do transporte marítimo, pois a localização entre os poços a serem atendidos pelas embarcações é relativamente próxima, resultando em um tempo de navegação consideravelmente menor que o tempo da duração das atividades a serem executadas. Dessa forma, o objetivo principal da programação não está na geração de rotas de custo mínimo, mas na determinação da sequência de atividades a serem executadas pelos PLSVs.

O problema a ser resolvido consiste, então, em alocar as tarefas a serem realizadas por cada embarcação, bem como determinar a sequência em que serão feitas, de forma que a produção seja antecipada tanto quanto for possível, impondo-

se que toda a demanda de tarefas seja atendida dentro do horizonte de planejamento estipulado.

Com esta direção, alguns autores já abordaram o problema de programação de PLSVs na literatura, de maneira simplificada, em diferentes trabalhos, cada qual com suas premissas e estratégias de solução.

Vernalha *et al.* (2008) propõem dois modelos com o objetivo de minimizar o custo associado à não realização das tarefas no instante mais cedo possível, o que provoca atrasos no início da produção. O primeiro modelo é orientado à determinação da sequência de atendimento das tarefas, tendo como decisões o instante de início de cada tarefa e a escolha de qual embarcação irá realizá-la. No segundo modelo, é utilizada uma estratégia de partição de conjuntos, em que diversos roteiros viáveis para cada embarcação são gerados previamente para alimentar o modelo, que decide quais roteiros cobrem todo o conjunto de tarefas a um mínimo custo.

Queiroz e Mendes (2012) tratam o problema considerando as embarcações heterogêneas, modelando-o como uma variação do problema de máquinas paralelas não-relacionadas e função objetivo com peso penalizando o atraso. Neste caso, uma matriz com a penalização de início de tarefa em cada período é dado de entrada do modelo, que decide em qual período cada tarefa iniciará. Como forma de resolução, os autores propõem a implementação de uma heurística GRASP.

Moura (2012) apresenta uma formulação similar à de Queiroz e Mendes (2012), utilizando a hipótese simplificadora de que todas as embarcações estão aptas a realizar quaisquer tarefas (frota homogênea). Como forma de resolução do problema, o autor propõe a utilização de técnicas de relaxação lagrangiana e heurística construtiva para gerar limites inferior e superior para o problema, e então utiliza uma heurística de busca local estruturada a partir de uma adaptação do método VNS – *Variable Neighborhood Search*.

2.6

Programação de Máquinas Paralelas

Como apresentado na seção anterior, as características do problema de programação de PLSVs permitem tratá-lo como uma variação do problema de programação de máquinas paralelas, onde cada navio representa uma máquina nas quais serão alocadas as atividades de interligação a serem executadas.

Ao tratar como um modelo de alocação de atividades, Kao e Lee (1996) propuseram um modelo matemático no qual consideram uma programação de navios como um problema de alocação em máquinas paralelas, assumindo cada doca como uma máquina que pode receber uma sequência de atividades de carga e descarga de navios a serem realizadas. Os autores afirmam que o modelo proposto pode ser aplicado a outros problemas nos quais atividades devem ser processadas em diferentes máquinas.

Quando se tratam de máquinas paralelas idênticas, em que cada atividade possui o mesmo tempo de execução independente de qual máquina ela seja alocada, e o tempo de preparação para a realização das atividades depende da sequência na qual elas serão executadas, estes modelos se equivalem a modelos de roteirização de veículos (Lam e Xing, 1997). Desta forma, permitem criar rotas indicando a sequência na qual as atividades serão realizadas.

Embora o problema de programação de PLSV tenha sido pouco abordado na literatura, foram destacados alguns trabalhos de programação de máquinas paralelas recentes dos quais podem-se extrair características similares às apresentadas pelo problema a ser tratado neste trabalho.

Su (2009) apresenta um problema de máquinas paralelas no qual a conclusão das atividades deve respeitar suas datas de compromisso e a elegibilidade das máquinas, ou seja, cada atividade só pode ser alocada a um conjunto de máquinas que estão aptas a realizá-la. O objetivo do trabalho era a antecipação das tarefas, minimizando o somatório dos tempos de término de todas as atividades.

Mellouli et al. (2009) abordam um problema em que, ao longo do horizonte de planejamento, existe um período de indisponibilidade de máquina devido a atividades de manutenção preventiva, tendo como objetivo a minimização do somatório dos tempos de término de todas as atividades.

Sabouni et al. (2010) apresentam um problema no qual o atraso das atividades é permitido e tratado com um objetivo bi-critério, no qual busca-se minimizar o somatório dos tempos de término das atividades e o maior atraso. O problema ainda apresenta *setup* para as atividades, que devem ser processadas em lotes, de forma que o término de cada atividade se dá apenas quando a batelada da qual ela faz parte é finalizada.

Gokhale e Mathirajan (2012) apresentam uma aplicação na qual o problema lida com elegibilidade das máquinas e tempo de *setup* dependente da sequência

programada. Além disso, as atividades possuem um peso e uma data de liberação de execução previamente estipulados. O problema é solucionado com o objetivo de minimizar o somatório do tempo de fluxo das atividades, de maneira ponderada de acordo com o seu peso.

Liao et al. (2012) apresentam um problema com consideração de *setup* por família de atividades, no qual as atividades são processadas em lotes. Nos casos em que o lote subsequente na programação for da mesma família de atividades, não é necessário a realização do *setup*. O objetivo é minimizar o somatório dos tempos de término de todas as atividades evitando a necessidade de realização de *setups*.

Bilyk et al. (2014) discutem um problema em que as atividades possuem data de liberação e data de compromisso, são realizadas em lotes e algumas das atividades apresentam relação de precedência. Como objetivo, foi utilizada a minimização do atraso total, ponderado de acordo com o peso de cada atividade.

Janiak et al. (2015) realizaram uma *survey* onde destacam vários trabalhos de programação que consideram janela de tempo para realização das atividades, com foco na data de compromisso, analisando em suas funções objetivos a antecipação e a penalização por atraso na realização das atividades.

2.7 Considerações

O problema de programação da logística de PLSVs na interligação de poços foi abordado poucas vezes na literatura até então, utilizando-se de hipóteses simplificadoras na resolução do problema.

Nos trabalhos supracitados as tarefas de interligação e instalação são usualmente compostas de um conjunto de atividades que devem ser feitas sequencialmente. A programação deste conjunto de atividades que compõem uma tarefa de interligação não faz parte do escopo das publicações.

Na prática, isso significa que todas as atividades demandadas na preparação de um poço submarino, como as interligações da linha de produção, da linha anular e do umbilical, são realizadas em sequência, numa única viagem do PLSV. Dessa forma, a cada viagem programada um poço é concluído e permite expandir a produção da companhia em um nível de potencial de óleo esperado para aquele poço.

No caso aqui estudado, porém, esta condição não é aderente à realidade. As diferentes linhas e umbilicais necessárias à interligação de um poço possuem data de liberação distinta ao longo do período de planejamento, fazendo com que as atividades de um determinado poço não sejam necessariamente programadas em sequência. Para aproveitar a capacidade dos navios PLSVs, também podem ser programadas atividades de poços distintos em uma mesma viagem, o que não ocorre nos trabalhos existentes na literatura.

A modelagem proposta neste trabalho visa contemplar esta realidade da empresa estudada, contribuindo para o desenvolvimento do estudo do problema, ao estender as abordagens presentes na literatura. Desta forma, atividades de poços distintos podem ser combinados em uma mesma viagem e um poço só é considerado finalizado no instante em que todas as atividades previstas para a sua interligação forem realizadas, não importando o número de viagens necessárias para isso.

3

Metodologia

Nesta seção são apresentados a classificação da pesquisa e os passos adotados como método para a execução das atividades realizadas ao longo do trabalho, bem como as limitações do estudo.

3.1.

Tipo de pesquisa

Para a classificação da pesquisa utilizou-se a taxonomia proposta por Vergara (2007), que divide as pesquisas segundo dois critérios básicos: quanto aos fins e quanto aos meios.

Quanto aos fins, o presente trabalho se classifica como uma pesquisa aplicada, pois tem finalidade prática, motivada pela necessidade de se resolver um problema concreto de programação de navios PLSVs enfrentado por uma empresa de petróleo.

Ainda quanto aos fins, pode ser considerada uma pesquisa exploratória, pois trata de um tema pouco explorado na literatura e testa a viabilidade da formulação de um modelo matemático como ferramenta de solução para o problema de programação de PLSVs.

Já quanto aos meios pode ser descrita como:

- Bibliográfica: a fundamentação teórica foi realizada por meio de uma investigação com base em material publicado e acessível ao público em geral, como: livros, teses, dissertações e artigos;
- Documental: a pesquisa vale-se de materiais denominados de fontes primárias, como dados de planilhas e documentos oficiais da companhia estudada;
- Pesquisa de campo: a investigação também ocorreu no local do fenômeno por meio de aplicação de entrevistas não estruturadas e observação direta de reuniões de planejamento;
- Estudo de caso: por se tratar da observação de uma única organização.

A utilização do estudo de caso não impede que, a partir deste estudo, sejam geradas contribuições para demais casos. A empresa estudada, mesmo possuindo características próprias, possibilita desenvolver elementos que podem ser utilizados na solução de problemas de programação de navios similares ou contribuir para gerar novas oportunidades de estudo.

3.2. Etapas da pesquisa

De acordo com Bertrand e Fransoo (2002) os modelos quantitativos se baseiam em um conjunto de variáveis que variam ao longo de um domínio específico, enquanto relações quantitativas e causais são definidas entre essas variáveis. O estudo desses modelos na área de Pesquisa Operacional se desenvolveu no sentido de resolver problemas reais de gestão de operações.

As etapas da pesquisa foram definidas de acordo com a abordagem proposta por Mitroff *et al.* (1974) para a resolução de problemas no campo da Pesquisa Operacional (PO). Este modelo, representado na Figura 7, consiste em quatro fases: conceitualização, modelagem, resolução do modelo e implementação.

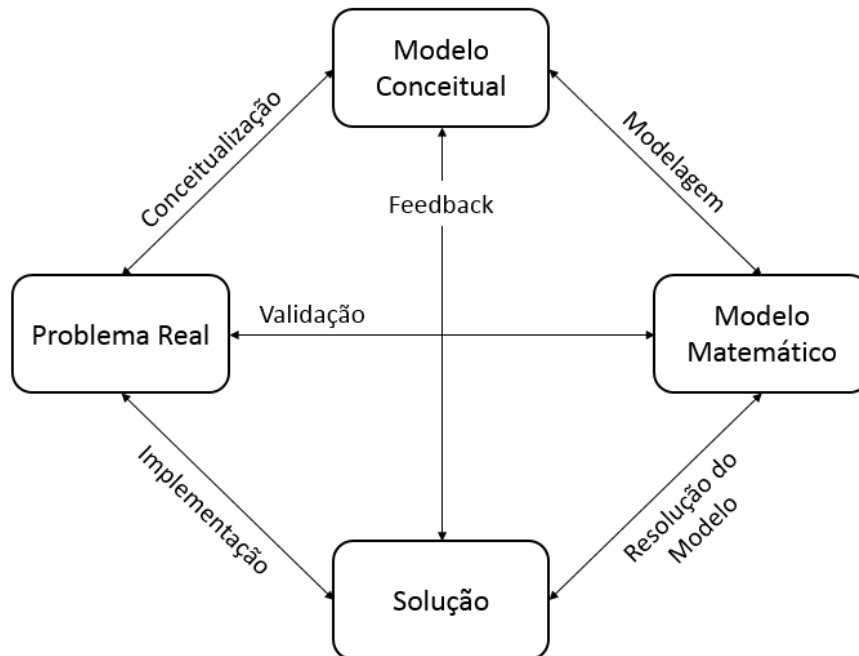


Figura 7 - Modelo para resolução de problemas de PO
Fonte: Adaptado de Mitroff *et al.* (1974)

O autor propõe que todo estudo científico parte de uma situação problema. A primeira fase da resolução de um problema consiste em formular um modelo conceitual. Nesta fase, o pesquisador toma decisões a respeito das variáveis que

necessitam ser incluídas no modelo e do escopo do problema que será tratado pelo modelo. Em seguida são definidas as relações causais entre as variáveis, resultando em um modelo matemático quantitativo, que pode ser resolvido tendo como base os conhecimentos advindos da matemática aplicada, ciência da computação e estatística. Finalmente, os resultados do modelo podem ser implementados e um novo ciclo de resolução de problemas iniciado.

O autor também destaca o perigo de se utilizar atalhos neste ciclo de pesquisa, seguindo por ciclos menores, como “modelagem – resolução do modelo – *feedback*”, que tendem provocar erros e resultados menores que os desejados em uma etapa de implementação.

Para o problema de programação de PLSVs tratado neste trabalho, foram desenvolvidas as etapas de conceitualização, modelagem e resolução do modelo.

3.3.

Materiais e métodos

Para detalhamento do problema e entendimento do processo de programação, foram realizadas entrevistas não estruturadas com a equipe responsável pelo planejamento das atividades de curto e médio prazo da Petrobras, com intuito de levantar as premissas utilizadas para a programação.

Também foram analisadas planilhas resultantes de programações já realizadas, obtidas junto à equipe de planejamento, através das quais as premissas levantadas foram validadas e foram identificados casos de exceção, posteriormente discutidos com os programadores.

Além disso, foram acompanhadas reuniões de ajuste de cronograma realizadas entre a equipe de planejamento e a equipe responsável pela operação, nas quais eram discutidas mudanças necessárias ao planejamento previamente realizado para que a execução fosse possível.

Com isso, foi possível mapear o processo de planejamento, identificando as premissas e restrições operacionais necessárias para a modelagem do problema, apresentados na seção 4.

Uma grande variedade de dados é exigida para a resolução do problema. Informações como a data de liberação dos dutos essenciais ao projeto, previsão de início de produção dos poços, atividades a serem realizadas e potencial de produção

dos poços foram obtidos de diferentes áreas da companhia, todas sob a gerência de exploração e produção.

Tais informações foram tratadas e organizadas em um banco de dados utilizando-se o software Microsoft Access. Os dados são alimentados no modelo formulado no software de otimização Aimms, que utiliza o otimizador Gurobi 6.5 na resolução do problema.

Os resultados parciais obtidos ao longo da construção do modelo foram validados em reuniões periódicas com representantes da empresa, que contribuíram com *feedbacks* para a evolução do modelo aqui apresentado.

3.4. Limitações da pesquisa

Por se tratar de um estudo de caso específico, deve-se destacar que não faz parte do escopo deste trabalho generalizar o modelo desenvolvido para aplicação a qualquer situação enfrentada por demais indústrias petrolíferas.

A empresa escolhida se caracteriza como referência no setor, sendo importante o estudo dos seus processos para expandir a teoria em um assunto pouco explorado pela literatura e para a geração de novos objetos de pesquisa para a própria empresa e para os demais atuantes do setor, que lidam com problemas semelhantes.

A utilização do relato dos processos pelas pessoas entrevistadas também pode ser vista como uma limitação, visto que a descrição nem sempre reflete exatamente a realidade executada, podendo ser transmitida apenas uma ideia do que o programador acredita que seja o mais correto que aconteça. Por isso, a análise dos dados de programações previamente realizadas e o acompanhamento de reuniões de ajuste de cronogramas são importantes para uma melhor compreensão e confrontação das informações fornecidas.

Deve-se destacar, também, que o problema de programação da logística dos PLSVs em sua completude, passa por diferentes setores da empresa, que podem ter visões diferentes em relação às restrições operacionais e objetivos a serem alcançados. Este trabalho busca uma visão geral de planejamento de médio prazo, prevalecendo a visão obtida da equipe de planejamento quando ocorrer algum conflito de objetivos.

4 Detalhamento e Modelagem do Problema

No planejamento de uma empresa de petróleo metas devem ser atingidas ao longo do período programado, por meio de entregas de poços interligados prontos para produzir. Neste cenário, fixa-se um horizonte de planejamento, no qual é necessário determinar uma sequência de atividades que serão realizadas, levando em consideração a demanda, a frota disponível, os potenciais de produção dos poços e as restrições operacionais.

A demanda é representada pelas atividades que necessitam ser realizadas dentro do período programado. Tais atividades são principalmente do tipo interligação, que podem ser de linhas de produção, anulares ou umbilicais; instalação de *manifolds*; pré-lançamento, que ocorre quando há alguma vantagem em lançar a linha em momento anterior à realização dos serviços de interligação; e recolhimento e *pull-in*, quando as linhas pré-lançadas são recolhidas e conectadas pelo PLSV.

As atividades também podem ser de manutenção do PLSV. Embora muitas vezes pequenos reparos possam ser feitos em paralelo com a realização de outros procedimentos, sem comprometer o planejamento do PLSV, também existem as atividades de manutenção preventiva na embarcação e nos equipamentos, que podem exigir a docagem do PLSV ou simplesmente a interrupção da realização de tarefas. Nestes casos, a manutenção é planejada como uma outra atividade qualquer, “ocupando” o PLSV durante o período em que será realizada.

A cada atividade, associa-se uma data de liberação de execução, definida em função da disponibilidade do material a ser utilizado, da concessão das licenças necessárias para a operação, da instalação da UEP e da completação do poço que será interligado. Também se associa a cada atividade uma data máxima para o seu término, que representa a data prevista em que o poço associado àquela atividade deve entrar em produção.

A cada poço é vinculado um potencial de produção diário, a ser atingido com o início da operação do poço, gerando acréscimo nos níveis de produção da

empresa. Desta forma, busca-se antecipar as tarefas dos poços com maior potencial de produção, respeitando as janelas já mencionadas e demais restrições operacionais.

O tempo que uma embarcação leva para executar uma atividade é previamente definido de acordo com a atividade. Para que ela seja realizada, é necessário que haja uma embarcação PLSV apta a executar o serviço. Nem todos os PLSVs executam todas as atividades, porém, para cada atividade, existe sempre ao menos um navio capaz de realizá-la. Contudo, o tempo de execução do serviço tem variação desprezível de embarcação para embarcação. Além disso, os PLSVs operam sob contrato, logo, para que executem uma atividade, o navio deve estar sob uma janela de disponibilidade.

Cada embarcação pode executar somente uma tarefa por vez, não sendo possível que mais de uma embarcação atue na mesma tarefa com o objetivo de adiantar o seu término, mesmo que existam PLSVs ociosos. Além disso, se uma atividade for iniciada, a mesma deverá ser finalizada sem a possibilidade de se interromper o serviço para retomá-lo adiante.

Por questões de segurança e operacionalidade, só é permitido que no máximo duas embarcações PLSVs realizem atividades de um mesmo poço concomitantemente, de maneira a evitar conflitos na localização das embarcações e possíveis interferências na atuação.

Para que essas atividades sejam executadas é imprescindível que haja o carregamento do material necessário no porto. Nessa etapa são carregados os dutos e umbilicais, além de outros equipamentos e materiais a serem utilizados nas interligações. A empresa disponibiliza um porto para a realização do carregamento prévio às atividades em questão, utilizado por toda a frota disponível. Em seguida, a embarcação se dirige para o local previsto para a realização das atividades e, após a conclusão do serviço, regressa ao porto.

É assumido que a troca de tripulação é realizada por helicóptero e o abastecimento da embarcação com combustível e suprimentos pode ser realizado nos momentos em que a embarcação está em mar, por veículos auxiliares de apoio *offshore* (PSV – *Platform Supply Vessel*), em paralelo com as atividades executadas pelo PLSV, logo, essas situações não configuram restrição adicional para o problema. Devido à proximidade entre os poços nos quais serão realizadas as atividades e a discretização do tempo a ser adotada, o tempo de deslocamento entre

poços também pode ser desconsiderado, visto que passa a ser irrelevante para o planejamento quando comparado com a duração das atividades, carregamentos e navegações entre porto e o local da atividade.

Considerando todos os aspectos acima apontados, busca-se maximizar a produção de óleo, impondo-se que as atividades sejam realizadas dentro de suas janelas de atendimento e dentro do horizonte de planejamento estipulado.

Como já citado, devido às características do problema, para cada atividade a ser alocada existe a necessidade de carregamento das linhas, equipamentos e demais materiais a serem utilizados nas interligações. Dessa forma, a cada viagem do navio, deve ser considerado o tempo gasto no carregamento e navegação do porto até os poços a serem interligados. A viagem a ser alocada é representada por um bloco, com duração de tempo o suficiente para que sejam realizados os preparativos no porto, a navegação de ida do porto ao poço a ser interligado, a execução da atividade e a navegação de retorno ao porto, onde um novo bloco pode ser iniciado.

A simplificação de realização de uma atividade por bloco, porém, não representa o planejamento real do problema. As atividades apresentam necessidades diferenciadas entre si e em geral não ocupam toda a capacidade de material e operação do PLSV, de maneira que diferentes atividades podem ser combinadas em uma mesma viagem.

Opta-se, então, por realizar um pré-processamento das atividades a serem alocadas, gerando os diferentes blocos de atividades que podem ser realizados pelos PLSVs. As atividades não podem ser livremente combinadas entre si, devido a características como data de liberação de execução, data máxima para realização do serviço e quantidade de linhas necessária. Dessa forma, foi elaborado um procedimento de criação de blocos, que gera viagens com as combinações de atividades possíveis, dadas as restrições impostas para o agrupamento das tarefas.

Além do respeito às restrições, as condições para agrupamento das tarefas se dão com o objetivo de não serem criados blocos em quantidade desnecessária, de maneira a aumentar o porte e a complexidade de resolução do modelo sem grandes ganhos em qualidade de solução. Embora em alguns casos específicos fosse possível a realização de três ou quatro atividades em uma viagem, por se tratar de uma programação de médio prazo não é interessante para a empresa que seja gerada uma alocação no limite de uso do recurso. Dessa forma, assume-se que serão gerados blocos somente com 1 ou 2 atividades, padrão que vai de acordo também

com a programação que é feita atualmente, na qual a grande maioria dos blocos apresentam estas configurações.

Além disso, foram utilizados critérios para combinar as atividades de tal maneira que não fossem gerados blocos semelhantes, variando somente a ordem das atividades, nem blocos em que fosse gerada ociosidade dentro de uma viagem. Desta maneira, em blocos de duas atividades, elas sempre estarão ordenadas de maneira crescente por sua data de compromisso.

A utilização do procedimento de criação de blocos é importante para a resolução do problema pois permite simplificar a atuação do modelo matemático, criando condições para que soluções de boa qualidade possam ser encontradas através da otimização. Caso as viagens possíveis não fossem geradas previamente, o modelo poderia combinar as atividades livremente, gerando uma diversidade muito grande de possibilidades, nem sempre viáveis ou adequadas para o problema. As restrições operacionais relacionadas às datas das atividades e à capacidade de carregamento do PLSV teriam de ser tratadas como restrições matemáticas, de maneira a contribuir com o aumento de complexidade e dificuldade de resolução do modelo.

Também a fim de reduzir a complexidade do modelo matemático foi utilizado, na construção dos blocos, o conceito de projeto existente na empresa, que corresponde a um agrupamento de poços fisicamente próximos que é planejado em conjunto. O procedimento permite identificar quais blocos são formados apenas por atividades pertencentes a um mesmo projeto e torna possível alimentar o modelo apenas com estas possibilidades de viagem. Neste caso, o modelo é alimentado de maneira mais restrita, com menos opções de alocação, gerando problemas de menor porte capazes de gerar soluções viáveis e de boa qualidade.

Os blocos criados são compostos por um carregamento, uma navegação do porto ao local da atividade, as atividades a serem realizadas e uma navegação de retorno ao porto. Para a programação o modelo escolhe, entre os blocos previamente gerados, quais serão utilizados na geração do cronograma. A sequência de realização dos blocos de atividades pode ser indicada pelo instante de início de cada bloco em cada embarcação. O procedimento de criação dos blocos será detalhado na seção 4.1, a seguir.

4.1

Procedimento de criação de blocos

Para este problema foi considerado que cada bloco pode conter uma ou duas atividades, de maneira que se garanta o respeito à capacidade de carga das embarcações.

Para blocos com mais de uma atividade, considera-se que as mesmas são realizadas uma imediatamente após a outra de forma sequencial, sem intervalo ocioso entre elas e sem a contabilização de períodos de deslocamento ou carregamento entre qualquer uma delas. Isso ocorre porque as navegações intermediárias levam poucas horas, não afetando as durações de cada atividade estimadas em dias. Com relação ao carregamento, como mencionado, o mesmo deve ser realizado previamente ao início da primeira atividade entre as que forem agrupadas.

Dessa forma, todo bloco de atividades será composto então por um carregamento (C), a navegação (N1) entre a base e a primeira atividade, n atividades (A) a realizar, e concluído com a navegação (N2) de retorno à base, conforme indica a Figura 8.

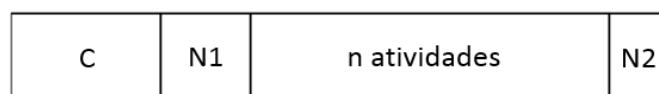


Figura 8- Composição básica de um bloco de atividades

A partir da combinação dessas atividades, o problema passa a tratar da programação dos blocos e não mais das atividades individualizadas, porém todos os parâmetros referentes a elas devem estar contidos nos blocos, para que nenhuma característica do problema seja violada. Os parâmetros referentes aos blocos são:

- IB – Data a partir da qual o bloco pode ser iniciado;
- FB – Data limite para finalização do bloco;
- DB – Duração do bloco, em períodos;
- PB – Relação entre o bloco e os poços;
- NB – Relação entre o bloco e os navios;
- IRP – Início Relativo do atendimento de cada poço no bloco;
- FRP – Fim Relativo do atendimento de cada poço no bloco.

O parâmetro IB é definido pela data de liberação mais tarde entre as atividades que compõem o bloco. A data limite para que o bloco termine, ou seja,

o instante de tempo onde todo o processo deve acabar, é definida pelo parâmetro FB, que é calculado com base nas datas de entrega das atividades, de forma que assume o menor valor entre as somas da data entrega de cada atividade com a duração das atividades que a sucedem no bloco mais o período de navegação final. A fim de priorizar as atividades que possuem datas de entrega menores, o bloco é sempre composto de forma que as atividades sejam sequenciadas em ordem crescente de data de entrega.

A duração de um determinado bloco (DB) se dá pelo somatório das durações das atividades que o compõe, acrescido dos tempos de navegação e carregamento.

O parâmetro PB é responsável por indicar a relação de cada um dos blocos com os poços existentes. Dado que cada atividade está vinculada a um poço, se determinada atividade está no bloco, a relação entre esse bloco e o poço no qual a atividade será realizada, passa a existir. De forma similar, o parâmetro NB indica a relação entre os blocos e os navios, onde ao ser criado um bloco verifica-se quais navios podem atender aquele bloco, criando a relação entre eles, porém se uma determinada combinação de atividades não possuir nenhum navio capaz de atendê-las conjuntamente, o bloco não é criado.

Como é possível a combinação de atividades de diferentes poços em um mesmo bloco, e devido ao fato de existir um limite para realização de atividades de um mesmo poço simultaneamente, é importante identificar dentro de um bloco, o intervalo de tempo no qual um poço está sendo atendido. Dessa forma, são gerados os parâmetros relativos aos instantes de início e fim das atividades de um determinado poço em um bloco, indicados por IRP e FRP. Como não é conhecido a priori o instante em que o bloco será programado, caso seja alocado, esses parâmetros são baseados apenas nas durações dos componentes de cada bloco e calculados pressupondo-se que o bloco esteja alocado no instante zero, conforme indica a Figura 9.

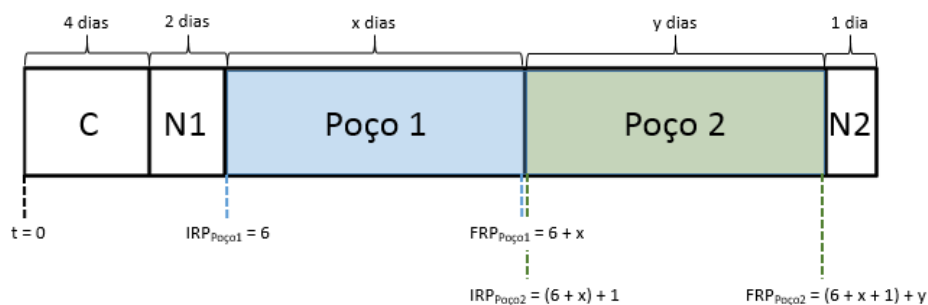


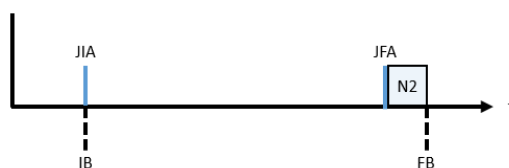
Figura 9 - Bloco com IRP e FRP de 2 poços

Como visto na Figura 9, o IRP do Poço 1 é calculado a partir da soma dos tempos do carregamento (4 dias) e da navegação inicial (2 dias). O FRP do poço é calculado somando-se a duração x da atividade ao seu IRP. O início do segundo poço se dá, então, no dia seguinte ao fim do primeiro poço. Logo, o IRP do Poço 2 é obtido somando-se 1 dia ao FRP do Poço 1 e o seu FRP é obtido somando-se a duração y da atividade ao seu IRP. Quando um bloco tem sua alocação definida, os instantes reais de início e fim de atendimento nos poços podem ser calculados somando-se o instante t real, no qual o bloco foi programado para iniciar, com os parâmetros IRP e FRP pré-estabelecidos.

Para a geração automatizada dos blocos, foi desenvolvido um procedimento no software AIMMS, baseado em linguagem própria do programa. Além de gerar os parâmetros supracitados, o procedimento avalia se a criação do bloco é viável, não o gerando caso viole alguma das condições que o tornaria impossível de ser alocado. O procedimento se divide em três etapas: na primeira ocorre criação dos blocos com atividades individuais, na segunda criam-se novos blocos adicionando atividades aos blocos existentes e, por fim, são criados os blocos relativos às paradas de manutenção dos navios. Os passos de cada etapa do procedimento são descritos nas seções a seguir.

4.1.1 Criação de blocos com atividades únicas

- 1) Com base nas janelas de início e fim da atividade, identifica os instantes em que o bloco poderia iniciar e terminar (Figura 10).



Onde:

JIA: Janela Inicial da Atividade

JFA: Janela Final da Atividade

Figura 10 - Identificação de IB e FB para blocos com atividades únicas

- 2) Calcula tempo de *Setup* (carregamento e navegação inicial) do bloco de acordo com a atividade (Figura 11). Para atividades de instalação de *Manifolds*, tanto o carregamento quanto a navegação inicial têm a duração

de 2 dias cada. Para atividades em geral, o carregamento é de 4 dias e a navegação inicial dura 2 dias.

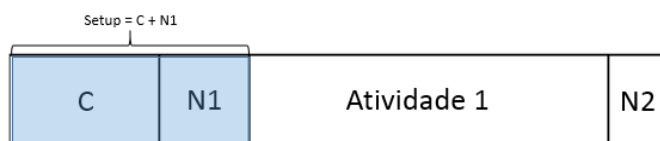


Figura 11 - Identificação do tempo de *Setup*

- 3) Calcula a duração do bloco, somando os tempos de setup, duração da atividade e o tempo de navegação de retorno à base, que tem a duração de 1 dia.
- 4) Verifica se o bloco pode ser criado. Para isso é necessário que exista ao menos um navio capaz de atender a atividade que compõe o bloco, que tenha janela de disponibilidade capaz de atender ao bloco com base nos seus parâmetros de início e fim previamente calculados. Além disso, as janelas estipuladas para o bloco devem ser capazes de atender a duração de todas as atividades que o compõem ($FB - IB \geq C + N1 + \text{Duração Atividade} + N2$). A verificação é ilustrada na Figura 12.

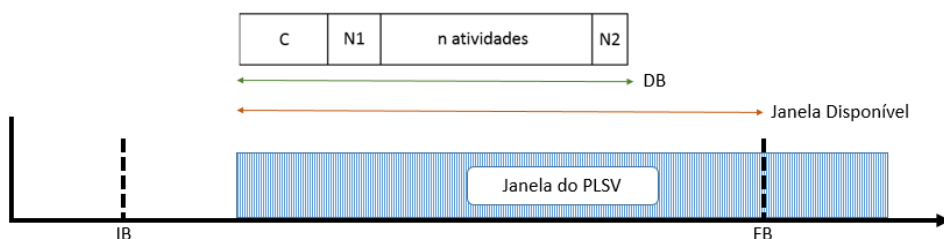


Figura 12 - Verificação da possibilidade de criação do bloco

- 5) Cria bloco e os seus demais parâmetros

4.1.2

Criação de novos blocos adicionando atividades aos existentes

- 1) Verifica se a atividade pode ser combinada ao bloco. Para isso a atividade entrante deve ter data de término maior do que as atividades que já compõem o bloco e sua entrada deve respeitar o limite de 2 atividades na composição do mesmo, sendo no máximo uma tarefa de instalação de *manifold*. A adição da atividade é representada na Figura 13.

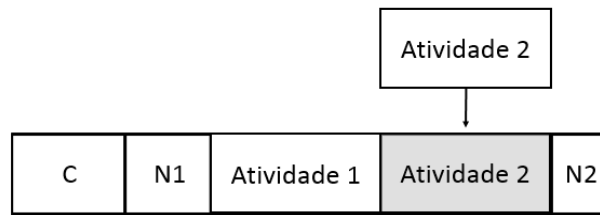
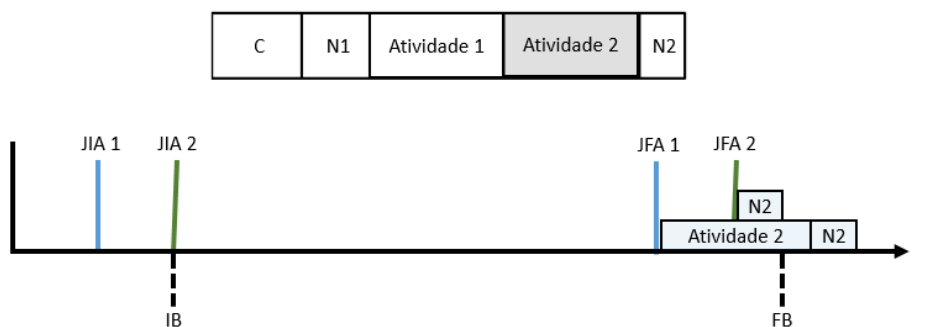


Figura 13 - Criação de blocos com múltiplas atividades

- 2) Calcula com base nas janelas das atividades, quando o bloco poderia iniciar e terminar. Como já citado, parâmetro IB é definido pela maior data de liberação das atividades que compõem o bloco e o parâmetro FB será calculado de acordo com a data de entrega das atividades, assumindo o menor valor entre as somas da data de entrega de cada atividade com a duração das atividades que a sucedem no bloco mais o período de navegação final. A identificação dos parâmetros é ilustrada na onde: $IB = \max (JIA\ 1; JIA\ 2);$

$$FB = \min (JFA1 + Duração_{Atividade\ 2} + Duração_{N2}; JFA\ 2 + Duração_{N2})$$

- 3) Figura 14.



onde: $IB = \max (JIA\ 1; JIA\ 2);$
 $FB = \min (JFA1 + Duração_{Atividade\ 2} + Duração_{N2}; JFA\ 2 + Duração_{N2})$

Figura 14 - Identificação de IB e FB para blocos com 2 atividades

- 4) Calcula tempo de Setup do novo bloco de acordo com a sua composição de atividades. Caso haja atividade de instalação de *manifold* neste novo bloco, a duração dos carregamentos passa para 6 dias e a navegação inicial para 3 dias. Caso o bloco seja composto sem atividades de *manifold*, o carregamento e a navegação inicial se mantêm em 4 e 2 dias, respectivamente.

- 5) Calcula a duração do bloco, somando os tempos de setup, duração da atividade e o tempo de navegação de retorno à base, que tem a duração de 1 dia.
- 6) Verifica se o bloco pode ser criado. Para isso é necessário que exista ao menos um navio capaz de atender todas as atividades que compõem o bloco, que tenha janela de disponibilidade capaz de atender ao bloco com base nos seus parâmetros de início e fim previamente calculados. Além disso, as janelas estipuladas para o bloco devem ser capazes de atender a duração de todas as atividades que o compõem ($FB - IB \geq C + N1 + \text{Duração das Atividades} + N2$).
- 7) Cria bloco e os seus demais parâmetros.

4.1.3

Criação de blocos de paradas para manutenção do PLSV

- 1) Verifica se existe janela no navio ao qual a parada é referente.
- 2) Cria o bloco com a parada e calcula os seus parâmetros.

4.1.4

Identificação de subgrupos dos blocos

Ao fim da criação de cada bloco ele pode ser classificado em subgrupos, de acordo com diferentes regras. Para o caso estudado, foi criado o subgrupo formado por blocos que continham somente atividades de poços relacionados a um mesmo projeto em sua composição. Tal decisão foi tomada por este padrão de viagem ser muito utilizada no planejamento atual da empresa e se adequar mais fielmente à premissa que desconsidera as navegações intermediárias por serem muito curtas em relação à duração das atividades. A criação de subgrupos possibilita separar conjuntos de blocos que seguem diferentes padrões de comportamento, permitindo alimentar o modelo de diferentes formas.

4.2

Formulação Matemática

Para a resolução do problema de programação de PLSVs abordado, foi proposto um modelo de programação matemática linear inteira mista, baseado no problema de programação de máquinas paralelas, onde os navios representam as máquinas às quais o conjunto de atividades deve ser alocado e sequenciado.

Um diferencial do modelo proposto em relação aos modelos clássicos de programação em máquinas paralelas é que nestes todo o conjunto de possibilidades de alocação, representado pelas atividades abordadas individualmente, é alocado. Já no modelo proposto, devido ao pré-processamento das atividades na geração de blocos, são criadas diversas possibilidades de alocação em blocos, das quais o modelo deve decidir quais usar em uma solução ótima. Uma mesma atividade pode estar presente em diversos blocos, individualmente ou combinada com outras atividades, porém, só poderá ser realizada uma vez e, portanto, o modelo só poderá utilizar um bloco que a contém. Como já observado, esse pré-processamento é realizado com o intuito de criar somente possibilidades viáveis de composição de viagens e tratar restrições de maneira anterior à execução do modelo, como forma de reduzir a complexidade da modelagem matemática.

O modelo proposto tem o objetivo de maximizar o óleo produzido ao longo do horizonte de planejamento, que é o objetivo principal da companhia, e é resolvido em duas fases, podendo seguir duas estratégias de resolução distintas.

A primeira fase de resolução tem o objetivo de solucionar um modelo mais simples, que gere uma solução inicial para o modelo responsável por maximizar o óleo produzido, que representa a segunda fase de resolução. A solução do modelo inicial indica, ainda, a necessidade de se utilizar algum recurso extra para garantir a viabilidade de execução do modelo, podendo ser obtida por meio de duas estratégias:

Estratégia 1: utiliza o conceito de “PLSV fictício”, uma espécie de navio de folga, com capacidade de realizar todas as atividades e com janela disponível durante todo o horizonte de planejamento. Dessa forma, nos casos em que a alocação de todas as atividades na frota disponível não for possível, este navio pode receber a alocação das atividades necessárias para que o problema seja resolvido. Por esta estratégia, a solução inicial é gerada obtendo-se uma alocação, de acordo com as restrições operacionais, que minimize a necessidade de utilização deste navio extra. A utilização mínima do navio fictício é transmitida como restrição para o modelo executado na fase seguinte.

Estratégia 2: permite a criação de variáveis além da janela final das atividades, caracterizando atraso na realização das mesmas. Por esta estratégia, a solução inicial é gerada obtendo-se uma alocação, de acordo com as restrições operacionais, que minimize a necessidade de atraso para a alocação de todas as

atividades na frota disponível. Caso exista de fato a necessidade de atraso para a realização das atividades, as janelas FB dos blocos utilizados que possuem atividades em atraso são atualizadas para permitir este valor mínimo, enquanto de todos os outros blocos passam a não permitir atraso na fase seguinte.

O fluxo entre os modelos é representado na Figura 15.

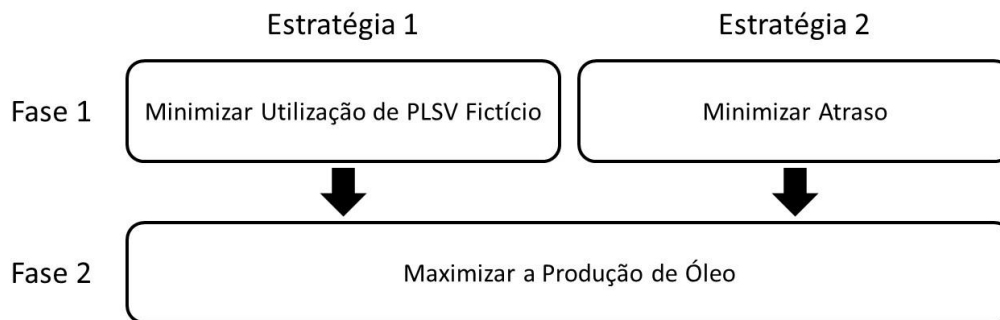


Figura 15 - Estratégias de resolução dos modelos

Deve-se destacar que uma atividade alocada a um PLSV fictício nunca é considerada realizada, logo, o poço relacionado a esta atividade não será considerado concluído em nenhum momento. Cabe ao planejador da empresa a decisão, conforme a solução apresentada, de adequar à frota disponível da companhia de maneira que seja possível a realização de todas as atividades conforme suas limitações, ou relaxar as janelas, provocando atraso em busca de uma solução viável com a frota disponível.

A formulação dos modelos é detalhada a seguir:

Conjuntos:

t – períodos

a - atividade

b – bloco de atividades

n – embarcações PLSV

S_n – embarcações PLSV, considerando o PLSV fictício.

p – poços

Parâmetros:

$IRP_{p,b}$ – Início Relativo do atendimento do poço p no bloco b

$FRP_{p,b}$ – Fim Relativo do atendimento do poço p no bloco b

DB_b – Duração, em dias, do bloco b

PP_p – Potencial de produção do poço p

$MaxAP$ – Máximo de atividades em paralelo num mesmo poço

$Nr_APB_{p,b}$ – Número de atividades do poço **p** presentes no bloco **b**

Nr_AP_p – Número de atividades a serem realizadas no poço **p**

DA_a – Duração da atividade **a**, em dias

H – Último período do horizonte de planejamento

NF – Número máximo de dias ocupados por atividades no PLSV fictício

$FRA_{a,b}$ – Fim Relativo do atendimento de uma atividade **a** no bloco **b**

JSA_a – Janela superior da atividade **a**, período até a qual deve ser finalizada

Conjuntos Auxiliares:

$AB_{a,b}$ – Atividades **a** atendidas pelo bloco **b**

$PB_{b,p}$ – Poços **p** atendidos pelo bloco **b**

$NB_{n,b}$ – Navios **n** aptos a realizar o bloco **b**

Variáveis:

$i_{n,b,t}$ - Variável de alocação do bloco. Assume valor 1 caso o PLSV **n** inicie o atendimento ao bloco de atividades **b** no período **t**. Criada somente quando o PLSV **n** esteja apto a realizar as atividades do bloco **b** e o período **t** esteja dentro da janela em que é possível iniciar o bloco, baseado nas datas de início e fim dos blocos, considerando, ou não, a permissão de um fator de atraso.

$pc_{p,t}$ - Variável que indica a finalização de um poço produtor. Assume o valor 1 no instante **t** em que todas as atividades de um poço **p** são atendidas, 0 caso contrário.

Modelo 1: Minimizar utilização do PLSV Fictício

$$MIN \sum_b \sum_{a \in AB_{a,b}} \sum_t i_{Sn,b,t} \times DA_a \quad | Sn = PLSV_fictício \quad (1)$$

$$\sum_b \sum_{t'=t-DB_b+1}^t i_{n,b,t'} \leq 1 \quad \forall n, t \quad (2)$$

$$\sum_{Sn} \sum_{b | a \in AB_{a,b}} \sum_t i_{Sn,b,t} = 1 \quad \forall a \quad (3)$$

$$\sum_{Sn} \sum_{b | p \in PB_{b,p}} \sum_{t'=t-FRP_{p,b}}^{t-IRP_{p,b}} i_{n,b,t'} \leq MaxAP \quad \forall p, t \quad (4)$$

$$i_{n,b,t} \in \{0,1\} \quad (5)$$

A função objetivo (1) busca minimizar o número de dias ocupados por atividades alocadas ao PLSV_fictício.

A restrição (2) impede que um navio PLSV da frota física esteja alocado a mais de um bloco de atividades ao mesmo tempo.

A restrição (3) garante que todas as atividades serão alocadas e somente uma vez.

A restrição (4) limita o atendimento simultâneo em um mesmo poço a um número máximo de PLSVs.

A restrição (5) garante que as variáveis são binárias.

Modelo 2: Minimizar atraso

$$MIN \sum_{Sn} \sum_b \sum_{a \in AB_{a,b}} \sum_{t | t > JSA_a - FRA_{a,b}} i_{Sn,b,t} \times (t + FRA_{a,b} - JSA_a) \quad (6)$$

A FO (6) busca minimizar a soma do número de dias de atraso de todas as atividades alocadas em relação à sua data de compromisso. O atraso é calculado a partir do período de término da atividade, obtido com a soma do instante t de alocação do bloco com o parâmetro $FRA_{a,b}$, reduzido da data de compromisso da atividade, representada pela sua janela superior JSA_a . A soma é realizada somente nos períodos em que o atraso pode ocorrer, nos quais o término da atividade é mais tarde que sua janela superior ($t + FRA_{a,b} > JSA_a$ ou $t > JSA_a - FRA_{a,b}$).

As restrições para o Modelo 2 são as mesmas adotadas no Modelo 1, que garantem que um navio PLSV da frota física não seja alocado a mais de um bloco de atividades ao mesmo tempo (2), que todas as atividades serão alocadas (3), que o atendimento simultâneo em um mesmo poço será limitado a um número máximo de PLSVs (4) e que as variáveis serão binárias (5).

Modelo 3: Maximizar a produção de óleo

$$MAX \sum_p \sum_t PP_p \times pc_{pt} \times (H - t + 1) \quad (7)$$

Restrições Adicionais:

$$Nr_AP_p \times pc_{p,t} \leq \sum_n \sum_{t'=0}^{t-FRP_{p,b}} \sum_{\substack{b | p \in PB_{b,p} \\ n \in NB_{n,b}}} i_{n,t',b} \times Nr_APB_{p,b} \quad \forall p, t \quad (8)$$

$$\sum_t pc_{p,t} \leq 1 \quad \forall p \quad (9)$$

$$\sum_a \sum_{b \in AB_{a,b}} \sum_t i_{sn,b,t} \times DA_a \leq NF \quad \forall Sn \in PLSV_fantasma \quad (10)$$

$$i_{n,b,t}; pc_{p,t} \in \{0,1\} \quad (11)$$

A função objetivo (7) maximiza o óleo produzido pelos poços que são interligados ao longo do período de planejamento pela frota física da empresa, multiplicando o seu potencial de produção diário pelo número de períodos percorridos do instante em que foi finalizado até o fim do horizonte de planejamento.

As restrições básicas para o Modelo 3 são as mesmas adotadas nos Modelos 1 e 2, que garantem que um navio PLSV da frota física não seja alocado a mais de um bloco de atividades ao mesmo tempo (2), que todas as atividades serão alocadas (3) e que o atendimento simultâneo em um mesmo poço será limitado a um número máximo de PLSVs (4)

Em relação às restrições adicionais, a restrição (8) relaciona as atividades existentes em um poço com as realizadas no mesmo pela frota física, atualizando a variável $pc_{p,t}$ no instante em que todas são atendidas. A variável $pc_{p,t}$ é atualizada pois um valor positivo adiciona valor na função objetivo e para que a inequação seja verdadeira, a variável só poderá assumir valor positivo a partir do instante em que todas as atividades relacionadas àquele poço forem cobertas por alocações de blocos na frota física de PLSVs.

A restrição (9) garante que a variável $pc_{p,t}$ irá assumir o valor 1 no máximo uma vez.

A restrição (10) garante que a utilização do navio fictício será a mínima necessária para a resolução do modelo, dada a solução do modelo anterior, responsável por minimizar a utilização deste navio. Esta restrição só é ativada quando a resolução é feita pela Estratégia 1.

A restrição (11) garante que as variáveis sejam binárias.

4.3

Exemplo de aplicação dos modelos

Como forma de ilustrar o funcionamento do procedimento de criação de blocos e os resultados possíveis de serem obtidos através da aplicação do modelo, apresenta-se nesta seção um problema de tomada de decisão quanto à alocação de atividades de interligação de poços com complexidade reduzida.

A base de dados aplicada neste exemplo representa um problema simplificado, que consiste na programação da interligação de 6 poços submarinos, através da realização de 20 atividades ao longo de um período de planejamento de 4 meses (120 dias), em uma frota disponível de 4 navios PLSVs.

As 20 atividades são divididas em 18 do tipo interligação, uma do tipo instalação de *manifold* e uma parada programada para um navio específico da frota. Após a aplicação do pré-processamento detalhado na seção 4.1 foram criados 113 blocos de uma ou duas atividades, sendo 64 destes compostos por atividades de um mesmo projeto, configuração que será utilizada para alimentar o modelo matemático.

Todos os dados de entrada referentes às atividades, poços e navios da frota, bem como o resultado do procedimento de criação de blocos para este problema, são detalhados no Apêndice I.

Primeiramente, a aplicação do modelo matemático para este problema foi realizada seguindo a Estratégia 1, de maneira a maximizar o óleo produzido, dada a utilização máxima de um PLSV fictício, caso necessário. A execução do modelo que minimiza a utilização do PLSV fictício resultou na alocação 14 dias de atividades de interligação para este navio, que é transmitida como restrição e como solução inicial para o modelo que tem como função maximizar o óleo produzido potencial ao longo do período de planejamento.

A alocação de blocos resultante da execução dos modelos permite a construção do cronograma de realização das atividades, de maneira otimizada. O cronograma feito a partir do resultado dessa instância simplificada é apresentado na Figura 16, a seguir. Cada atividade é representada por um retângulo que indica o número da atividade e a letra referente ao poço relacionado.

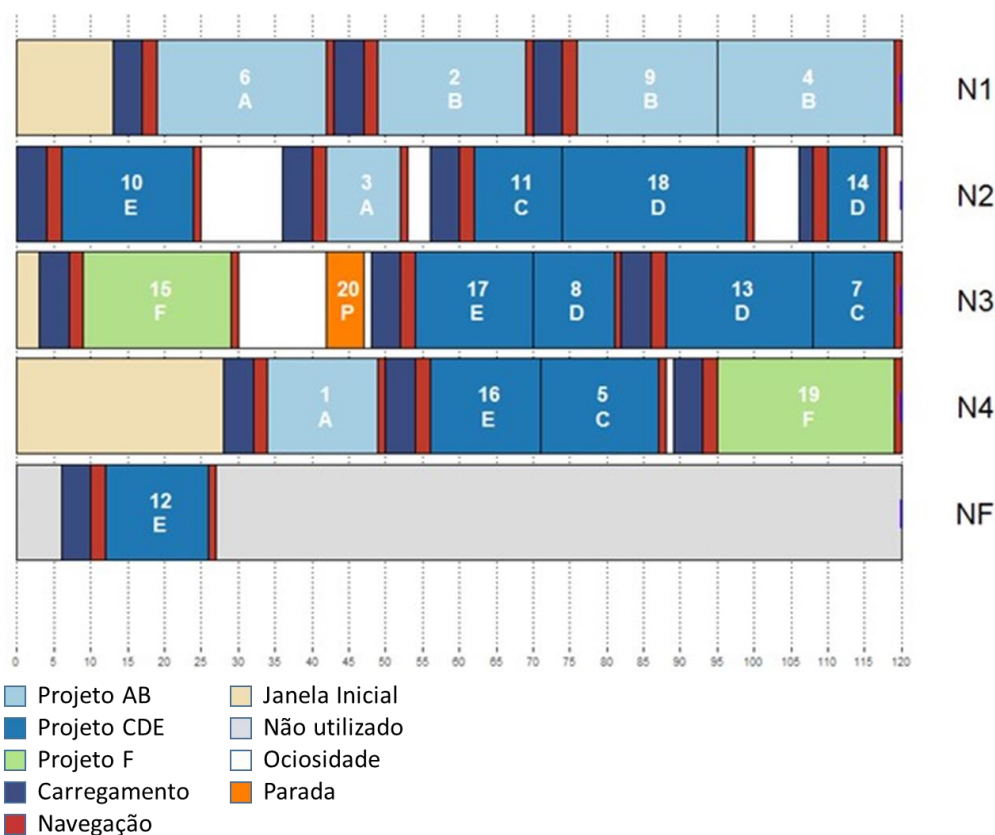


Figura 16 - Alocação do problema simplificado utilizando Navio Fictício

A alocação de uma atividade no navio fictício indica que, mesmo que existam ociosidades nos navios da frota, a alocação de todas as atividades de maneira que se respeite as suas janelas de execução é inviável.

Cada poço é considerado concluído na data mais tarde dentre os termos de todas as atividades a ele pertencentes. Neste momento, o poço é interligado e passa a produzir de acordo com o seu potencial diário, acumulando produção até o fim do horizonte de planejamento.

Deve-se destacar novamente que, nesta alocação, a atividade 12 não é considerada atendida de fato e o poço E não é considerado finalizado, visto que o navio ao qual a atividade está alocada não existe. A produção total obtida neste exemplo foi de 800 unidades de produção. O cálculo do potencial acumulado obtido a partir de cada poço pode ser analisado na Tabela 1.

A alocação no navio fictício mostra que para atender todas as atividades planejadas é necessária uma readequação da frota ou flexibilizar a janela de execução das atividades, permitindo a ocorrência de atrasos.

Tabela 1 - Exemplo: Resultados da Estratégia 1

Poço	Atividades	Fim Atividade	Fim Poço	Potencial Diário	Dias Produtivos	Potencial Acumulado
A	1	49	52	10	69	690
	3	52				
	6	42				
B	2	69	119	0	2	0
	4	119				
	9	95				
C	5	87	119	0	2	0
	7	119				
	11	74				
D	8	81	117	20	4	80
	13	108				
	14	117				
	18	99				
E	10	24	-	-	-	-
	12	Não realizada				
	16	71				
	17	70				
F	15	29	119	15	2	30
	19	119				
Parada	20	47	-	-	-	-

Dessa forma, para verificar a viabilidade de atender todas as atividades na frota disponível, permitindo pequenos atrasos, foi aplicada a Estratégia 2 de resolução, na qual o modelo verifica o mínimo atraso possível, para depois maximizar o óleo produzido. Para a verificação, foi permitido o atraso de 30 dias em cada atividade.

A solução obtida pelo modelo que minimiza o atraso encontrou a necessidade de um atraso total de dez dias, sendo três dias na atividade 6 e sete dias na atividade 12. As janelas dos blocos alocados que possuem essas atividades são atualizadas para permitir este atraso no modelo que maximiza o óleo potencial. O cronograma gerado a partir do resultado deste modelo, permitindo o atraso destas duas atividades, é apresentado na Figura 17, a seguir.

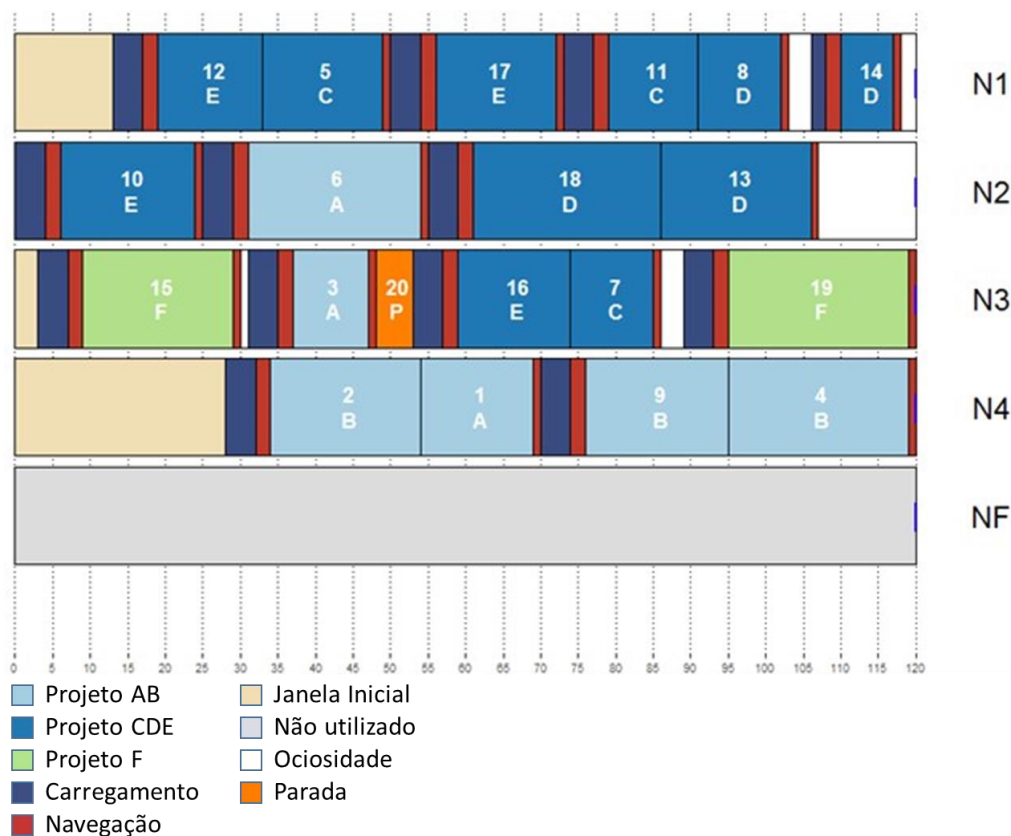


Figura 17 - Alocação do problema simplificado permitindo atrasos

Como pode ser observado no cronograma, a liberação do atraso permitiu a realização de todas as atividades dentro da frota física de navios disponível, aproveitando parte do espaço ocioso que havia nos mesmos, não havendo a necessidade de se utilizar o navio fictício.

Neste caso, todos os poços foram considerados concluídos e o valor do potencial do poço E também é contabilizado na função objetivo, sendo responsável pelo salto de produção potencial de 800 barris no cenário com navio fictício para 1194 barris no cenário permitindo o atraso. O cálculo da produção de cada poço pode ser observado na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2 - Exemplo: Resultados da Estratégia 2

Poço	Atividade	Fim Atividade	Fim Poço	Potencial Interligado	Dias Produtivos	Potencial Acumulado
A	1	69	69	10	52	520
	3	47				
	6	54				
B	2	54	119	0	2	0
	4	119				
	9	95				
C	5	49	91	0	30	0
	7	85				
	11	91				
D	8	102	117	20	4	80
	13	106				
	14	117				
	18	86				
E	10	24	74	12	47	564
	12	33				
	16	74				
	17	72				
F	15	29	119	15	2	30
	19	119				
Parada	20	53	-	-	-	-

5

Aplicações e Resultados

Nesta seção serão apresentados em detalhes como foram realizadas as aplicações e os resultados obtidos pelos modelos de otimização desenvolvidos para os dados da empresa estudada.

5.1.

Características da base

A base de dados aplicada neste estudo representa um problema real enfrentado pelo planejamento da Petrobras. O problema consiste na programação de 129 atividades, sendo principalmente do tipo interligação de linhas de produção e umbilicais. Além das interligações, o conjunto de atividades também é composto por instalações de *manifolds*, pré-lançamento, recolhimento, *pull-in* e remanejamento de linhas.

Soma-se ao conjunto de atividades a serem programadas, duas paradas para manutenção preventiva para dois dos navios da frota disponível dentro do período a ser planejado. Tais paradas se comportam como um bloco a ser programado, tendo sua respectiva janela e podendo ser alocada somente ao navio à qual é direcionada, totalizando, então, 131 atividades para programação.

As 129 atividades a serem programadas estão relacionadas à conclusão do projeto de 55 poços submarinos, que passam a entrar em operação assim que as atividades a eles relacionadas forem concluídas. Destes, 15 poços (correspondendo a 27,3% do total) possuem potencial de produção de óleo e devem ter a sua conclusão antecipada ao máximo para que seja produzido mais óleo ao longo do período de planejamento. Entre os poços restantes, estão poços produtores e poços injetores, que não agregam óleo diretamente no horizonte de planejamento estipulado, mas são importantes para se gerenciar a energia dos reservatórios.

Tais atividades devem ser alocadas e sequenciadas na frota de PLSVs disponível na empresa, que é composta por 13 navios distintos entre si, com diferentes aptidões para a realização ou não destas atividades. Como os navios são

obtidos por meio de contratos de afretamento, feitos em momentos distintos, e ainda podem estar sob controle de outras áreas da empresa em algum momento, as janelas de disponibilidade das embarcações variam, o que faz com que os navios possam não estar disponíveis ao longo de todo o período de planejamento.

O horizonte de planejamento foi determinado a partir de uma base de dados obtida junto à Petrobras no mês de março de 2016, na qual era estabelecida a demanda de atividades a serem programadas até o fim do ano corrente. Após um tratamento de dados no qual foram eliminadas as atividades já programadas no período operacional de curto prazo, foram obtidas as atividades restantes que deveriam ser programadas, além das datas a partir das quais os navios ficariam livres para esta programação, estabelecendo a janela inicial de cada um deles e marcando o início do horizonte de planejamento.

Como as janelas de cada navio são diferentes entre si, a disponibilidade de embarcações varia ao longo do período de planejamento. Na Figura 18 pode ser observado o número de navios disponíveis para a realização de atividades em cada período.

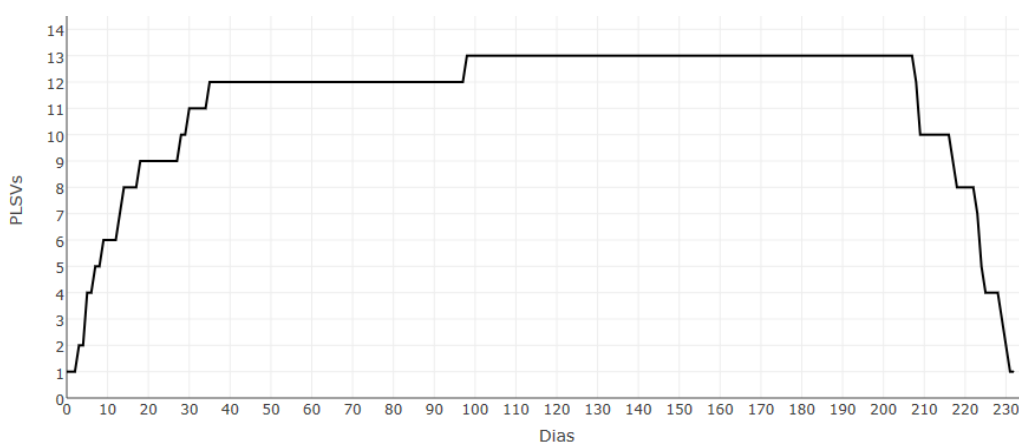


Figura 18 - Disponibilidade de PLSVs ao longo do horizonte

Como pode ser observado, o horizonte de planejamento começa com poucos PLSVs disponíveis nos primeiros períodos e a disponibilidade vai aumentando, ficando entre 12 e 13 navios na maior parte do tempo. Nos períodos finais do horizonte de planejamento a frota volta a ser reduzida. Em média, ao longo do horizonte a ser programado, há uma disponibilidade de 11 navios na frota, com máximo de 13.

Assim como as embarcações, cada atividade possui sua própria janela na qual pode ser alocada. Essa configuração gera períodos em que a alocação é mais

disputada do que em outros, com mais atividades disponíveis para serem alocadas para o mesmo número de PLSVs. A Figura 19 apresenta um gráfico onde pode ser observada a concentração de atividades ao longo do horizonte de planejamento, representada pelo número de atividades com janela disponível a cada período.

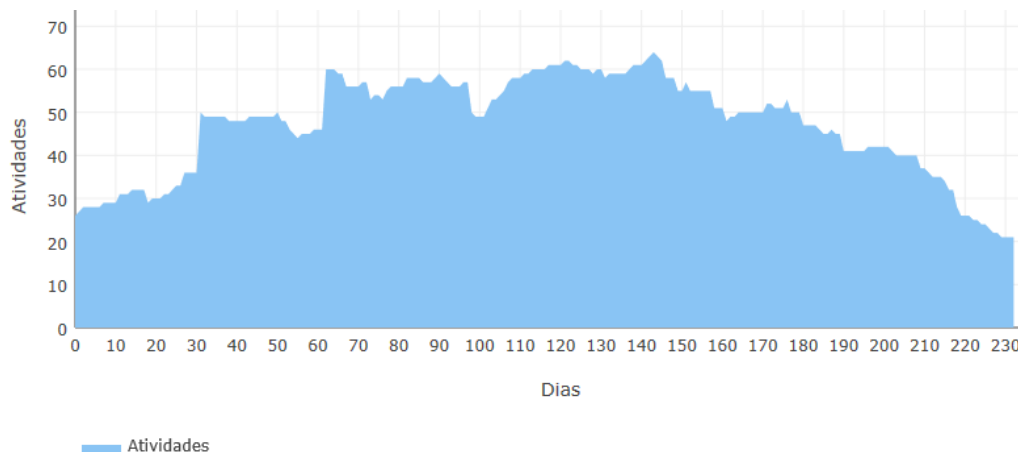


Figura 19 – Atividades com janela disponível a cada período

Como pode ser observado na Figura 19, existe a ocorrência de um pico de atividades com janela disponível na parte central do horizonte de planejamento, enquanto no início e no fim do horizonte, menos atividades disputam a alocação nos PLSVs disponíveis. Em média, existem 47 atividades com janela disponível para alocação em cada período, com máximo de 64.

Como os blocos são construídos baseado nas janelas das atividades, essa configuração tende a ser similar quando analisada a concentração de blocos com janela disponível ao longo do horizonte de planejamento. Na Figura 20 observa-se que para os blocos gerados por combinações livres das atividades este pico central é ainda mais acentuado. Porém, ao analisar os blocos gerados apenas por atividades pertencentes ao mesmo projeto, premissa adotada neste estudo, nota-se uma redução drástica no número de blocos na parte central, provocada pela menor possibilidade de combinação de atividades. Dessa forma, reduz-se a quantidade de blocos disponíveis para alocação de 2421 blocos, com média de 752 blocos por período, na combinação livre, para 490 blocos, com média de 182 blocos por período, na combinação por projetos. Essa redução torna a distribuição dos blocos ao longo do período de planejamento mais homogênea e diminui o porte do modelo a ser executado, permitindo uma maior evolução da solução em menos tempo de processamento.

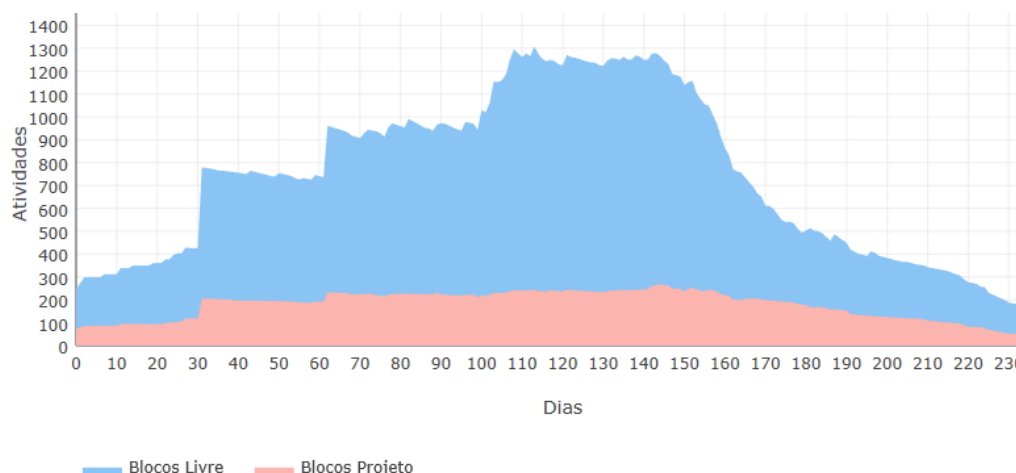


Figura 20 - Concentração de blocos ao longo do horizonte

Ao comparar os gráficos da Figura 18 e da Figura 20, podemos observar que a curva de concentração de blocos, tanto de combinação livre quanto na formação por projetos, apresenta distribuição similar à curva de disponibilidade de PLSVs, com menos possibilidades com janela disponível nos extremos do horizonte, enquanto na parte central ocorre aumento da quantidade de blocos e navios, ambas as curvas com picos a partir do período 100. Essa similaridade das curvas é uma característica desejada para a base do problema, pois indica que nos períodos em que há a necessidade de atendimento do maior número de atividades existem mais embarcações disponíveis para que elas sejam alocadas.

5.2. Aplicação dos Modelos de Otimização

Os resultados foram gerados após execução do modelo utilizando uma máquina com um processador Intel Core i7-5960X CPU @ 3.00GHz, com 64 GB de memória DDR4 em um ambiente Windows 10 - 64 bits. Os modelos foram rodados no AIMMS v4.18 x64, utilizando como otimizador o GUROBI v.6.5.

Os dados de potencial e produção apresentados nesta seção foram baseados nos dados reais da Petrobras, porém modificados a fim de garantir a descaracterização das informações e o sigilo dos dados da companhia.

Como referência para comparação das soluções obtidas pelo modelo, foi elaborada uma programação por especialistas da área de planejamento da empresa, de maneira manual, simulando o processo de construção do cronograma que vigora na companhia atualmente. A solução encontrada desta forma apontou para uma produção potencial de 13,7 unidades de produção de óleo ao longo do horizonte de

planejamento. É importante destacar que, devido à complexidade de se realizar uma programação deste porte manualmente, é comum que os programadores façam o planejamento aceitando a relaxação de algumas restrições, que são corrigidas somente na programação operacional de curto prazo. Desta forma, a solução obtida por esta forma pode não ser viável para o modelo construído, sob a rigidez de suas restrições matemáticas.

A entrada dos poços em produção ao longo dos meses para a solução dos especialistas é retratada na Figura 21, indicando como esta produção potencial seria construída ao longo do período programado, caso o planejamento fosse executado fielmente.



Figura 21 - Produção acumulada da solução manual

A aplicação dos modelos ao problema da empresa foi feita de acordo com as mesmas estratégias aplicadas ao exemplo da seção 4.3. Como critério de parada, determinou-se o tempo máximo de execução de 15 horas após dar-se início a resolução do modelo da Fase 2, visando comparar os resultados sob o mesmo tempo de execução destinado a maximizar o óleo produzido. Desta forma, o tempo de execução da Fase 1, que varia em torno de 5 a 15 minutos de acordo com cada caso, não é considerado nos tempos aqui apresentados.

Na Estratégia 1, foram executados os modelos Minimizar utilização do PLSV Fictício e Maximizar Óleo, em sequência. Inicialmente, foi permitido ao modelo utilizar todos os blocos construídos livremente no procedimento de geração de blocos previamente apresentado. A solução para esta estratégia, obtida após um tempo máximo de execução permitido de 15 horas, encontrou uma produção potencial de 16,4 unidades de produção. Com este tempo de execução, a

otimalidade da solução ainda não pode ser garantida. A resolução foi encerrada com um limite superior de 17,2 unidades de produção, caracterizando um Gap de 4,5%, como pode ser observado na Figura 22, que mostra a evolução da qualidade da solução do modelo, em termos de produção de óleo, de acordo com o tempo de resolução.

Essa solução, porém, apontou para a alocação de uma atividade de 11 dias de duração no navio fictício, indicando que a alocação de todas as atividades na frota física de navios disponível na empresa, de maneira a cumprir todas as datas de compromisso e restrições operacionais, é de execução inviável. A alocação no navio fictício não considera a atividade executada de fato, portanto um dos poços não é considerado concluído. Para executar essa atividade a empresa passa a contar com duas opções: readequar a frota, obtendo um PLSV extra, ou permitir a flexibilização das datas de compromisso dos poços, de maneira que pequenos atrasos passam a ser aceitos.

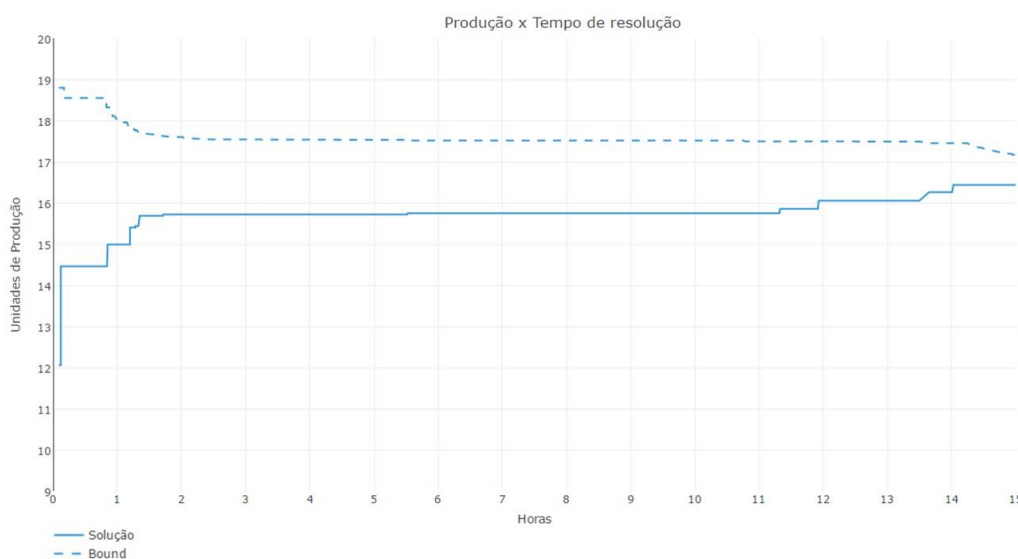


Figura 22 - Evolução da solução pela Estratégia 1

Devido ao alto custo de se adquirir um PLSV, seja para a frota fixa, seja para um contrato temporário, permitir pequenos atrasos na conclusão de alguns poços tende a ser a solução mais adequada economicamente, principalmente quando o número de atividades alocadas ao PLSV fictício for baixo.

Dessa forma, para verificar a viabilidade de atender todas as atividades na frota disponível, permitindo pequenos atrasos, foi aplicada a Estratégia 2 de resolução para a instância da empresa, com a execução dos modelos Minimizar

Atraso e Maximizar Óleo, em sequência. O atraso máximo permitido para cada poço foi de 30 dias.

A solução obtida pelo modelo que minimiza o atraso encontrou a necessidade de um atraso total de apenas dois dias em uma única atividade de interligação para permitir a viabilidade de alocação de todas as demais atividades dentro das suas respectivas janelas. O bloco alocado com esta atividade teve, então, sua janela alterada para permitir este atraso no modelo que maximiza o óleo potencial produzido.

A resolução do modelo, no tempo máximo permitido de 15 horas, encontrou uma solução com previsão de produção de 16,1 unidades de produção de óleo. Com este tempo de execução, a otimalidade da solução ainda não pode ser garantida. A resolução foi encerrada com limite superior de 17,5 unidades de produção, caracterizando um Gap de 8,2%, como pode ser observado na Figura 23.

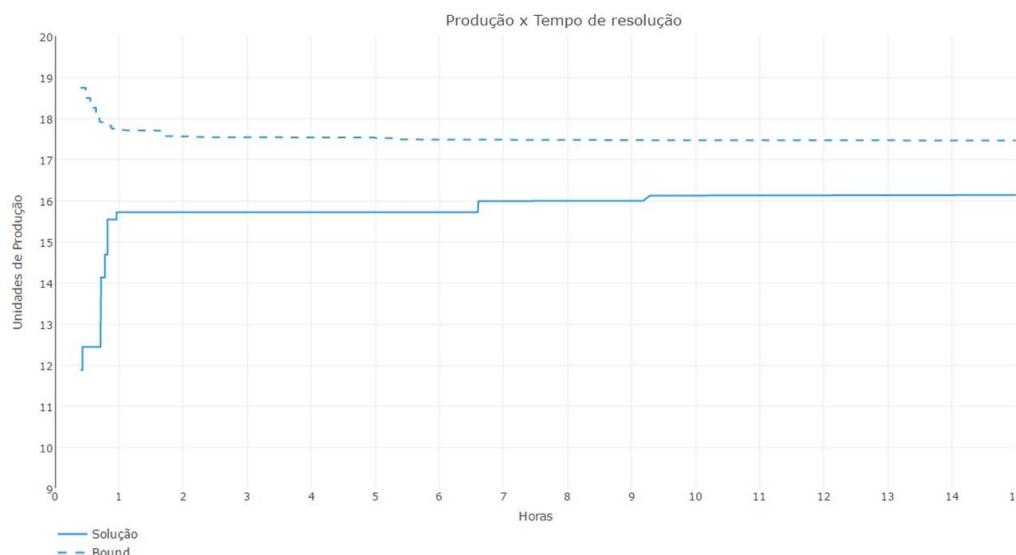


Figura 23 - Evolução da solução pela Estratégia 2

Também foram realizados testes alimentando o modelo apenas com o subconjunto de blocos formados apenas por atividades de poços que estão localizados fisicamente próximos, dentro de um mesmo projeto da empresa, visando avaliar a qualidade da solução construída e o rendimento do modelo ao ser alimentado de maneira mais restrita, com menos blocos. Para esta configuração também foram aplicadas as Estratégias 1 e 2 de resolução.

Para a Estratégia 1 a solução ótima foi obtida após a execução por 10,2 horas e encontrou uma produção potencial de 16,7 unidades de produção, conforme pode ser observado na Figura 24.

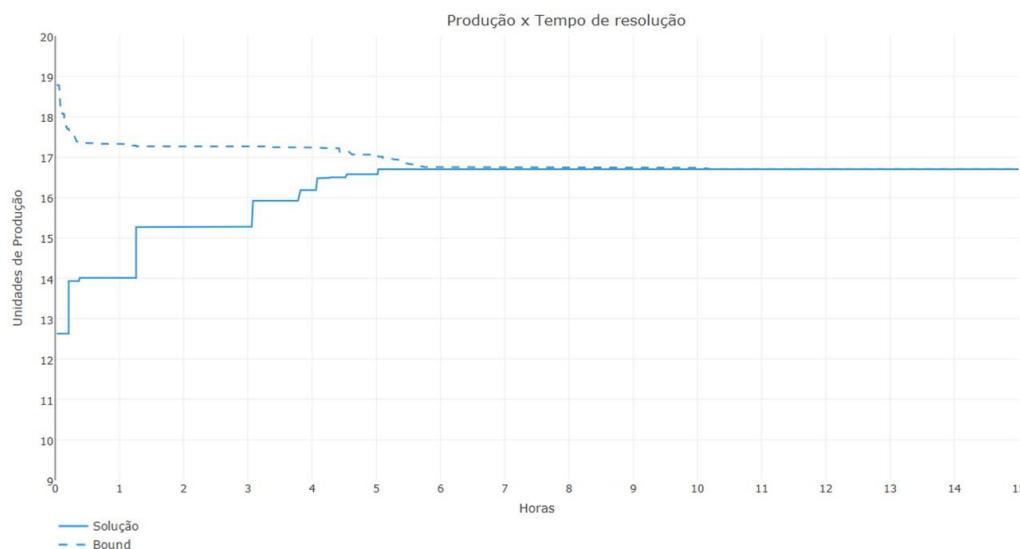


Figura 24 – Blocos por Projeto: evolução da solução pela Estratégia 1

Essa solução apontou para a alocação de uma atividade de 14 dias de duração no navio fictício, mostrando que nessa configuração de blocos foram necessários 3 dias a mais de utilização deste navio. Essa duração, embora maior, também foi obtida com a alocação de apenas uma atividade a este navio.

Para verificar a viabilidade de atender todas as atividades na frota disponível, permitindo pequenos atrasos, foi aplicada a Estratégia 2 de resolução para a instância da empresa, com a execução dos modelos Minimizar Atraso e Maximizar Óleo, em sequência, permitindo apenas a alocação de blocos com atividades de um mesmo projeto. O atraso máximo permitido para cada poço foi de 30 dias.

A solução obtida pelo modelo que minimiza o atraso, assim como na resolução com todos os blocos disponíveis, encontrou a necessidade de um atraso total de apenas dois dias em uma única atividade de interligação para permitir a viabilidade de alocação de todas as demais atividades dentro das suas respectivas janelas.

A resolução do modelo, no tempo máximo permitido de 15 horas, encontrou uma solução com previsão de produção de 16,6 unidades de produção de óleo. Com este tempo de execução, a otimalidade da solução ainda não pode ser garantida. A resolução foi encerrada com limite superior de 16,7 unidades de produção, caracterizando um Gap de 0,6%, como pode ser observado na Figura 25.

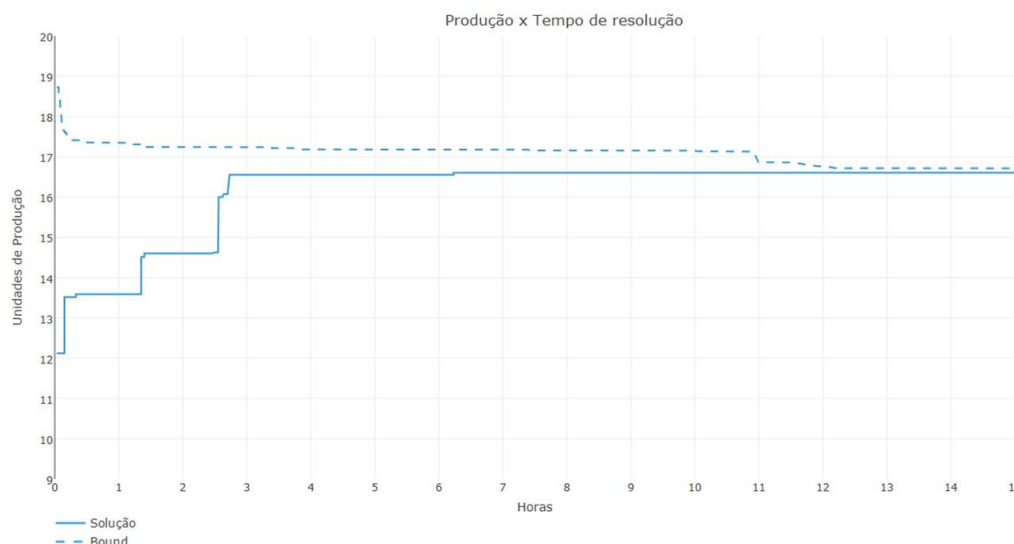


Figura 25 – Blocos por Projeto: evolução da solução pela Estratégia 2

Nota-se que, em ambas as estratégias de resolução, o modelo alimentado somente com blocos formados por atividades de um mesmo projeto desenvolveu-se melhor ao longo do tempo, encontrando solução ótima ou de Gap reduzido dentro do tempo de execução proposto. Além disso, mesmo apresentando opções mais restritas de construção de viagens, a resolução por estes blocos permitiu encontrar soluções de qualidade superior em termos de óleo produzido (1,8% acima na Estratégia 1 e 3,1% na Estratégia 2), devido a menor complexidade na resolução do modelo.

O atraso de dois dias na atividade que não havia sido alocada na Estratégia 1 permitiu uma realocação de atividades que tornou viável a programação de toda a demanda dentro da frota física da empresa, com um impacto de reduzir a produção potencial em 0,1 unidades de produção de óleo. A entrada em produção dos poços ao longo do período de planejamento, de acordo com esta solução, é retratada na Figura 26, em comparação com a solução gerada manualmente.

Como pode ser observado, a programação manual gera um cronograma a partir do qual a produção é ligeiramente maior nos dois primeiros meses do horizonte de planejamento, porém a qualidade da solução gerada pelo modelo se impõe, gerando mais óleo acumulado a partir do terceiro mês até o fim do horizonte, onde se apresenta com uma produção 21,5% maior quando comparada com a solução gerada manualmente.

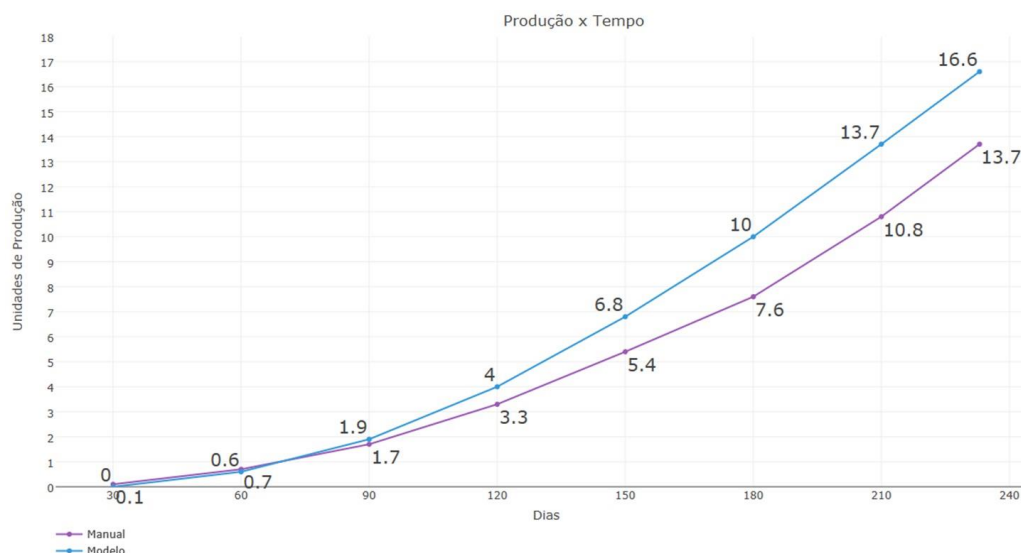


Figura 26 - Comparação de produção acumulada (Modelo x Manual)

A solução proposta pelo modelo matemático apresentou uma ocupação média de 96,5% da frota disponível. A alta utilização dos navios mostra que, neste cenário apresentado pela companhia, não há muito espaço de folga para a alocação das atividades ou para absorver possíveis mudanças e atrasos que podem ocorrer na execução operacional do cronograma proposto. A Figura 27 apresenta um gráfico de ocupação da frota disponível ao longo do período de planejamento, onde nota-se que a frota é utilizada em sua totalidade na maioria dos períodos. Os períodos de ociosidade são representados pelas áreas não preenchidas abaixo da linha de disponibilidade de PLSVs.

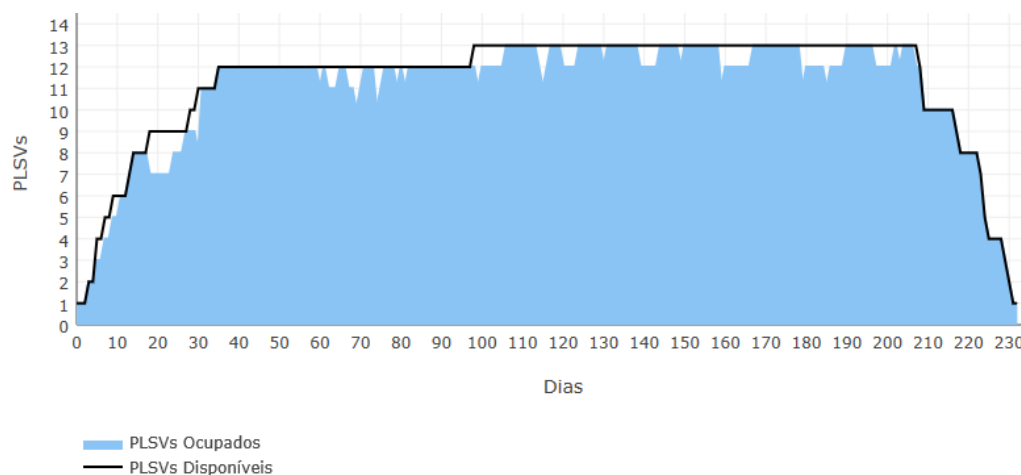


Figura 27 - Ocupação dos navios PLSVs ao longo do horizonte

A alocação de blocos, gerada de maneira otimizada pelo modelo, permite a construção de cronogramas de realização de atividades, o cronograma gerado para a solução da Estratégia 2 é apresentado na

Figura 28.

Ainda em relação ao cronograma gerado, na Figura 29 é destacada desta solução a alocação de um poço específico para representar a contribuição da modelagem proposta em relação às existentes na literatura. As 4 atividades relacionadas ao Poço 21 puderam ser realizadas por diferentes navios, com um máximo de 2 atividades em paralelo. Desta forma, foi possível completar o poço executando todas as atividades em um período de 32 dias, enquanto que nas abordagens da literatura, em que todas as atividades seriam realizadas em sequência, por um mesmo navio, seriam necessários no mínimo 48 dias de execução de atividades. Desta forma, geram-se mais opções de alocação e a conclusão do poço pode ser antecipada, bem como a produção de óleo e os ganhos correspondentes.

Um cronograma gerado a partir da solução do modelo apresenta as vantagens de ser obtido automaticamente, com garantia de respeito às restrições operacionais, da escolha de uma das melhores combinações de atividades possíveis dentro da frota disponível e da viabilidade de execução dentro das premissas consideradas na construção da solução.

Além disso, na geração automática são evitados equívocos que podem ocorrer no tratamento manual do cronograma, como erros de cálculo na duração das atividades, construção de viagens indevidas e escolhas que ferem a regra de aptidão dos navios na realização das atividades.

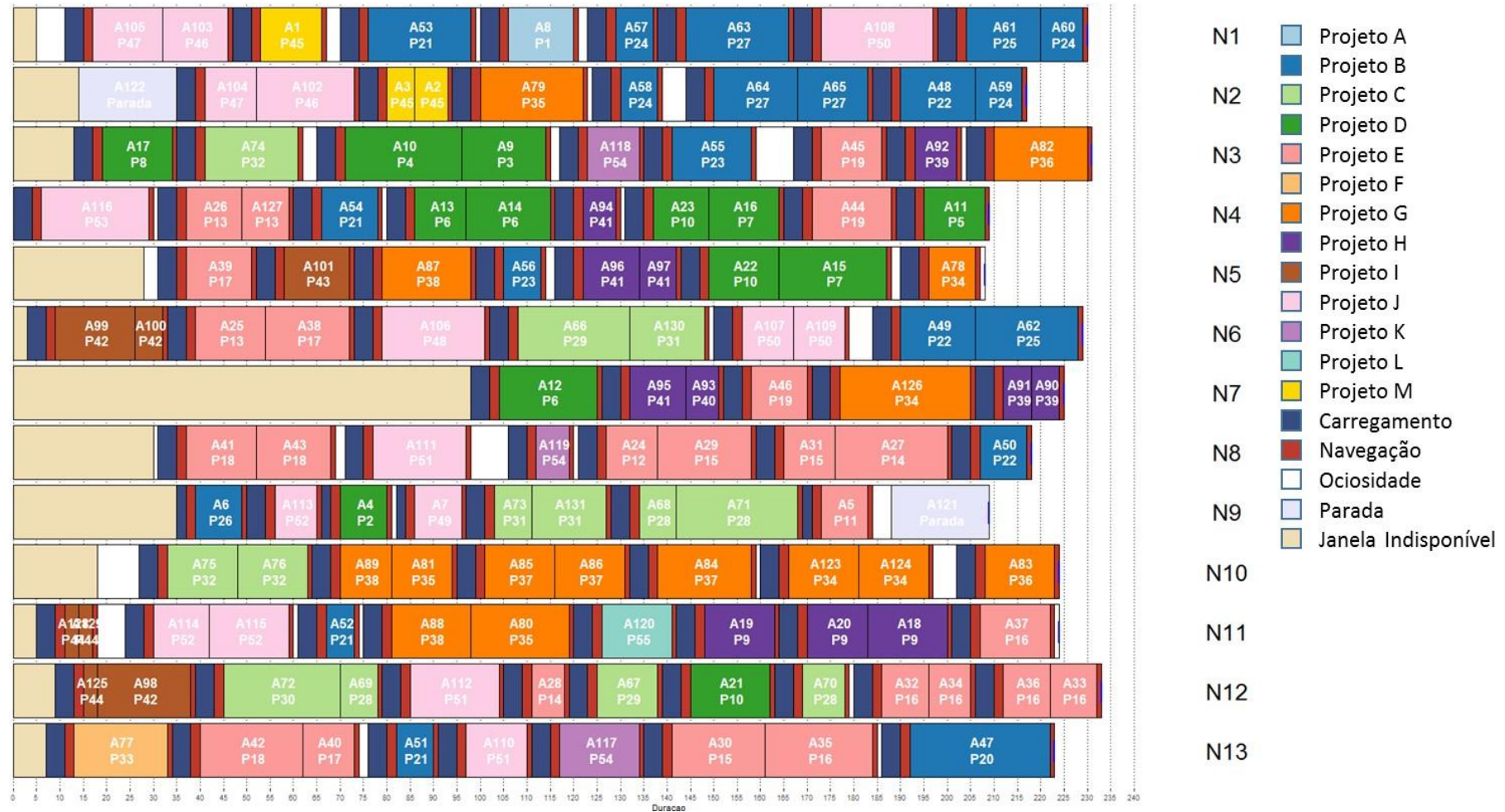


Figura 28 - Cronograma gerado a partir da solução do modelo

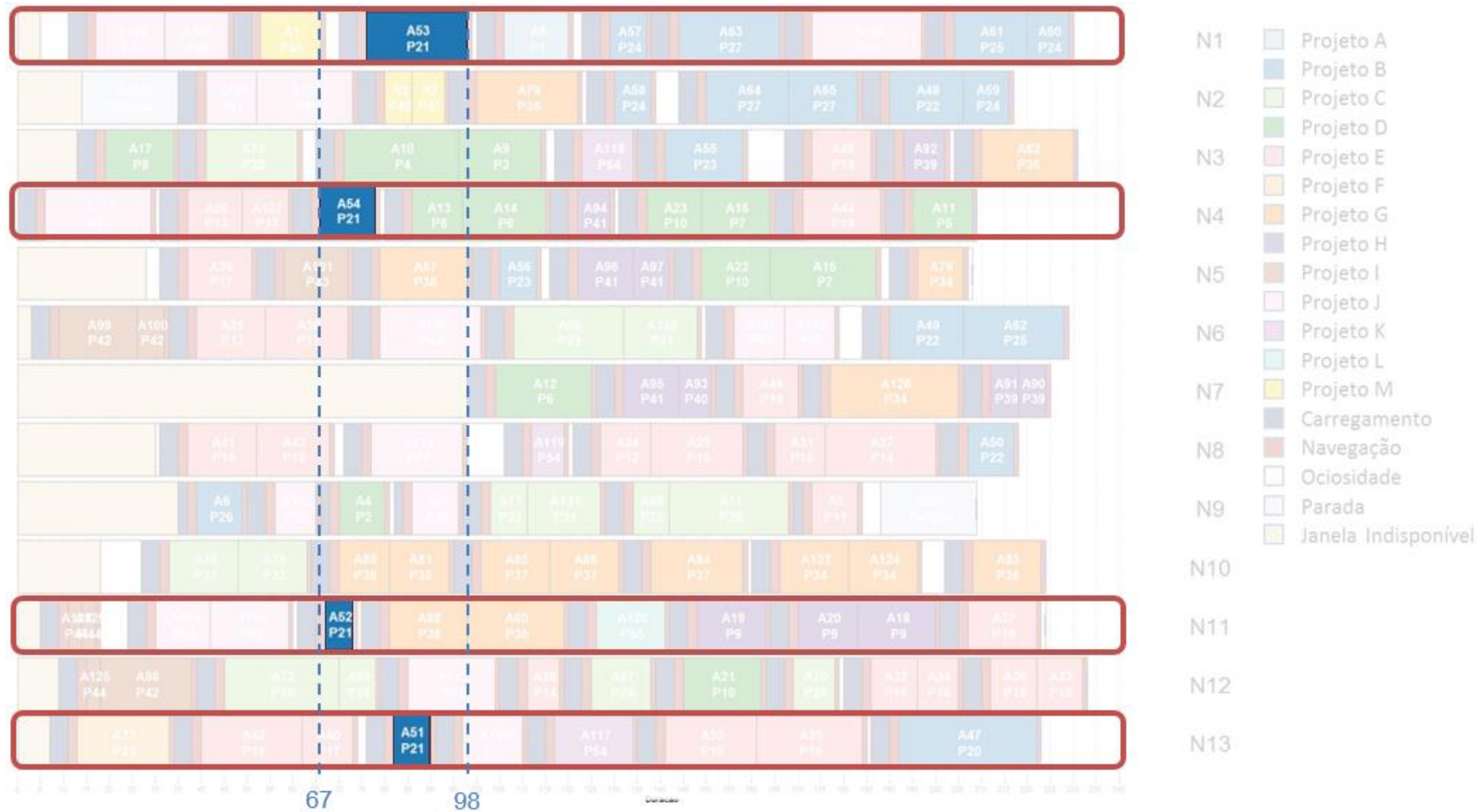


Figura 29 - Exemplo de Poço com atividades em paralelo

5.3.

Análise de sensibilidade do modelo

A fim de analisar o comportamento do modelo na resolução de outros conjuntos de dados foram criados, a partir de variações da instância do problema original, alguns cenários controlados para serem testados.

5.3.1.

Cenário 1

O primeiro cenário de testes foi construído de maneira a manter características do problema original, sem alteração no número de atividades e na quantidade de poços produtores, porém realizando perturbações na duração das atividades e alterando quais eram os 15 poços produtores, de forma que as atividades que o modelo passa a tentar antecipar em sua alocação são distintas em relação ao modelo original.

Para gerar os novos dados de duração, todas as 131 atividades tiveram o seu parâmetro de duração perturbado, aumentando ou reduzindo o seu valor em um percentual de 0 a 30%, escolhido aleatoriamente. Como o modelo é discretizado em períodos, sempre que a nova duração resultou em um número não inteiro, seu valor foi arredondado para cima.

A escolha dos 15 poços produtores foi feita aleatoriamente dentre o conjunto de 55 poços apresentados no problema original. O valor do potencial de produção diário de cada um deles foi calculado a partir da média do potencial dos poços do problema original, com valor aumentado ou reduzido em um fator de 0 a 30%, escolhido aleatoriamente.

Dessa forma, a duração total das atividades a serem programadas foi alterada de 1892 dias para 1885 dias e o potencial total de produção de óleo também foi pouco alterado, com acréscimo de 0,8% unidades de produção no potencial diário total, simulando uma nova carga de dados para o problema. Os testes foram realizados seguindo as Estratégias 1 e 2 de resolução, assim como no problema original, e os resultados do comportamento do modelo são apresentados na Figura 30 e na Figura 31.

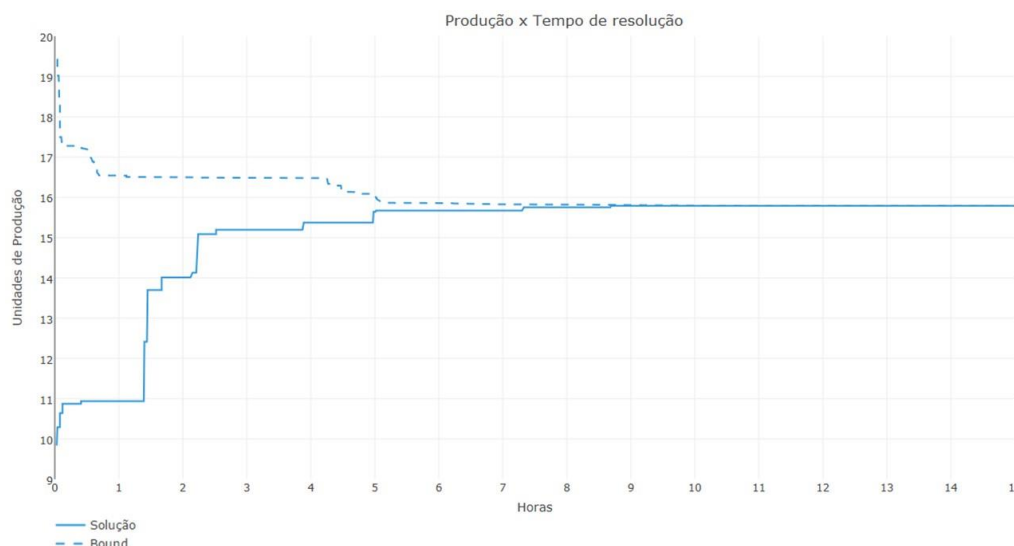


Figura 30 – Cenário 1 - Evolução da solução pela Estratégia 1

A resolução deste cenário pela Estratégia 1 pode ser realizada com a alocação de duas atividades ao PLSV fictício, com duração total de 23 dias. Como pode ser observado, a evolução da qualidade da solução apresentou comportamento muito similar à resolução do conjunto de dados original, obtendo uma solução com GAP menor do que 2% em 5 horas e uma solução ótima com pouco mais de 10 horas de resolução.

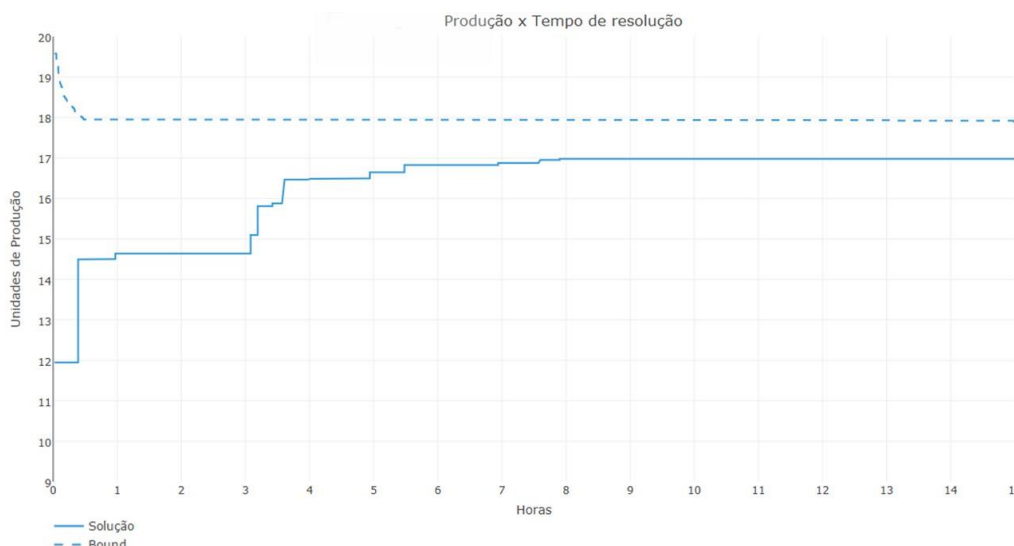


Figura 31 – Cenário 1 - Evolução da solução pela Estratégia 2

Na resolução pela Estratégia 2, para que fosse possível alocar todas as atividades na frota disponível, foram necessários 11 dias de atraso total, distribuídos por duas atividades. A evolução da qualidade da solução, assim como no cenário original, não encontrou solução que se possa garantir a otimalidade nas 15 horas destinadas à execução do modelo, finalizando com um GAP de 5,31%.

Neste caso, a resolução pela Estratégia 2 teve um ganho substancial na quantidade de óleo produzido em relação à Estratégia 1, devido ao atraso permitir a adição de atividade de poço produtor que havia sido alocada anteriormente ao navio fictício. Apesar de não garantir a otimalidade, o modelo se mostra como uma boa ferramenta já que em pouco mais de três horas, foi obtida uma solução com atraso permitido, viável e de acordo com as premissas da companhia, que já era superior em óleo à solução ótima apresentada pela Estratégia 1 após dez horas. O resumo comparativo dos resultados deste cenário pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultados do Cenário 1

	Cenário Original	Cenário 1
Características	15 poços produtores (27,3%) 1892 dias de atividades	15 poços produtores (27,3%) 1885 dias de atividade
Estratégia 1	14 dias no PLSV fictício Solução: 16,7 un. Limite Superior: 16,7 un. Gap: 0%	23 dias no PLSV fictício Solução: 15,8 un. Limite Superior: 15,8 un. Gap: 0%
Estratégia 2	2 dias de atraso total Solução: 16,6 un. Limite Superior: 16,7 un. Gap: 0,6%	11 dias de atraso total Solução: 17,0 un. Limite Superior: 17,9 un. Gap: 5,31%

5.3.2. Cenário 2

O segundo cenário de testes foi construído de maneira a aumentar a quantidade de poços com potencial de produção em relação ao cenário original, modificando a proporção entre poços produtores e não produtores da base de dados com o intuito de permitir a análise do desenvolvimento da qualidade da solução quando mais atividades estão disputando para serem alocadas o mais cedo possível.

Este cenário manteve as características das atividades do cenário original, com as mesmas durações e janelas para a sua realização. A alteração foi realizada com a adição de potencial de produção em 5 poços, além dos 15 que já apresentavam esta característica. Assim, a proporção de poços com potencial de produção salta de 27,3% do problema original para 36,4% neste cenário. Os 5 poços foram escolhidos aleatoriamente, dentre os poços que ainda não possuíam potencial de produção, e assim como no Cenário 1, o valor a eles atribuído foi calculado a partir da média do potencial dos poços do problema original, com valor acrescido ou reduzido em um fator de 0 a 30%, escolhido aleatoriamente.

Dessa forma, a duração total das atividades a serem programadas se manteve em 1892 dias e o potencial total de produção de óleo por dia teve um acréscimo de 28,3%, simulando uma nova carga de dados para o problema. Os testes foram realizados seguindo as Estratégias 1 e 2 de resolução, assim como no problema original, e os resultados do comportamento do modelo são apresentados na Figura 32 e na Figura 33.

Como os dados relacionados às atividades são os mesmos do problema original, foram necessários 14 dias de atividades alocadas ao PLSV fictício para que a solução pela Estratégia 1 fosse possível. A evolução da qualidade da solução ao longo do tempo de execução neste cenário, apresentou comportamento semelhante aos outros cenários já avaliados, com grande evolução do valor da função objetivo nas primeiras 5 horas de execução, apresentando pequenas melhorias no restante do tempo.

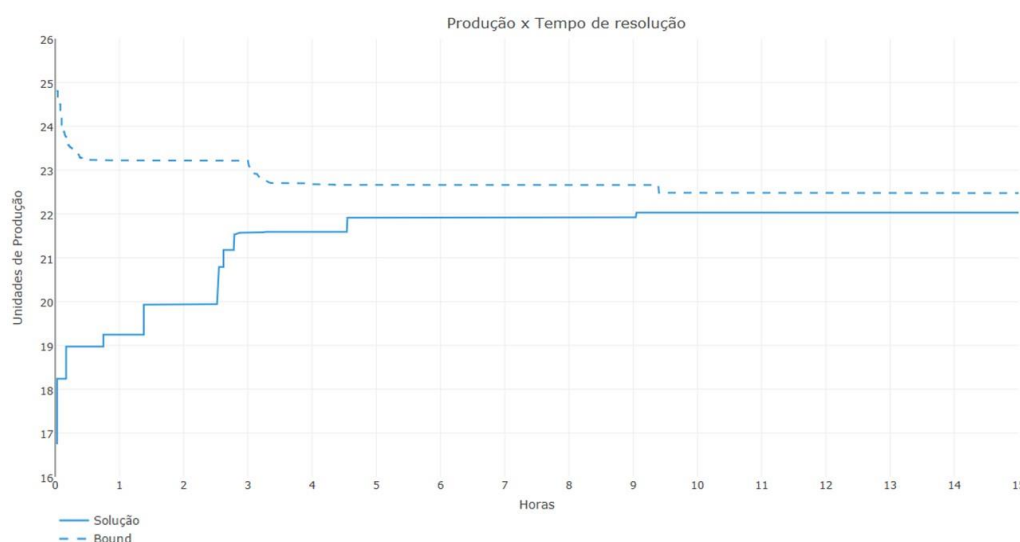


Figura 32 - Cenário 2 - Evolução da solução pela Estratégia 1

Neste caso, porém, o modelo não obteve solução ótima nas 15 horas de execução a ele destinadas, encerrando com um Gap de 2,0% e indicando que aumentar a proporção de poços produtores tende a dificultar a resolução do modelo, devido ao maior número de atividades capazes de interferir na função objetivo que devem ser a sua alocação antecipada.

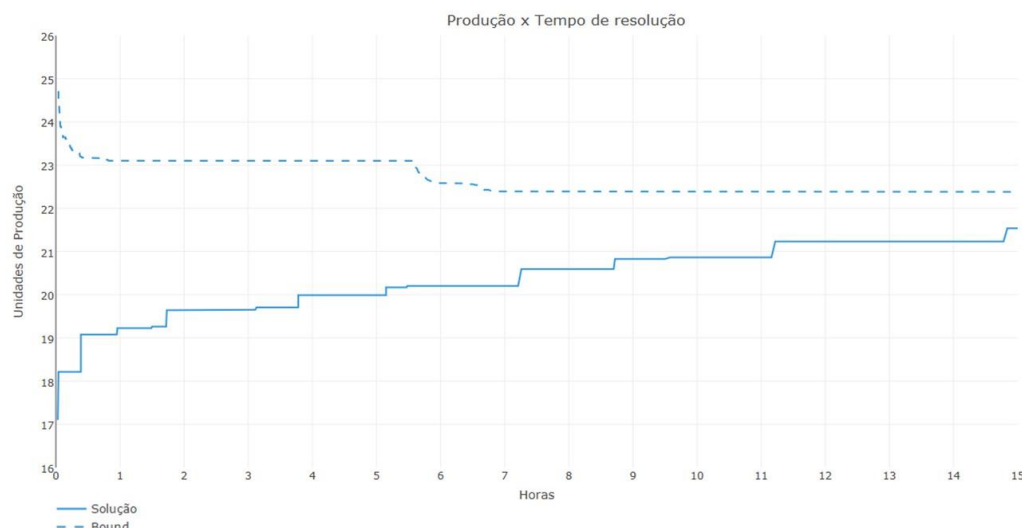


Figura 33 - Cenário 2 - Evolução da solução pela Estratégia 2

A análise da evolução da solução pela Estratégia 2, através da Figura 33, mostra que neste cenário houve maior dificuldade em encontrar soluções que aumentassem o valor da função objetivo ao longo do tempo. Enquanto nos outros cenários houve uma grande evolução nas 3 primeiras horas e pequenas melhorias no restante da execução, no Cenário 2 a evolução nas primeiras horas foi pouco expressiva, mas as melhorias se mantiveram ao longo de todo o tempo de execução, encerrando com um Gap de 3,92% após as 15 horas destinadas à resolução do modelo, alocando todas as atividades com a necessidade de atraso de apenas 2 dias. O resumo comparativo dos resultados deste cenário é apresentado na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultados do Cenário 2

	Cenário Original	Cenário 2
Características	15 poços produtores (27,3%) 1892 dias de atividades	20 poços produtores (36,4%) 1892 dias de atividade
Estratégia 1	14 dias no PLSV fictício Solução: 16,7 un. Limite Superior: 16,7 un. Gap: 0%	14 dias no PLSV fictício Solução: 22,0 un. Limite Superior: 22,4 un. Gap: 2,0%
Estratégia 2	2 dias de atraso total Solução: 16,6 un. Limite Superior: 16,7 un. Gap: 0,6%	2 dias de atraso total Solução: 21,5 un. Limite Superior: 22,3 un. Gap: 3,92%

5.3.3. Cenário 3

O terceiro cenário de testes foi construído de maneira a simular um caso em que a ocupação da frota esteja menos comprometida do que o cenário original, cuja

alocação resultou em uma utilização média de 96,5% dos PLSVs disponíveis na empresa. Para isso, todas as 131 atividades tiveram o seu parâmetro de duração perturbado, reduzindo o seu valor em um percentual de 0 a 20%, escolhido aleatoriamente. Como o modelo é discretizado em dias, sempre que a nova duração resultou em um número não inteiro, seu valor foi arredondado para cima.

Com isso, cria-se um cenário em que as atividades possuem mais posições para serem alocadas, já que possuem a mesma janela e uma duração menor. Após as mudanças, a duração total das atividades foi alterada de 1892 dias para 1742 dias. A evolução da solução para este teste pode ser observada na Figura 34.

Neste caso, com a redução da duração das atividades, foi possível realizar toda a alocação dentro da frota física, sem a necessidade de utilizar o navio fictício nem de atrasar a realização das atividades em relação à sua data de compromisso. Os modelos iniciais, então, atuam na obtenção de uma solução inicial para o modelo que visa maximizar o óleo potencial produzido. A alocação resultante ao fim das 15 horas de execução do modelo se apresentou com uma utilização de 92,7% dos PLSVs disponíveis.

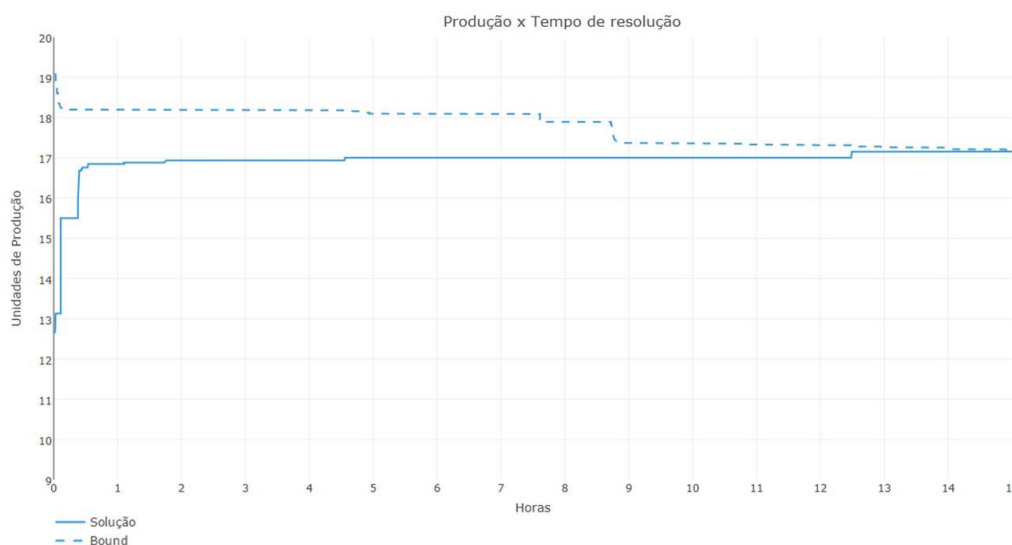


Figura 34 - Cenário 3 - Evolução da solução

Ao comparar com a resolução do problema original pela Estratégia 2, na qual todas as atividades foram alocadas na frota física da empresa, pode-se observar que a maior liberdade de alocação provocada pela redução da duração das atividades permitiu ao modelo encontrar soluções muito boas em pouco tempo, tendo a maior parte da evolução da função objetivo ficado concentrada na primeira hora de execução. A partir deste tempo, foram obtidas pequenas melhorias e o Gap foi sendo reduzido principalmente por redução do limite superior no desenvolvimento

no modelo, até que a otimalidade da solução pode ser garantida com 15 horas de processamento.

Dessa forma, nota-se que um pequeno incremento nas possibilidades de alocação, com um fator de folga nos PLSVs conferindo maior liberdade nas janelas das atividades resultou em um melhor desenvolvimento da qualidade de solução do modelo. O resumo comparativo dos resultados deste cenário pode ser observado na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados do Cenário 3

	Cenário Original	Cenário 3
Características	15 poços produtores (27,3%)	15 poços produtores (27,3%)
	1892 dias de atividades	1742 dias de atividade
Estratégia 2	2 dias de atraso total	0 dias de atraso
	Solução: 16,6 un.	Solução: 17,2 un.
	Limite Superior: 16,7 un.	Limite Superior: 17,2 un.
	Gap: 0,6%	Gap: 0,0%
	Utilização: 96,5%	Utilização: 92,7%

6 Conclusão

Esta dissertação teve o objetivo de mapear o problema de programação de atividades de interligação de poços submarinos, enfrentado pela Petrobras, e desenvolver um modelo de programação matemática capaz de alocar e sequenciar as atividades em embarcações do tipo PLSV, de forma a maximizar a produção de óleo acumulada durante o horizonte de planejamento.

Visando contemplar a realidade da empresa estudada, a abordagem aqui utilizada contribui para o desenvolvimento do estudo do problema de programação de PLSVs, estendendo o tratamento presente na literatura para além de simplificações que tornam o problema não aderente à realidade. Novas restrições foram adicionadas no intuito de permitir que as atividades relativas a um poço possam ser programadas em momentos distintos do horizonte de planejamento e também em PLSVs diferentes, desde que respeitadas as restrições operacionais.

O método de resolução utilizado, com a realização de um pré-processamento no qual são geradas as possibilidades de viagens adequadas ao problema, permitiu que restrições fossem tratadas previamente à execução do modelo e que somente possibilidades viáveis de composição de viagem fossem testadas, se mostrando viável como opção para redução de complexidade do modelo construído, permitindo a obtenção de boas soluções através da otimização.

Os resultados mostraram que a utilização de blocos compostos apenas por atividades relacionadas a poços de um mesmo projeto, embora limite o modelo de maneira mais restrita, foi capaz de gerar soluções de qualidade superior à utilização de blocos de combinação livre dentro do tempo de execução proposto, demonstrando que a preocupação com a redução da complexidade do modelo é importante para permitir a evolução da solução de maneira mais eficiente.

A análise dos resultados aponta que o modelo se mostra sensível quanto a mudanças nos dados de entrada, tendo a qualidade de solução evoluído de maneira mais fácil quando há maior folga na disponibilidade de PLSV e encontrado maior

difficuldade com o aumento do percentual de poços com potencial de produção. Devido à esta sensibilidade, é importante que o modelo seja alimentado com dados precisos da companhia, restringindo as janelas de acordo com as restrições operacionais e com dados de qualidade quanto à aptidão dos navios para a realização de atividades, de maneira a evitar um crescimento desnecessário do porte do modelo, e consequente aumento de dificuldade de resolução, bem como a realização de um planejamento que futuramente possa se mostrar inviável operacionalmente.

Os resultados obtidos apontam que o modelo desenvolvido se mostrou capaz de gerar, em algumas horas de processamento, soluções de execução viável de acordo com as premissas adotadas no projeto, de maneira competitiva ou superior em até 21,5% em termos de produção de óleo, quando comparada com a solução construída de maneira similar à atualmente adotada na empresa. Mesmo em cenários de resolução mais complexa, foram obtidos resultados satisfatórios e, desta forma, o modelo se caracteriza como ferramenta de apoio a decisão capaz de dar importantes contribuições na construção do planejamento.

Além disso, o modelo permite verificar a qualidade de uma solução construída com diferentes cenários apenas com mudanças nos dados de entrada ou pequenas alterações no procedimento de geração de blocos. Desta forma, o planejador pode ter em mãos cronogramas construídos, por exemplo, com a adição de PLSVs extras, permitindo atraso somente em atividades de poços específicos, exigindo a realização de atividades por navios específicos ou construindo viagens de acordo com regras mais (ou menos) restritas, permitindo a tomada de decisão de maneira mais embasada e segura.

6.1.

Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos futuros relacionados à programação de atividades de interligação em PLSVs destacam-se:

- Aplicação prática da ferramenta no processo de planejamento da empresa e medição dos benefícios obtidos;

- Consideração de relação de dependência entre poços injetores e poços produtores, de maneira que a produção de um poço com potencial seja considerada apenas após a conclusão dos poços injetores a ele associados;
- Desenvolvimento de solução por heurísticas, visando obter resultados de qualidade em menor tempo de processamento e permitir maior flexibilidade no processo de planejamento;
- Estudo para propor uma nova modelagem que considere aspectos operacionais do problema para uma programação de curto prazo, como a disponibilidade limitada de berços no porto e dados de capacidade exata de carregamento;
- Consideração de aspectos estratégicos do problema de longo prazo, como dimensionamento de frota e incertezas quanto à disponibilidade das linhas e entrada de produção de poços,

Referências bibliográficas

ALVES, A. L. R. **Disponibilidade instantânea de poços submarinos durante a fase de produção - Visão de segurança operacional**. 2012. 157f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2012.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis**. Rio de Janeiro: ANP, 2015.

BAI, Y.; BAI, Q. **Subsea Structural Engineering Handbook**. Burlington – MA: Elsevier, 2010.

BARBOZA, L. da S. **Pipe laying support vessel - PLSV Medusa**. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2015/Luanda/relat1/plsv_luanda_rell.htm>. 2015. Acesso em: 12 jul. 2016.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BILYK, A.; MÔNCH, L.; ALMEDER, C. Scheduling jobs with ready times and precedence constraints on parallel batch machines using metaheuristics. **Computers & Industrial Engineering**, v. 78, p. 175-185, 2014.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. Maritime transportation. **Handbooks in Operations Research and Management Science**, v. 14, p. 189-284, 2007.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; NYGREEN, B.; RONEN, D. Ship routing and scheduling in the new millennium. **European Journal of Operational Research**, v. 228, n. 3, p. 467-483, 2013.

CHRISTIANSEN, M.; FAGERHOLT, K.; RONEN, D. Ship routing and scheduling: status and perspectives. **Transportation Science**, v. 38, n. 1, p. 1-18, 2004.

CORTAT, E.; VIEIRA, V. **Projeto de navio III - Pipe laying vessel**. Disponível em: <http://www.oceanica.ufrj.br/deno/prod_academic/relatorios/2006-/Eduardo+Vinicius/relat1/Relatorio%20I.htm>. 2006. Acesso em: 25 out. 2016.

DEVOLD, H. **Oil and gas production handbook: an introduction to oil and gas production, transport, refining and petrochemical industry**. 3. ed. Oslo: ABB Oil and Gas, 2013.

EIA – U.S. Energy Information Administration. **Liquid fuels and natural gas in the Americas**. U.S. Department of Energy, Washington DC, 2014.

FERREIRA, C. V. **Manipulador semi-passivo para apoiar as atividades de veículos submarinos autônomos na indústria de óleo e gás em águas profundas e ultra-profundas**. 2006. 148p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2006.

FMC Technologies. **Petrobras roncador**. Disponível em: <<http://www.fmctechnologies.com/en/SubseaSystems/GlobalProjects/South%20America/Brazil/PetrobrasRoncador.aspx>>. 2016. Acesso em: 25 out. 2016.

GOKHALE, R.; MATHIRAJAN, M. Scheduling identical parallel machines with machine eligibility restrictions to minimize total weighted flowtime in automobile gear manufacturing. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 60, n. 9-12, p. 1099-1110, 2012.

KAO, C.; LEE, H. T. Discrete time parallel-machine scheduling: a case of ship scheduling. **Engineering Optimization**, v. 26, n. 4, p. 287-294, 1996.

KHAN, M. I.; ISLAM, M. R. **The petroleum engineering handbook: sustainable operations**. Houston: Gulf Publishing Company, 2007.

JANIAK, A.; JANIAK, W. A.; KRYSIAK, T.; KWIATKOWSKI, T. A survey on scheduling problems with due windows. **European Journal of Operational Research**, v. 242, p. 347-357, 2015.

LABANCA, E. L. **Metodologia para a seleção de arranjos submarinos baseada na eficiência operacional**. 2005. 92p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2005.

LAM, K.; XING, W. New trends in parallel machine scheduling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 17, n. 3, p. 326-338, 1997.

LAWRENCE, S. A. **International sea transport: the years ahead**. Massachusetts: Lexington Books, 1972.

LIAO, C. J.; CHAO, C. W.; CHEN, L. C. An improved heuristic for parallel machine weighted flowtime scheduling with family set-up times. **Computers & Mathematics with Applications**, v. 63, n. 1, p. 110-117, 2012.

LIMA, H. F. **Metodologia para a tomada de decisão no projeto de sistemas submarinos de produção de óleo e gás**. 2007. 169p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Oceânica) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2007.

MAGALHÃES, A. S.; DOMINGUES, E. P. Blessing or course: Impacts of the Brazilian pre-salt oil exploration. **Economia**, v. 15, n. 3, p. 343-362, 2014.

MELLOULI, R.; SADFI, C.; CHU, C.; KACEM, I. Identical parallel-machine scheduling under availability constraints to minimize the sum of completion times. **European Journal of Operational Research**, v. 197, n. 3, p. 1150-1165, 2009.

MITROFF, I. I.; BETZ, F.; PONDY, L. R.; SAGASTI, F. On managing science in the systems age: two schemas for the study of science as a whole systems phenomenon. **Interfaces**, v. 4, n. 3, p. 46-58, 1974.

MORAIS, J. M. de. **Petróleo em águas profundas: uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção offshore**. Brasília: R C IPEA: Petrobras, 2013.

MOREIRA, J. R.; PACCA, S. A.; PARENTE, V. The future of oil and bioethanol in Brazil. **Energy Policy**, v. 65, p. 7-15, 2014.

MORENO-TREJO, J.; KUMAR, R.; MARKESET, T. Mapping factors influencing the selection of subsea petroleum production systems: a case study. **International Journal of System Assurance Engineering and Management**, v. 3, n. 1, p. 6-16, 2012.

MOURA, V. C. **Programação de frota de embarcações de lançamento de dutos**. 2012. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Naval e Oceânica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP, São Paulo, SP. 2012.

PETROBRAS. **Instalação e manuseio de dutos flexíveis e umbilicais submarinos: recursos navais utilizados**. Agosto de 2014. 22f. Notas de aula curso Petrobras. Slides.

QUEIROZ, M. M.; MENDES, A. B. Heuristic approach for solving a pipe layer fleet scheduling problem. In: RIZZUTO, E.; SOARES, C. G. (Eds.) **Sustainable maritime transportation and exploitation of sea resources**. Londres: Taylor & Francis Group, 2012. p. 1073-1080.

RODRIGUES, L. A.; SAUER, I. L. Exploratory assessment of the economic gains of a pre-salt oil field in Brazil. **Energy Policy**, v. 87, p. 486-495, 2015.

RONEN, D. Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems. **European Journal of Operational Research**, v. 12, n. 2, p. 119-126, 1983.

RONEN, D. Ships scheduling: The last decade. **European Journal of Operational Research**, v. 71, n. 3, p. 325-333, 1993.

SABOUNI, M. Y.; JOLAI, F.; MANSOURI, A. Heuristics for minimizing total completion time and maximum lateness on identical parallel machines with setup times. **Journal of Intelligent Manufacturing**, v. 21, n. 4, p. 439-449, 2010.

SERPA, F. G. **Modelo de programação matemática para suporte à decisão na compra e distribuição de dutos e umbilicais**. 2012. 73f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção)

– Departamento de Engenharia Industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ. 2012.

SU, L. H. Scheduling on identical parallel machines to minimize total completion time with deadline and machine eligibility constraints. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 40, n. 5-6, p. 572-581, 2009.

THOMAS, J. E. (Org.) **Fundamentos da engenharia do petróleo**. Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração**. 9 ed. São Paulo: Atlas, 2007.

VERNALHA, F. C.; KADOUAKI, B. A.; MOURA, C. V.; CUNHA, V. C.; MENDES, A. B.; BRINATI, M. A. Programação de embarcações PLV em uma operação “offshore”. In: CONGRESSO NACIONAL DE TRANSPORTE AQUAVIÁRIO, CONSTRUÇÃO NAVAL E OFFSHORE, 22, 2008. Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Engenharia Naval – SOBENA, 2008.

APÊNDICE I – Dados do exemplo de aplicação dos modelos

Os dados de entrada utilizados na geração do exemplo de aplicação dos modelos são apresentados a seguir. A Tabela 6 apresenta os dados relacionados às atividades. A Tabela 7 apresenta as janelas de disponibilidade dos navios PLSV. A Tabela 8 apresenta o potencial dos poços utilizados no exemplo e a Tabela 9 apresenta o relacional entre navios e atividades, indicando quais são os navios aptos a realizar cada uma das tarefas que compõem a demanda a ser programada.

Tabela 6 - Dados de entrada relacionados às atividades

Atividade	JIA	JFA	Duração (dias)	Poço	Projeto
1	1	93	15	A	AB
2	23	73	20	B	AB
3	32	120	10	A	AB
4	32	120	24	B	AB
5	1	120	16	C	CDE
6	1	51	23	A	AB
7	32	120	11	C	CDE
8	32	120	11	D	CDE
9	63	98	19	B	AB
10	1	28	18	E	CDE
11	1	98	12	C	CDE
12	1	26	14	E	CDE
13	32	120	20	D	CDE
14	107	120	7	D	CDE
15	1	30	20	F	F
16	32	120	15	E	CDE
17	32	120	16	E	CDE
18	1	100	25	D	CDE
19	90	120	24	F	F
20	43	53	5	P	Parada

Tabela 7 - Dados de entrada relacionados aos Navios PLSVs

PLSV	JIN	JFN
N1	14	120
N2	1	120
N3	4	120
N4	29	120

Tabela 8 - Potencial dos Poços

Poço	PP
A	10
B	0
C	0
D	20
E	12
F	15

Tabela 9 - Navios aptos à realização das atividades

Atividade	PLSVs aptos
1	N1, N3, N4
2	N1, N2, N3, N4
3	N1, N2, N3, N4
4	N1, N2, N3, N4
5	N1, N3, N4
6	N1, N2, N3, N4
7	N1, N2, N3, N4
8	N1, N2, N3, N4
9	N1, N2, N3, N4
10	N1, N2, N3, N4
11	N1, N2, N3, N4
12	N1, N3, N4
13	N1, N2, N3, N4
14	N2, N3, N4
15	N1, N3, N4
16	N1, N2, N3, N4
17	N1, N2, N3, N4
18	N1, N2, N3, N4
19	N1, N2, N3, N4
20	N3

A aplicação do procedimento de geração de blocos para estes dados gera os blocos, juntamente com seus parâmetros de janela e duração, apresentados na Tabela 10. A coluna Projetos indica quando o bloco é composto somente por atividades pertencente a um mesmo projeto, caracterizando o subconjunto de blocos que foram efetivamente utilizados na aplicação do modelo e resolução do problema. Os parâmetros de IRP e FRP de cada poço dentro do bloco também são calculados e apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 – Blocos criados e seus parâmetros

b	a1	a2	IB	FB	DB	Projeto	b	a1	a2	IB	FB	DB	Projeto
1	1		1	94	22	Sim	44	3	8	32	120	28	
2	2		23	74	27	Sim	45	4	5	32	120	47	
3	3		32	120	17	Sim	46	4	7	32	120	42	
4	4		32	120	31	Sim	47	4	8	32	120	42	
5	5		1	120	23	Sim	48	5	7	32	120	34	Sim
6	6		1	52	30	Sim	49	5	8	32	120	34	Sim
7	7		32	120	18	Sim	50	6	1	1	67	45	Sim
8	8		32	120	18	Sim	51	6	2	23	72	50	Sim
9	9		63	99	26	Sim	52	6	5	1	68	46	
10	10		1	29	25	Sim	53	6	11	1	64	42	
11	11		1	99	19	Sim	54	6	18	1	77	55	
12	12		1	27	21	Sim	55	7	8	32	120	29	Sim
13	13		32	120	27	Sim	56	9	3	63	109	36	Sim
14	14		107	120	12	Sim	57	9	4	63	120	50	Sim
15	15		1	31	27	Sim	58	9	5	63	115	42	
16	16		32	120	22	Sim	59	9	7	63	110	37	
17	17		32	120	23	Sim	60	9	8	63	110	37	
18	18		1	101	32	Sim	61	9	13	63	119	46	
19	19		90	120	31	Sim	62	9	16	63	114	41	
20	1	3	32	104	32	Sim	63	9	17	63	115	42	
21	1	4	32	118	46	Sim	64	10	1	1	44	40	
22	1	5	1	110	38		65	10	5	1	45	41	Sim
23	1	7	32	105	33		66	10	6	1	52	48	
24	1	8	32	105	33		67	10	11	1	41	37	Sim
25	1	11	1	99	34		68	10	18	1	54	50	Sim
26	1	13	32	114	42		69	11	3	32	109	29	
27	1	16	32	109	37		70	11	4	32	120	43	
28	1	17	32	110	38		71	11	5	1	115	35	Sim
29	1	18	1	101	47		72	11	7	32	110	30	Sim
30	2	1	23	89	42	Sim	73	11	8	32	110	30	Sim
31	2	3	32	84	37	Sim	74	11	13	32	119	39	Sim
32	2	4	32	98	51	Sim	75	11	16	32	114	34	Sim
33	2	5	23	90	43		76	11	17	32	115	35	Sim
34	2	7	32	85	38		77	11	18	1	101	44	Sim
35	2	8	32	85	38		78	12	1	1	42	36	
36	2	11	23	86	39		79	12	5	1	43	37	Sim
37	2	13	32	94	47		80	12	6	1	50	44	
38	2	16	32	89	42		81	12	11	1	39	33	Sim
39	2	17	32	90	43		82	12	18	1	52	46	Sim
40	2	18	23	99	52		83	3	13	32	120	37	
41	3	4	32	120	41	Sim	84	4	13	32	120	51	
42	3	5	32	120	33		85	5	13	32	120	43	Sim
43	3	7	32	120	28		86	7	13	32	120	38	Sim

b	a1	a2	IB	FB	DB	Projeto	b	a1	a2	IB	FB	DB	Projeto
87	8	13	32	120	38	Sim	100	3	17	32	120	33	
88	13	16	32	120	42	Sim	101	4	17	32	120	47	
89	13	17	32	120	43	Sim	102	5	17	32	120	39	Sim
90	15	1	1	46	42		103	7	17	32	120	34	Sim
91	15	5	1	47	43		104	8	17	32	120	34	Sim
92	15	11	1	43	39		105	18	3	32	111	42	
93	15	18	1	56	52		106	18	4	32	120	56	
94	3	16	32	120	32		107	18	5	1	117	48	Sim
95	4	16	32	120	46		108	18	7	32	112	43	Sim
96	5	16	32	120	38	Sim	109	18	8	32	112	43	Sim
97	7	16	32	120	33	Sim	110	18	13	32	120	52	Sim
98	8	16	32	120	33	Sim	111	18	16	32	116	47	Sim
99	16	17	32	120	38	Sim	112	18	17	32	117	48	Sim
							113	20		43	53	5	Sim

Tabela 11 – IRP e FRP dos poços nos blocos criados

b	p	IRP	FRP	b	p	IRP	FRP	b	p	IRP	FRP
1	A	6	20	24	D	21	31	38	E	26	40
2	B	6	25	25	A	6	20	39	B	6	25
3	A	6	15	25	C	21	32	39	E	26	41
4	B	6	29	26	A	6	20	40	B	6	25
5	C	6	21	26	D	21	40	40	D	26	50
6	A	6	28	27	A	6	20	41	A	6	15
7	C	6	16	27	E	21	35	41	B	16	39
8	D	6	16	28	A	6	20	42	A	6	15
9	B	6	24	28	E	21	36	42	C	16	31
10	E	6	23	29	A	6	20	43	A	6	15
11	C	6	17	29	D	21	45	43	C	16	26
12	E	6	19	30	A	26	40	44	A	6	15
13	D	6	25	30	B	6	25	44	D	16	26
14	D	4	10	31	A	26	35	45	B	6	29
15	F	6	25	31	B	6	25	45	C	30	45
16	E	6	20	32	B	6	49	46	B	6	29
17	E	6	21	33	B	6	25	46	C	30	40
18	D	6	30	33	C	26	41	47	B	6	29
19	F	6	29	34	B	6	25	47	D	30	40
20	A	6	30	34	C	26	36	48	C	6	32
21	A	6	20	35	B	6	25	49	C	6	21
21	B	21	44	35	D	26	36	49	D	22	32
22	A	6	20	36	B	6	25	50	A	6	43
22	C	21	36	36	C	26	37	51	A	6	28
23	A	6	20	37	B	6	25	51	B	29	48
23	C	21	31	37	D	26	45	52	A	6	28
24	A	6	20	38	B	6	25	52	C	29	44

b	p	IRP	FRP
53	A	6	28
53	C	29	40
54	A	6	28
54	D	29	53
55	C	6	16
55	D	17	27
56	A	25	34
56	B	6	24
57	B	6	48
58	B	6	24
58	C	25	40
59	B	6	24
59	C	25	35
60	B	6	24
60	D	25	35
61	B	6	24
61	D	25	44
62	B	6	24
62	E	25	39
63	B	6	24
63	E	25	40
64	A	24	38
64	E	6	23
65	C	24	39
65	E	6	23
66	A	24	46
66	E	6	23
67	C	24	35
67	E	6	23
68	D	24	48
68	E	6	23
69	A	18	27
69	C	6	17
70	B	18	41
70	C	6	17
71	C	6	33
72	C	6	28
73	C	6	17

b	p	IRP	FRP
73	D	18	28
74	C	6	17
74	D	18	37
75	C	6	17
75	E	18	32
76	C	6	17
76	E	18	33
77	C	6	17
77	D	18	42
78	A	20	34
78	E	6	19
79	C	20	35
79	E	6	19
80	A	20	42
80	E	6	19
81	C	20	31
81	E	6	19
82	D	20	44
82	E	6	19
83	A	26	35
83	D	6	25
84	B	26	49
84	D	6	25
85	C	26	41
85	D	6	25
86	C	26	36
86	D	6	25
87	D	6	36
88	D	6	25
88	E	26	40
89	D	6	25
89	E	26	41
90	A	26	40
90	F	6	25
91	C	26	41
91	F	6	25
92	C	26	37
92	F	6	25

b	p	IRP	FRP
93	D	26	50
93	F	6	25
94	A	21	30
94	E	6	20
95	B	21	44
95	E	6	20
96	C	21	36
96	E	6	20
97	C	21	31
97	E	6	20
98	D	21	31
98	E	6	20
99	E	6	36
100	A	22	31
100	E	6	21
101	B	22	45
101	E	6	21
102	C	22	37
102	E	6	21
103	C	22	32
103	E	6	21
104	D	22	32
104	E	6	21
105	A	31	40
105	D	6	30
106	B	31	54
106	D	6	30
107	C	31	46
107	D	6	30
108	C	31	41
108	D	6	30
109	D	6	41
110	D	6	50
111	D	6	30
111	E	31	45
112	D	6	30
112	E	31	46
113	Parada		

Como exemplo de construção de bloco e seus parâmetros, tomemos o Bloco 30, ilustrado na Figura 35. Ele foi gerado com a adição da Atividade 1 a um bloco existente composto somente com a Atividade 2. Para que ambas as atividades estejam disponíveis ao se utilizar o bloco, o seu parâmetro IB deve assumir o

instante após a liberação das duas atividades, ou seja, a data mais tarde entre as JIA das atividades que o compõem, neste caso, $IB = 23$. Para o cálculo do parâmetro FB, devem ser observados os instantes mais tarde nos quais as atividades que compõem o bloco podem ser finalizadas (JFA). Para que a Atividade 1 seja finalizada até o instante 93 (JFA 1), o instante máximo em que o bloco poderá ser finalizado se dá em $t1 = JFA\ 1 + \text{Duração da Navegação } N2$, ou seja, $t1 = 94$. Para que a Atividade 2 seja finalizada até o instante 73 (JFA 2), o fim do bloco deverá ocorrer no máximo no instante $t2 = JFA\ 2 + \text{Duração da Atividade 1} + \text{Duração da Navegação } N2$, ou seja, $t2 = 89$. Como a alocação do bloco deve garantir que as duas janelas serão respeitadas, o parâmetro FB assume o menor valor entre os instantes $t1$ e $t2$, neste caso, $FB = 89$. A duração do bloco será a soma da duração das atividades que o compõem, neste caso um carregamento de 4 dias, uma navegação de 2 dias, 20 dias da atividade 2, 15 dias da atividade 1 e uma navegação de 1 dia, totalizando 42 dias.

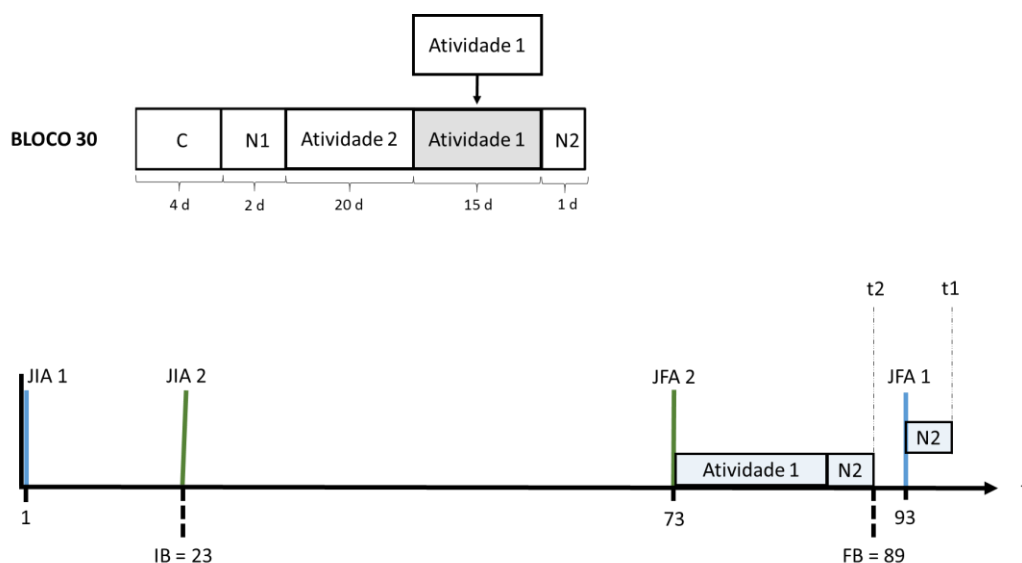


Figura 35 – Exemplo de construção de bloco