

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO

ESCOLA POLITÉCNICA

CURSO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

Gustavo Ponzo Mathias Ferreira

Rodrigo Couto Tarsitano

AVALIAÇÃO DE UM MODELO DINÂMICO DE LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS E
ALOCAÇÃO DE ESTOQUES APLICADO AO ABASTECIMENTO OFFSHORE

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2015



Universidade Federal
do Rio de Janeiro

Escola Politécnica

AVALIAÇÃO DE UM MODELO DINÂMICO DE LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS E ALOCAÇÃO DE ESTOQUES APLICADO AO ABASTECIMENTO OFFSHORE

Gustavo Ponzo Mathias Ferreira
Rodrigo Couto Tarsitano

Projeto de Graduação apresentado no Curso de Engenharia de Produção da Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientador:

Prof. Virgílio José M. Ferreira Filho, D.Sc

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2015

AVALIAÇÃO DE UM MODELO DINÂMICO DE LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS E
ALOCAÇÃO DE ESTOQUES APLICADO AO ABASTECIMENTO OFFSHORE

Gustavo Ponzo Mathias Ferreira

Rodrigo Couto Tarsitano

PROJETO DE GRADUAÇÃO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO CURSO
DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO DE PRODUÇÃO.

Aprovado por:

Prof. Virgílio J. M. Ferreira Filho, D.Sc. (Orientador)

Prof. Laura Silvia Bahiense da Silva Leite, D.Sc.

Gustavo Cunha de Bittencourt, M.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

MARÇO DE 2015

Ferreira, Gustavo Ponzo Mathias

Tarsitano, Rodrigo Couto

Avaliação de um Modelo Dinâmico de Localização de Armazéns e Alocação de Estoques Aplicado ao Abastecimento Offshore – Rio de Janeiro: UFRJ/ Escola Politécnica, 2015.

X, 61 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Projeto Graduação – UFRJ/ Escola Politécnica/ Curso de Engenharia de Produção, 2015.

Referências Bibliográficas: p.60-61.

1. Apoio Offshore. 2. Programação Matemática. 3. Métodos de Linearização.

I. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica, Curso de Engenharia de Produção. II. Avaliação de um Modelo Dinâmico de Localização de Armazéns e Alocação de Estoques Aplicado ao Abastecimento Offshore.

AGRADECIMENTOS

GUSTAVO PONZO MATHIAS FERREIRA

Gostaria de agradecer aos meus pais, Véra e Júlio, por todo carinho, apoio, orientação e esforços imensuráveis para que eu chegasse até aqui. Sem vocês isso não seria possível.

Gostaria de agradecer também a alguns familiares mais próximos, em especial a minha avó Egydia Ponzo e à memória da minha tia Lúcia Helena Ferreira, por sempre cuidarem de mim.

Gostaria de agradecer à minha namorada Marcelle Queiroz, que esteve junto comigo durante toda essa minha caminhada, desde os tempos de escola até o presente momento, sempre com muito amor e apoio.

Gostaria de agradecer ao meu companheiro de projeto Rodrigo Tarsitano, por compartilhar o momento árduo para desenvolver este trabalho, sempre mostrando calma e uma inteligência sem igual.

Gostaria de agradecer também aos meus amigos, sejam os de faculdade, escola, empresas, etc. Obrigado pelos momentos de diversão proporcionados durante essa árdua caminhada.

Gostaria de agradecer ao professor Virgílio Ferreira por toda orientação dada para a conclusão desse trabalho, com dicas e direcionamentos precisos. Um agradecimento especial a todos os professores que passaram na minha trajetória.

Gostaria de agradecer também ao programa PRH-21, formado com recursos da ANP (Agência Nacional do Petróleo) e Petrobras, pelo incentivo dado para que eu realizasse um projeto de graduação na área de Logística e Operação no setor de Óleo e Gás.

Gostaria de agradecer, por fim, à Fluxo Consultoria e ao Instituto ILOS, por me permitirem aplicar e desenvolver o conhecimento obtido durante a graduação na prática.

Gustavo Ponzo

AGRADECIMENTOS

RODRIGO COUTO TARSITANO

Gostaria de agradecer primeiramente à minha família, principalmente meus pais Paulo e Márcia e à minha irmã Paula, por todo apoio e carinho durante toda a faculdade, além da liberdade que me foi dada para traçar meu próprio caminho na universidade.

Gostaria de agradecer à minha namorada Manuella Carnaval, que me acompanhou por todos esses anos de faculdade, resistindo a momentos difíceis em que não pude estar tão presente em sua vida por me dedicar a oportunidades acadêmicas como empresa júnior e intercâmbio. Superamos as dificuldades com muito amor.

Gostaria de agradecer a todos os meus amigos do Colégio Pentágono, representados pelos grupos “Amigos da 201”, “Amigos Penta” e “Amigos da Tec”, que tornaram muito mais fáceis esses seis anos de faculdade mantendo viva nossa amizade, mesmo sem ter mais o contato diário no colégio.

Gostaria de agradecer à minha dupla de projeto Gustavo Ponzo por ter me trazido a oportunidade de participar desse projeto e confiado em mim para compartilhar um trabalho de tamanha importância. Sua dedicação, inteligência e companheirismo foram fundamentais para a elaboração do projeto.

Gostaria de agradecer aos professores e colegas da Engenharia de Produção UFRJ, por todo o aprendizado e experiência obtidos durante todos esses anos. Um agradecimento especial ao professor Virgílio Ferreira, por sua orientação fundamental na elaboração desse trabalho, sempre nos atendendo com grande disponibilidade e atenção.

Gostaria de agradecer à Engenharia – Ciclo Básico, curso pelo qual entrei na UFRJ, onde tive a oportunidade de escolher minha engenharia com muito mais maturidade e conhecimento que no vestibular.

Gostaria de agradecer, por fim, às empresas que potencializaram ainda mais meu aprendizado acadêmico. À Fluxo Consultoria, pela experiência proporcionada em tão pouco tempo, com a oportunidade de ser Diretor e Conselheiro da empresa. Ao Instituto ILOS, por poder aplicar conhecimentos acadêmicos na área de logística como uma consultoria.

Rodrigo Tarsitano

Se o dinheiro for a sua esperança de independência, você jamais a terá. A única segurança verdadeira consiste numa reserva de sabedoria, de experiência e de competência.

Henry Ford

Resumo do Projeto de Graduação apresentado à Escola Politécnica UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Engenheiro de Produção.

AVALIAÇÃO DE UM MODELO DINÂMICO DE LOCALIZAÇÃO DE ARMAZÉNS E ALOCAÇÃO DE ESTOQUES APLICADO AO ABASTECIMENTO OFFSHORE

Gustavo Ponzo Mathias Ferreira

Rodrigo Couto Tarsitano

Março/2015

Orientador: Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Curso: Engenharia de Produção

O protagonismo assumido pelo mercado de óleo e gás brasileiro nos últimos tempos vem estimulando o desenvolvimento de novas ferramentas e tecnologias que tragam melhorias para todo o processo de produção e distribuição do petróleo. Sendo o petróleo uma *commodity*, com preço definido no exterior, a tentativa de reduzir custos é incessante no setor, de forma a acompanhar esse preço externo. O apoio *offshore*, por exemplo, consiste no abastecimento dos materiais necessários para a operação das unidades de produção de petróleo, envolvendo aí um esforço logístico que pode ser maior ou menor dependendo da configuração da rede logística. O presente trabalho busca estudar melhorias na parte de apoio *offshore* a partir de um modelo de localização de instalações e alocação de estoques desenvolvido em SILVA (2012). Este modelo utiliza programação matemática não linear inteira e determina valores ótimos para as variáveis de forma a atingir a configuração na qual o custo total da rede logística é mínimo, englobando diversos fatores que vão desde variabilidades relativas às unidades produtivas, que demandam do armazém, até as variabilidades relativas aos fornecedores, que abastecem os armazéns. Uma das limitações desse modelo, é que muitas vezes a programação não linear é inviável. A partir disso, o presente trabalho utilizará metodologias de linearização do modelo e na sequência o modelo será aplicado a um problema real, de forma a avaliar a sua consistência.

Palavras-chave: Apoio *Offshore*, Programação Matemática, Métodos de Linearização

Abstract of Undergraduate Project presented to POLI/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Industrial Engineering

EVALUATION OF A DYNAMIC MODEL OF WAREHOUSES' LOCATION AND STOCKS' ALLOCATION APPLIED TO OFFSHORE SUPPLY

Gustavo Ponzo Mathias Ferreira

Rodrigo Couto Tarsitano

March/2015

Advisor: Prof. Virgílio José Martins Ferreira Filho, D.Sc.

Course: Industrial Engineering

The role assumed by the Brazilian oil and gas market lately has been encouraging the development of new tools and technologies that bring improvements to all oil production and distribution process. Because oil is a commodity, priced set abroad, the efforts to reduce costs is relentless in the sector, in order to follow this external price. The offshore support, for example, is the supply of materials necessary for the operation of oil production units, involving around a logistical effort that can be bigger or smaller depending on the logistics network configuration. This project studies improvements on the offshore support from a warehouses location and inventory allocation model developed in SILVA (2012), which uses mathematical nonlinear, mixed and integer programming. This model determines optimal values for the variables in order to reach the configuration in which the total cost of logistics network is minimal, involving multiple factors ranging from variability relating to the production units that demanding the warehouses, to the variability relating to suppliers that supply warehouses. One of the limitations of this model is that non-linear programming is often not feasible. From this, the present project uses model linearization methods and, after, the model will be applied to an actual problem, to evaluate its consistency.

Keywords: Offshore Support, Mathematical Programming, Linearization Methods

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: A cadeia do petróleo e seus principais ativos.	17
Figura 2: Representação da rede estudada.	23
Figura 3: Seleção de Campos.	32
Figura 4: Seleção do produto.	33

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Estoques sob demanda incerta.	21
Gráfico 2: Método de linearização por partes aplicado à restrição do Estoque de Segurança.	28
Gráfico 3: Aproximação linear da função $f(x) = 12 * x^2$	29
Gráfico 4: Comportamento do Estoque nos Armazéns ao longo dos anos para o modelo linearizado por partes.	49
Gráfico 5: Comportamento do Estoque nos Armazéns ao longo dos anos para o modelo utilizando SOS2.	50
Gráfico 6: Comportamento do Estoque nos Armazéns ao longo dos anos para o modelo utilizando função aproximada.	51
Gráfico 7: Custo total por modelo.	52
Gráfico 8: Estoque Médio Ano/dia e Estoque de Segurança por modelo.	52
Gráfico 9: Armazéns abertos por modelo.	53
Gráfico 10: Exemplo de linearização de uma função côncava.	54
Gráfico 11: Representatividade dos custos.	55
Gráfico 12: Comparação de custos.	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Custo de Transporte por Armazém.	36
Tabela 2: Custo de Ressuprimento.	36
Tabela 3: <i>Lead Time</i>	37
Tabela 4: Demanda das UP's.	39
Tabela 5: Valores definidos para ϕ_{it}^r	42
Tabela 6: Valores definidos para C_{ijt}^r	43
Tabela 7: Valores definidos para F_{ijt}^r	43
Tabela 8: Valores definidos para ϕ_{it}^r	46
Tabela 9: Valores definidos para ES_{it}^r	47

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Objetivos.....	15
1.2. Organização e abordagem do trabalho	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1. Cadeia de Produção de Petróleo	17
2.2. Redes Logísticas	19
2.3. Conceitos de Gestão de Estoques	19
2.4. Programação Matemática	21
3. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO.....	23
3.1. Modelo Original	24
3.1.1. Dados de Entrada.....	25
3.1.2. Dados de Saída – Variáveis de Decisão	25
3.1.3. Modelagem Matemática	26
3.2. <i>Software</i> Escolhido	26
3.3. Abordagens lineares do problema	27
3.3.1. Linearização por Partes Clássica	28
3.3.2. Linearização por Partes usando SOS2.....	28
3.3.3. Aproximação da Função do Estoque de Segurança.....	30
4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA	31
4.1. Tempo.....	32
4.2. Clientes	32
4.3. Produtos	33
4.4. Fornecedores.....	34
4.5. Depósitos	34
4.6. Demanda.....	38
5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA.....	40
5.1. Modelo com Linearização por Partes Clássica.....	40
5.2. Modelo com Linearização por Partes utilizando SOS2.....	44
5.3. Modelo com Função Aproximada do Estoque de Segurança.....	47
6. ANÁLISE DE RESULTADOS.....	49
6.1. Modelo Linearizado por Partes.....	49
6.2. Modelo utilizando o SOS2	50

6.3. Modelo com Função Aproximada do Estoque de Segurança.....	50
6.4. Breve Comparação dos Modelos.....	51
6.5. Análise Aprofundada do Modelo.....	54
7. CONCLUSÃO.....	58
7.1. Críticas ao modelo.....	58
7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros.....	59
7.3. Aprendizado.....	60
BIBLIOGRAFIA.....	62

1. INTRODUÇÃO

O mercado de óleo e gás assumiu um papel de protagonista no cenário econômico brasileiro, principalmente a partir da última década. Isto se deve em grande parte ao crescimento da Petrobras, a maior empresa do Brasil, aliado à sua abertura de capital e à abertura de mercado.

Tendo isso em vista, é enorme o montante de esforços e investimentos dispendido para o desenvolvimento das atividades que compõem o setor, que envolvem a exploração, a produção, o escoamento, a distribuição e as atividades de apoio *offshore*.

Esse último grupo de atividades citado (apoio *offshore*) envolve todo o fornecimento de materiais necessários às atividades fins, onde podem ser citados como exemplo desde tubos de perfuração até os alimentos que são consumidos pelos trabalhadores. Com plataformas localizadas no mar e fornecedores localizados em terra, a dinâmica de fornecimento costuma envolver o estudo de redes para determinar quais fornecedores atendem quais unidades de produção, a partir de qual porto, se haverá centralização de estoques, etc.

O presente trabalho visa estudar um modelo de programação matemática existente de alocação de estoques e localização de armazéns para apoio *offshore*, avaliando a sua aplicabilidade a um problema real e propondo melhorias no mesmo.

1.1. Objetivos

O principal objetivo do trabalho em questão é avaliar um modelo de configuração de rede logística para um caso real de apoio *offshore*.

Intenciona-se aqui também trabalhar com a inviabilidade de um modelo de programação matemática não linear e buscar as melhores alternativas que viabilizem a sua execução, causando menores perdas possíveis no resultado.

Outro objetivo é avaliar como certas características de uma rede logística influenciam nos seus resultados gerais, como níveis de estoque, necessidade de armazéns e custos.

1.2. Organização e abordagem do trabalho

O presente trabalho consiste em três partes que ajudam a elucidar o processo de avaliação e melhoria de um modelo existente. São essas:

i) Contextualização

Essa parte consiste dos tópicos 1. Introdução e 2. Referencial Teórico. O tópico 1, do qual esse trecho faz parte, introduz a problemática tratada neste trabalho, explicitando porque

está sendo desenvolvido e como será desenvolvido. Já o tópico 2 introduz os principais conceitos que serão abordados no trabalho, elucidando-os segundo a bibliografia.

ii) Desenvolvimento

Consiste dos tópicos 3. Metodologia de Resolução, 4. Descrição do Problema e 5. Aplicação da Metodologia. O tópico 3 apresenta o modelo base do estudo e as principais ferramentas que serão utilizadas para torna-lo aplicável. Já o tópico 4 apresenta o problema real ao qual o modelo será aplicado. O tópico 5 aplica a metodologia desenvolvida ao problema descrito.

iii) Avaliação

Essa parte engloba os tópicos 6. Análise dos Resultados e 7. Conclusão. O tópico 6 faz todas as avaliações da aplicação da metodologia, sensibiliza as condições preestabelecidas e apresenta seus efeitos. Por fim, o tópico 7 apresenta as principais conclusões e considerações dos autores referentes ao projeto.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Cadeia de Produção de Petróleo

Segundo PIQUET (2010), a indústria do petróleo é dividida em dois segmentos: *upstream* e *downstream*. O primeiro segmento envolve as atividades de exploração, desenvolvimento e produção, enquanto o segundo envolve o transporte, refino (algumas correntes classificam estas últimas atividades como *midstream*) e distribuição.

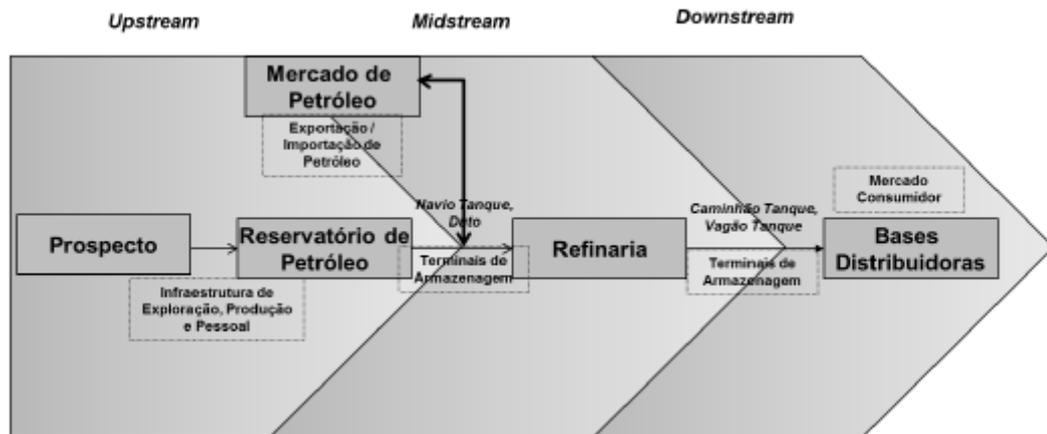


Figura 1: A cadeia do petróleo e seus principais ativos.

Fonte: FERREIRA FILHO (2014).

A maior parte dos investimentos se concentra no *upstream*, mais especificamente na exploração e no desenvolvimento. Segundo BAIN *et al.* (2009), as principais atividades envolvidas na exploração, desenvolvimento e produção do petróleo são:

- Exploração – consiste na busca, identificação e quantificação de novas reservas de óleo, envolvendo análises geológicas de subsolo, identificação e confirmação de reservatórios.
- Desenvolvimento – consiste na preparação para a etapa de produção, envolvendo a avaliação da reserva com auxílio de poços, a verificação das características do subsolo que possam afetar a produção, a avaliação de possíveis cenários de produção, a avaliação de como é melhor extrair, definindo localização das perfurações até as especificações da infraestrutura a ser utilizada e a implementação da infraestrutura de produção.
- Produção – consiste na extração do óleo de uma reserva com intuito de maximizar sua vida útil, envolvendo a extração de petróleo e gás com as mais diversas técnicas de

recuperação, a manutenção dos níveis de produção da reserva otimizados e o encerramento das atividades de produção.

Ainda relacionado ao segmento de *upstream*, existem atividades que não envolvem diretamente o petróleo, mas que são fundamentais para que as atividades de exploração, desenvolvimento e produção ocorram, tendo-se em vista que estas atividades são realizadas em alto mar, a quilômetros de distância da costa. Tratam-se das atividades de apoio logístico.

Segundo BAIN *et al.* (2009), as atividades de apoio logístico buscam atender as necessidades de transporte, armazenamento e movimentação de equipamentos, consumíveis e pessoas e podem ser divididas em 2 (dois) tipos:

- Apoio marítimo: envolve o transporte de equipamentos e consumíveis da costa até às plataformas por meio do modal marítimo;
- Apoio aéreo: transporta principalmente pessoas da plataforma para o continente (e vice-versa).

Ainda segundo BAIN *et al.* (2009), globalmente, o segmento de apoio logístico totalizou US\$8,4 bilhões de faturamento em 2007, com 60% das receitas decorrentes do apoio marítimo e 40% decorrentes do apoio aéreo. No período 1999-2007, as receitas do segmento de apoio logístico cresceram 11% ao ano.

No Brasil, pode-se citar o município de Macaé, no estado do Rio de Janeiro, como um ótimo exemplo de concentração de atividades de apoio logístico. O Porto de Imbetiba e o Aeroporto de Macaé realizam o apoio marítimo e aéreo, respectivamente, transportando cargas advindas dos fornecedores localizados em Macaé e outras regiões e funcionários, para as plataformas localizadas na bacia de Campos, majoritariamente.

Já as atividades do segmento de *downstream*, podem ser definidas da seguinte forma:

- Transporte – consiste na transferência por meio de dutos ou navios do petróleo produzido até a costa, normalmente para terminais. A partir dos terminais, por meio de dutos o petróleo é exportado ou transferido para as refinarias.
- Refino – consiste na transformação do petróleo bruto em produtos consumíveis, como, por exemplo, gasolina, óleo diesel, querosene de aviação, entre outros.
- Distribuição – consiste na transferência dos produtos refinados até os consumidores e pode ser feito a partir de diversos modais, como o dutoviário, o rodoviário, o ferroviário, o hidroviário e o marítimo, integrados ou não.

2.2. Redes Logísticas

RIBEIRO (2014) define redes logísticas como os fluxos dos materiais (transporte) entre os pontos determinados (Centros de Distribuição, Centros de Distribuição Avançados, etc), desde o suprimento de matéria prima até a entrega dos produtos finais aos consumidores. Ou seja, fazem parte da rede todo o transporte, a localização e armazenamento em todos os elos da cadeia de suprimentos. Realizar um planejamento de redes logísticas tem o objetivo de otimizar a operação logística de maneira global.

Para entender o conceito de otimização global da operação logística, é necessário entendermos as duas frentes que estão relacionadas a essa questão, levantadas por ILOS (2013): aspectos comerciais e aspectos logísticos. A primeira aborda decisões relacionadas à estratégia comercial da empresa, como o nível de serviço do atendimento ao cliente, canais de relacionamento com o cliente e posicionamento competitivo da empresa. Apesar de tais aspectos também afetarem os custos da operação logística, seu foco está geralmente mais ligado à geração de receitas.

A segunda frente, que aborda os aspectos logísticos, está intimamente relacionada com o conceito de custo total. Segundo CAMEIRA *et al.* (2003), este conceito representa a busca pela ponderação nas relações de compensação (*trade-offs*) existentes entre os diferentes itens de custo. Os tipos de custo mais comumente relacionados à logística são o de armazenagem, de estoque, de transporte e tributário. Pelo conceito de custo total, não faz sentido buscar incessantemente a redução dos custos de transporte se ao fazê-lo os custos de estoque crescem em um ritmo ainda mais intenso. O ótimo global será dado com a rede logística em que a soma de todos os custos logísticos for o mínimo possível.

2.3. Conceitos de Gestão de Estoques

Para abordar a gestão de estoques, primeiro é importante definir o que é o estoque. Segundo SLACK *et al.* (1997), “o estoque é definido como a acumulação de recursos materiais em um sistema de transformação. Algumas vezes o estoque também é usado para descrever qualquer recurso armazenado. Não importa o que está sendo armazenado como estoque, ou onde ele está posicionado na operação, ele existirá porque existe uma diferença de ritmo ou de taxa entre fornecimento e demanda.”

Definido o que é estoque, é importante definir agora quais são as funções que o estoque pode exercer dentro de um sistema produtivo. AMARAL *et al.* (2011) define as seguintes como as principais funções do estoque:

- Garantir o abastecimento de materiais à empresa, neutralizando os efeitos de demora ou atraso no fornecimento de materiais, sazonalidade no suprimento e riscos de dificuldade no fornecimento.
- Proporcionar economias de escala através da compra ou produção em lotes econômicos, pela flexibilidade do processo produtivo ou pela rapidez e eficiência no atendimento das necessidades.

Existem custos associados ao estoque. FERREIRA FILHO (2014) define cinco desses custos, onde pode-se destacar três. São eles:

- Custo de Pedidos e Preparação: envolve o conjunto de custos que só dependem da quantidade de vezes que o produto é repostado no estoque, independente da quantidade e do tempo que o produto permanece no estoque. Podem se referir a pedidos externos, quando são chamados de custo de pedidos e a procedimentos internos de inicialização da produção, neste caso são chamados custos de preparação.
- Custo de Manutenção: envolve custos que são diretamente proporcionais a quantidade e ao tempo que um produto permanece em estoque, sendo composto pelo custo do capital, custo da armazenagem e custo do risco de manter aquele determinado estoque.
- Custo da Falta: quando o produto não está disponível quando os clientes o requerem, ou quando ele é necessário para a produção, ocorre falta de estoque. Custos associados a falta são o custo da perda de venda, custo da perda de credibilidade, custo de reprogramação da produção, entre outros.

Existem diversos modelos para definir um nível de estoque ideal para a empresa, podendo ser divididos entre determinísticos e estocásticos. Entre os determinísticos destaca-se o modelo do LEC (Lote Econômico de Compra), e todas as suas variações. Já os estocásticos envolvem variabilidades nos parâmetros de estoques.

FERREIRA FILHO (2014) define também o conceito de estoque de segurança, primordial para este trabalho. Para fornecer proteção contra faltas no estoque quando a demanda excede a previsão, estoques de segurança são adicionados ao estoque básico. O gráfico abaixo ilustra o comportamento do estoque em situações de demanda incerta. Nestas situações, a reposição do estoque pode ocorrer antes ou depois que o nível de estoque chegue à zero.

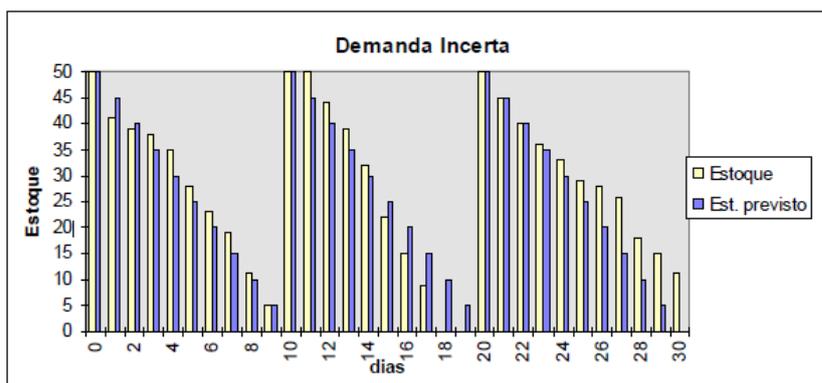


Gráfico 1: Estoques sob demanda incerta.

Fonte: FERREIRA FILHO (2014).

A partir do histórico da demanda pode-se inferir a sua distribuição de probabilidade e, com esta informação, calcular o estoque de segurança necessário para garantir um nível desejado de proteção. A base para este cálculo é o desvio padrão da demanda, que mede a dispersão das vendas em relação às vendas médias (FERREIRA FILHO, 2014).

2.4. Programação Matemática

Problemas de tomada decisão raramente são simples de serem resolvidos. Costumam possuir um objetivo e uma série de restrições e dados de entrada que podem tornar não óbvia a sua solução. A necessidade de resolver problemas complexos de tomada de decisão fez com que se recorresse ao uso de métodos quantitativos para a sua solução.

A utilização de métodos quantitativos para otimização de problemas de tomada de decisão caracteriza a programação matemática. FERREIRA (2005) define três tipos de programação matemática. São elas:

- Programação Linear: envolvem variáveis de decisão que podem assumir qualquer valor real. A função objetivo e as restrições são lineares.
- Programação Inteira: difere da programação linear pela inclusão da restrição adicional de que todas ou parte das variáveis de decisão devem assumir apenas valores inteiros.
- Programação Não-Linear: envolve variáveis de decisão que podem assumir qualquer valor real, mas a função objetivo ou alguma restrição não pode ser expressa na forma apresentada acima na definição de Programação Linear, ou seja, precisa ser expressa por uma relação não linear envolvendo as variáveis de decisão.

Problemas de programação matemática muitas vezes exigem o uso de ferramentas computacionais para a sua modelagem e solução. Para alguns problemas mais simples, o

suplemento Solver do Microsoft Excel pode ser suficiente. Mas em casos mais complicados, pode ser necessário usar ferramentas mais específicas, tanto de modelagem quanto de resolução, como, por exemplo, os *softwares* AIMMS, GAMS, Xpress-MP, R e MatLab, juntos aos seus respectivos *solvers*.

3. METODOLOGIA DE RESOLUÇÃO

O presente trabalho visa avaliar um modelo desenvolvido em SILVA (2012), que envolve gerenciamento dinâmico de estoques. As Unidades de Produção (UPs) localizadas no pré-sal, com demanda variando no tempo, são atendidas a partir de armazéns intermediários localizados no mar, conforme mostrado no esquema da figura abaixo:

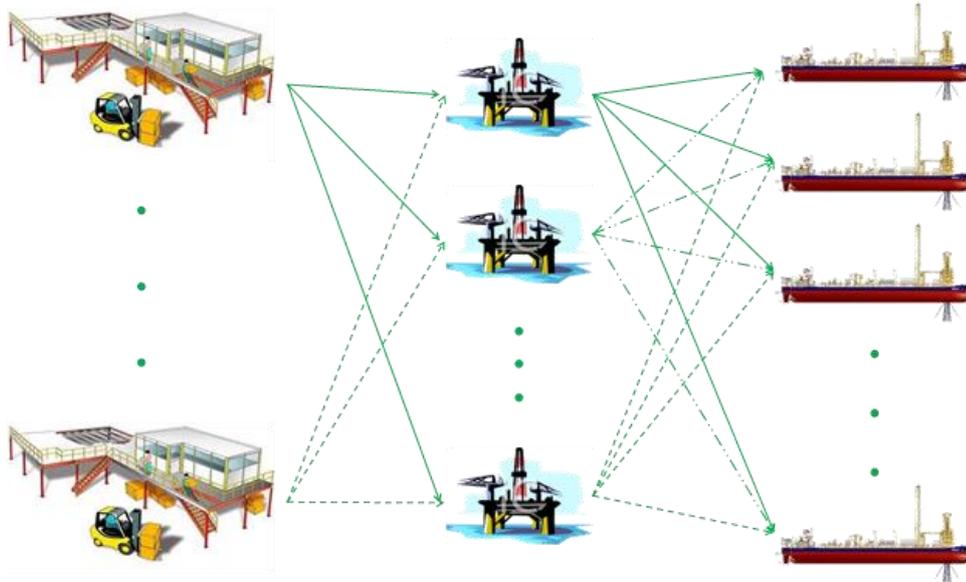


Figura 2: Representação da rede estudada.

Fonte: SILVA (2012).

No trabalho original, o modelo apresentou uma série de limitações em seu formato original, em Programação Não-Linear Inteira Mista (MINLP). Dentre as limitações destacadas, esse trabalho se propõe a tratar duas, são elas:

- O trabalho original não utilizou uma base de dados real para o problema.
- O método de linearização por partes da função de Estoque de Segurança causou discrepâncias significativas no seu valor, alterando o resultado final.

Além do exposto acima, outras limitações podem surgir ao longo do desenvolvimento do problema, as quais serão devidamente tratadas e terão seus tratamentos expostos, como a falta de dados importantes ao modelo na base real escolhida, por exemplo.

Nos próximos tópicos, serão apresentados o modelo original, o *software* de otimização escolhido, um método de linearização alternativo ao usado e uma nova abordagem linear para o estoque de segurança, para fins de comparação entre os três métodos.

3.1. Modelo Original

O modelo desenvolvido, como dito anteriormente, é de MILNP, considerando demanda variável no tempo, com armazéns intermediários podendo abrir e fechar em qualquer período, decidindo onde localizar tais armazéns e quais UPs atender a partir deles.

Algumas premissas e hipóteses foram adotadas pelo autor de forma a adequar o modelo. São elas (extraídas integralmente do trabalho original):

- a) Cada fornecedor do armazém e cada UP tem sua localização fixa e pré-determinada em cada período de tempo;
- b) As possíveis localizações dos armazéns são pré-determinadas e finitas em cada período de tempo;
- c) O número de armazéns é finito e no máximo igual ao número de possíveis localidades;
- d) Há somente um produto a ser transportado e estocado na rede;
- e) A demanda por materiais e equipamentos em cada UP possui uma distribuição normal, com variância constante ao longo do tempo, isto é, a demanda é homocedástica;
- f) As demandas por materiais e equipamentos em cada UP são variáveis aleatórias independentes, com correlação igual a zero em cada período de tempo;
- g) Cada armazém pode atender a mais de uma UP em cada período de tempo;
- h) Os estoques de ciclo e de segurança são considerados apenas nos armazéns, não sendo considerados estoques no fornecedor e nem nas UPs;
- i) São considerados os níveis de serviço requeridos por cada UP em cada período de tempo na forma de um fator de segurança que garante uma determinada probabilidade de não ocorrência de *stockouts*. O fator é o mesmo para todos os armazéns;
- j) É assumido um modelo de gestão de estoques nos armazéns do tipo lote econômico de compra (LEC) e ponto de pedido (PP);
- k) Os custos unitários de ressuprimento são função do tempo de entrega (*lead time*) do fornecedor para cada armazém, sendo medidos em \$/unidade/dia;
- l) Os custos unitários de transporte entre os armazéns e as UPs dependem das distâncias entre eles. Eles são medidos em \$/unidade;
- m) Não são consideradas variações no *lead time* de ressuprimento.

Os próximos subtópico apresentam os detalhes do modelo de SILVA (2012), chamado pelo autor de Programa de Gerenciamento Dinâmico da Localização de Armazéns e Alocação de Estoques (PGDAE).

3.1.1. Dados de Entrada

a) Conjuntos e Índices

N = conjunto de UPs a serem atendidas ao longo do tempo

j = índice para UPs

M = conjunto de armazéns que podem ser abertos ou fechados ao longo do tempo

i = índice para armazéns

t = índice de tempo

b) Parâmetros de Custos

P_i = custo unitário de colocação do pedido no armazém i (\$/pedido)

M_i = custo de manutenção de estoques por unidade no armazém i (\$/unidade)

T_{ij} = custo de transporte por unidade entre o armazém i e a UP j (\$/unidade)

A = custo diário de ressurgimento por unidade do fornecedor para o armazém (\$/unidade/dia)

c) Parâmetros Estatísticos

D_{jt} = demanda média da UP j no instante de tempo t

σ_{Dj} = desvio padrão da demanda da UP j

L_i = lead time médio de entrega do fornecedor ao armazém i

d) Parâmetros Constantes

E_{0i} = estoque no armazém i ao final do período 0

G = constante que restringe o tamanho do pedido (pode ser, por exemplo, a capacidade de um PSV ou de um caminhão)

Z_i = fator de segurança que reflete o nível de proteção contra falta de estoques

3.1.2. Dados de Saída – Variáveis de Decisão

w_{ijt} = percentual da demanda da UP j atendida pelo armazém i no instante de tempo t

y_{it} = variável binária igual a 1 caso haja pedido de ressurgimento para o armazém i no período t .

e_{it} = estoque no armazém i ao final do período t

q_{it} = quantidade comprada pelo armazém i como ressurgimento no período t

ss_{it} = estoque de segurança no armazém i no período t

3.1.3. Modelagem Matemática

a) Função Objetivo

$$MinCT = \sum_t \sum_i M_i e_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j P_i y_{it} + \sum_t \sum_i AL_i q_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j T_{ij} D_{jt} w_{ijt}$$

A função objetivo é composta de 4 (quatro) componentes, sendo a primeira relativa ao custo de manutenção de estoques nos armazéns, a segunda ao custo dos pedidos das UPs aos armazéns, a terceira ao custo de abastecimento dos armazéns pelos fornecedores, e a última relativa ao custo de transporte dos armazéns para as UPs. A soma dessas 4 (quatro) componentes de custos deve ser minimizada.

b) Restrições

- $\sum_i w_{ijt} = 1 \quad \forall j, t$ - Garante o atendimento integral da demanda das UPs.
- $e_{it} = e_{it-1} - \sum_j D_{jt} w_{ijt} + q_{it} \quad \forall i, t$ - Garante o balanço de estoques nos armazéns.
- $e_{it} \geq ss_{it} \quad \forall i, t$ - Assegura estoques nos armazéns superiores ao estoque de segurança.
- $ss_{it} = z_i \sqrt{L_i \left[\sum_j (\sigma_{D_j}^2 w_{ijt}) \right]} \quad \forall i, t$ - Fórmula do estoque de segurança, demonstrada em DASKIN et al. (2002).
- $q_{it} \leq Gy_{it} \quad \forall i, t$ - Limita o tamanho do pedido.
- $q_{it}, E_{it}, \geq 0 \quad \forall i, t$
- $w_{ijt} \in [0,1] \quad \forall i, j, t$
- $y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t$

3.2. Software Escolhido

O *software* de otimização escolhido para a representação e solução do modelo foi o AIMMS, na versão 3.14, disponibilizado pelo laboratório SAGE-UFRJ a partir de acesso presencial ou remoto. O *solver* escolhido para a resolução do problema em MINLP foi o KNITRO 8.0. Para a resolução do problema linearizado, o *solver* utilizado foi o GUROBI 5.6.

Algumas considerações devem ser feitas em relação à declaração do modelo no AIMMS. São elas:

- O índice t passou a ser representado por te , pois estava conflitando com o parâmetro T , e foi definido como um conjunto de dados.
- O parâmetro M passou a ser representado por Ma , pois estava conflitando com o conjunto m .
- O parâmetro D passou a ser representado por Dem .
- O parâmetro σ_D passou a ser representado por sD , para evitar o alfabeto grego.

3.3. Abordagens lineares do problema

Resolver problemas de otimização não-lineares exigem grande esforço computacional. Por isso, ao longo do tempo foram desenvolvidos diversos métodos de linearização das restrições ou funções não-lineares do problema a ser resolvido. Em SILVA (2012), por exemplo, foi utilizado o método clássico de linearização por partes para resolver o modelo exposto no tópico 5.1.

Um problema de programação matemática é dito não-linear quando uma ou mais de suas funções que expressam as restrições ou a função objetivo do problema são não-lineares. Uma função é dita não-linear se possuir, por exemplo:

- Produto entre variáveis;
- Razão entre variáveis;
- Radiciação de uma variável;
- Potenciação de uma variável;
- Logaritmação de uma variável.

Observando o modelo aqui utilizado, tem-se que uma das suas restrições possui radiciação de uma variável. Trata-se da restrição do estoque de segurança, reproduzida abaixo. Como pode ser visto, a variável w_{ijt} encontra-se inserida na raiz quadrada, trazendo a não linearidade à restrição.

$$ss_{it} = z_i \sqrt{L_i \left[\sum_j (\sigma_{Dj}^2 w_{ijt}) \right]} \quad \forall i, t$$

O método clássico de linearização por partes utilizado em SILVA (2012) possui limitações em relação aos resultados obtidos. Como pode ser visto no gráfico abaixo, no início da função, há certo distanciamento entre a curva original e a reta rl . O autor cita que tal inconsistência causa perdas significativas no estoque de segurança, alterando o resultado final.

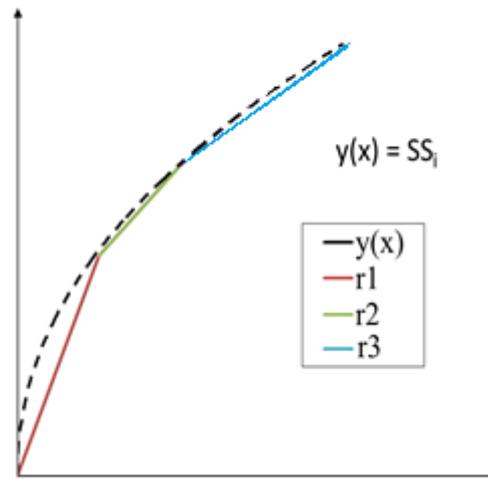


Gráfico 2: Método de linearização por partes aplicado à restrição do Estoque de Segurança.

Fonte: SILVA (2012).

Com o problema apresentado acima, surge a necessidade de buscar uma implementação que seja mais aderente à restrição original. Foi encontrado o método SOS2, cuja explicação está disponível em BISSCHOP (2012). Além desse método, foi encontrada uma aproximação linear da fórmula do estoque de segurança, representando uma alternativa simples para o problema da linearização, que será avaliada também. A seguir são explicitados esses métodos.

3.3.1. Linearização por Partes Clássica

Como explicitado no tópico anterior, em SILVA (2012) foi utilizado um método de linearização por partes da função não linear. Tal método segmenta a função do estoque de segurança em r -segmentos e introduz novas variáveis ao problema. Quanto maior o número de segmentos lineares de r , melhor é a aproximação.

3.3.2. Linearização por Partes usando SOS2

Há alguns tipos comuns de restrições em Programação Inteira que podem ser tratadas de maneira eficiente pelos *solvers*. Um desses tipos é referido como *Special Ordered Sets* (SOS), do tipo 2. Esse tipo de restrição diz que, de um conjunto de variáveis não negativas, no máximo 2 (duas) variáveis podem ser diferentes de zero. Além disso, as duas variáveis devem ser adjacentes uma à outra em uma lista de ordem fixa. Uma aplicação típica ocorre quando

uma função não linear é aproximada por uma função linear por partes, e será detalhada no exemplo a seguir, extraído de BISSCHOP (2012).

Considere um exemplo simples, com apenas um termo não linear a ser aproximado, ou seja, $f(x) = \frac{1}{2} * x^2$. A figura abaixo mostra a curva dividida em três partes, que são aproximadas por linhas retas. Essa aproximação é conhecida como linearização por partes. Os pontos em que a inclinação da função de interpolação linear muda (ou o seu domínio termina) são referidos como pontos de parada. Esta aproximação pode ser expressa matematicamente de várias maneiras. Um método conhecido como formulação λ será descrito.

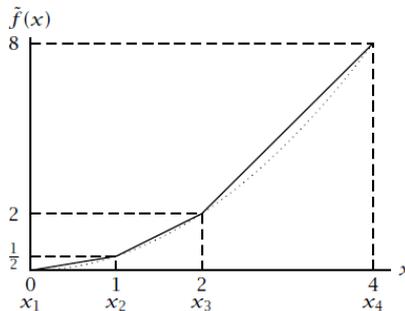


Gráfico 3: Aproximação linear da função $f(x) = \frac{1}{2} * x^2$.
Fonte: BISSCHOP (2012).

Denote como x_1, x_2, x_3 e x_4 os 4 (quarto) pontos de parada ao longo do eixo x na figura acima e denote como $f(x_1), f(x_2), f(x_3)$ e $f(x_4)$ os valores das funções correspondentes. Os pontos de parada são $0, 1, 2$ e 4 , e os valores das funções correspondentes são $0, 1/2, 2$ e 8 . Qualquer ponto entre 2 (dois) pontos de parada é uma soma ponderada desse 2 (dois) pontos de parada. Por exemplo, para $x = 3$, tem-se o valor de $x = 1/2 * 2 + 1/2 * 4 = 3$. O valor da função correspondente portanto é $f(3) = 1/2 * 2 + 1/2 * 8 = 5$.

Utilizando agora a formulação λ , denote quatro pesos não negativos como $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ e λ_4 , cuja soma deve ser igual a 1. Com isso, a linearização por partes pode ser escrita da maneira a seguir:

$$\lambda_1 * f(x_1) + \lambda_2 * f(x_2) + \lambda_3 * f(x_3) + \lambda_4 * f(x_4) = f(x) \quad (1)$$

$$\lambda_1 * x_1 + \lambda_2 * x_2 + \lambda_3 * x_3 + \lambda_4 * x_4 = x \quad (2)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4 = 1 \quad (3)$$

requerendo que apenas 2 (dois) λ adjacentes sejam maiores que 0 (zero). No AIMMS, não é preciso formular tal condição, uma vez que é possível especificar na restrição (2) apresentada acima a propriedade *SOS2*.

Este método será utilizado posteriormente para linearizar o modelo apresentado no subtópico 5.2.

3.3.3. Aproximação da Função do Estoque de Segurança

Uma maneira de linearizar o problema sem utilizar uma metodologia de linearização por partes consistiu em buscar outra abordagem para o estoque de segurança que não compromettesse a linearidade do problema. POZO (2010) apresenta dois métodos lineares de calcular o estoque de segurança. São eles:

- Método do Grau de Risco (MGR): utiliza um percentual de risco arbitrado de acordo com características da empresa e do mercado. O cálculo do estoque de segurança é dado por:

$$ES = C \times K$$

Onde:

ES = Estoque de Segurança; C = Consumo Médio; K = Percentual de Risco.

- Método com Variação de Consumo e/ou Tempo de Reposição (MVC): modelo utilizado no caso em que as variações de demanda e/ou *lead time* são maiores do que os dados definidos, ou seja, caso haja atrasos na entrega do pedido e/ou aumento nas vendas.

$$ES = (Cm - Cn) + Cm * PTR$$

Onde:

ES = Estoque de Segurança; Cm = Consumo Máximo; Cn = Consumo Normal; PTR = Probabilidade de Atraso no Tempo de Reposição.

Os modelos apresentados acima servirão de base para a construção de uma abordagem linear do Estoque de Segurança aplicável ao modelo utilizado no presente trabalho.

4. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Como parte da avaliação do modelo supracitado no tópico 3, ele será aplicado a uma base de dados real, a fim de aferir sua aplicabilidade a casos reais, registrando as dificuldades encontradas, além de possíveis adaptações e simplificações necessárias para a aplicação do modelo.

A base utilizada no presente trabalho foi extraída do Projeto RELOG do Laboratório de Otimização de Recursos, de Simulação Operacional e de Apoio a Decisões na Indústria do Petróleo (LORDE/UFRJ), cujo principal objetivo era elaborar um modelo para otimizar a configuração da rede logística do abastecimento de Unidades de Produção localizadas na região nordeste e Espírito Santo. A similaridade entre o Projeto RELOG e o presente trabalho contribuiu para que grande parte dos dados de entrada do modelo fosse fornecida pela base de dados do projeto, necessitando apenas de poucos ajustes.

Com o objetivo de testar a aplicabilidade a casos reais do modelo elaborado por SILVA (2012), decidiu-se manter a integridade do modelo da forma que foi concebido originalmente, sempre que possível. Dessa forma, todas as adaptações necessárias foram feitas na base de dados, e não no modelo, visto que a base de dados apresentada não foi gerada com a finalidade de servir de entrada para o presente projeto.

Abaixo, encontram-se as três diretrizes utilizadas nas adaptações que foram realizadas e serão posteriormente apresentadas:

- Simplificar o modelo para ganhar performance na resolução;
- Atender às restrições do problema real, sobretudo as que tangem ao formato do dado de entrada;
- Suprir a ausência de dados necessários ao modelo que não foram disponibilizados na base.

Uma parte dessas adequações são simplificações adotadas com o objetivo de diminuir a complexidade do modelo para obter ganhos de performance na sua resolução. Outra grande parte das adequações se fizeram necessárias pela falta de alguns dados requeridos pelo modelo. Assim, algumas considerações tiveram que ser feitas para transformar os dados disponíveis no formato compatível, além de buscas externas por informações complementares.

4.1. Tempo

Uma alteração representativa que afetou toda base de dados foi a conversão dos dados para uma mesma unidade de tempo, já que parte dos dados foi dada em dias, outra parte em meses e outra em anos. Foi decidido que todos os dados passariam para a base em dias, para obtermos um valor diário médio para o ano de 2009. Assim, o índice *te* passará a ser medido em dias, variando de 1 a 30.

Para não deixar de analisar o comportamento do modelo com a variação de ano para ano, para cada ano de 2009 a 2013, foram rodados 30 dias no modelo, de maneira independente, pois não havia como definir dois índices *te*, sendo que um seria dia e o outro seria ano. Assim, após todas as rodagens, foi possível realizar uma comparação ano a ano.

4.2. Clientes

Os clientes do processo apresentado são as unidades de produção de petróleo. O número total de clientes na base de dados é de 546 (quinhentos e quarenta e seis), dentre campos marítimos e terrestres, não havendo algum tipo de distinção no modelo entre os dois. As informações de localização de cada cliente foram fornecidas, como sua latitude e longitude, assim como o Estado a qual pertence.

Porém, como o atual projeto é voltado para o abastecimento offshore, consideraremos para a nossa escolha somente os campos marítimos, sendo, ao todo, 38 clientes possíveis. Dentre eles, foram selecionados apenas seis para terem seus dados incorporados no modelo: Campo Marítimo Arabaiana, Campo Marítimo Camarupim, Campo Marítimo Camorim, Campo Marítimo de Cachalote, Campo Marítimo Pescada e Campo Marítimo Piranema. Ou seja, foram consideradas dois campos do Ceará, dois campos do Espírito Santo e dois campos de Sergipe.

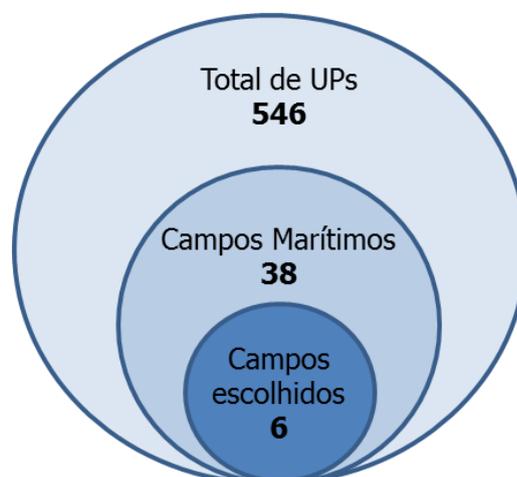


Figura 3: Seleção de Campos.

4.3. Produtos

Produto é todo item que é necessário à Unidade de Produção e é abastecido pelo processo descrito. Os produtos são fornecidos pelos Fornecedores aos Depósitos, que redistribuem para os Clientes, de acordo com a Demanda e com o atendimento de cada cliente por cada depósito.

Cada produto representa um subgrupo de itens mais específicos para a simplificação do próprio processo, como, por exemplo, a previsão da demanda. Assim, existe na base o total de 147 produtos, que vão desde materiais consumidos na operação, como combustíveis, areia e óleo até equipamentos essenciais, como válvulas, tubos e parafusos. Informações inerentes ao produto, como peso médio, em kg, e valor por unidade, R\$/kg, foram disponibilizadas na base, sendo elas de grande importância para o projeto em questão.

Apesar de a alteração do modelo para comportar mais produtos não apresentar grandes dificuldades, tal alteração provocaria um aumento de complexidade considerável, pois todas as variáveis que dependem do tipo de produto ganhariam um novo índice, o que multiplicaria pelo número de produtos o número de fatores da função objetivo do modelo. Apesar de mais aderente à realidade, julgamos que a alteração não contribuiria muito para a determinação se o modelo em questão é aplicável ou não.

Assim, dos 147 produtos disponíveis, foram escolhidos somente quatro produtos, mas que possuíam uma representatividade significativa, que possuem alguma similaridade entre si. São eles: Óleo, Querosene, Biodiesel e Álcool. Esse grupo foi denominado como Combustíveis, que será o nosso produto único a ser utilizado no modelo. O esquema abaixo ilustra tais adaptações:

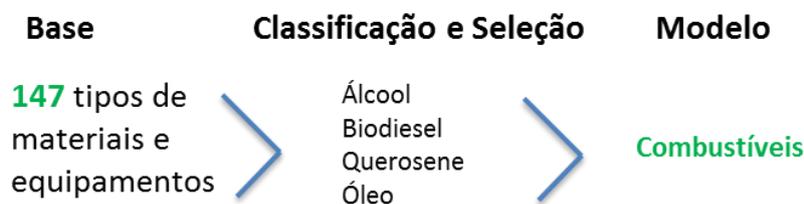


Figura 4: Seleção do produto.

A escolha de quatro produtos da base original ao invés de apenas 1 (um), como exige o modelo, foi feita com o intuito de aumentar a carga de dados disponível para compor o produto final. Com isso, algumas variáveis individuais de cada produto tiveram que ser recalculadas para formar um valor final para o novo produto denominado Combustíveis. As variáveis alteradas, assim como a base de cálculo para formar os valores finais, encontram-se abaixo:

- Preço médio por quilo

$$\text{Preço médio por quilo} = \frac{\sum[\text{Preço}(i) \times \text{Demanda}(i)]}{\sum \text{Demanda}(i)} = R\$2,17/\text{kg}$$

- Demanda

$$\text{Demanda (Combustível)} = \sum \text{Demanda}(i)$$

4.4. Fornecedores

Os fornecedores são o primeiro elo do processo, o ponto de partida de cada produto. São ao todo 749 fornecedores na base, localizados majoritariamente nas regiões nordeste e sudeste, com destaque para o estado de São Paulo. A cidade e o estado de cada fornecedor são as únicas informações fornecidas que caracterizam o fornecedor, não havendo nem mesmo seu nome ou alguma localização mais detalhada.

Cada fornecedor provê apenas alguns itens a alguns depósitos. A relação de itens que cada fornecedor atende cada depósito foi disponibilizada, junto com seu devido custo de transporte, por kg. A partir da seleção de produtos, o número de fornecedores também sofreu uma queda em relação aos 749 originais, pois só foram mantidos aqueles que abastecem o produto selecionado. Assim, o número de fornecedores utilizado no modelo é de 21, considerando um valor médio para seus parâmetros.

4.5. Depósitos

Os depósitos são o elo central da cadeia, sendo atendidos pelos fornecedores e atendendo os clientes de acordo com sua demanda. No caso, foram utilizados 4 (quatro) depósitos nessa rede, com localização definida, em latitude, longitude e estado.

O modelo do Projeto RELOG, assim como o utilizado para o presente trabalho, tem a função de determinar quais depósitos estarão abertos em cada período de tempo, além da definição de quais depósitos irão atender quais itens a cada cliente. O custo de abastecimento por item, depósito e cliente foi dado na unidade R\$/kg.

Todos os depósitos deverão atender à demanda dos clientes a um nível de serviço de pelo menos 95%. O custo fixo de cada depósito, assim como o custo de colocação de pedido, não foi dado, havendo apenas um custo de manuseio, dado na unidade R\$/kg. Assim, o cálculo para determinar cada variável necessária referente ao depósito será descrita nas seções abaixo.

a) Custo de colocação do pedido (P_i)

Devido às características do modelo do Projeto RELOG, a base não apresenta valores para custo do pedido, variável exigida pelo modelo em avaliação no presente trabalho. Neste, o custo do pedido seria um valor fixo para cada depósito, em que em todo período em que houvesse pedido tal valor deveria ser pago, independentemente do número de produtos do pedido.

Já na base, existe um custo de manuseio, que é dado como uma porcentagem de 6% do valor de venda por quilo. Ou seja, se o preço de um 1 kg do produto for R\$10,00, o custo de manuseio seria R\$0,60. Contudo, esse custo não é previsto pelo modelo avaliado. Assim, embutiremos esse custo no modelo como um custo de pedido, já que um grande componente do custo de pedido seria justamente o manuseio para carga/descarga. O valor final utilizado, apesar de se tornar independente da quantidade manuseada, será calculado considerando o total manuseado no ano de 2009, nos quatro armazéns considerados.

O cálculo feito para encontrar o valor de custo de colocação do pedido está descrito abaixo:

$$\begin{aligned} \text{Custo de Colocação do Pedido} &= \\ \frac{\text{Preço médio por kg} \left(\frac{\text{R\$}}{\text{kg}} \right) \times \text{Demanda diária média (kg)}}{4} &\times \% \text{ Custo de Manuseio} \\ &= \frac{\text{R\$2,17/kg} \times 4.669,06 \text{ kg}}{4} \times 6\% = \text{R\$152,30} \end{aligned}$$

Ou seja, foi considerado um mesmo custo de colocação do pedido para todos os 4 (quatro) armazéns, independentemente da quantidade que cada um irá manusear.

b) Custo de manutenção de estoques por unidade no armazém i (M_i)

O custo de estoque, que representa o custo de oportunidade do capital, ou seja, o quanto o capital poderia render caso não fosse gasto em estoque. Para calculá-lo, aplicaremos a taxa Selic (BACEN) anualizada do quinquênio de 2009 até 2013, considerando-a constante ao longo do tempo, ao valor médio do produto por quilo em 2009, obtendo o custo de estoque por quilo.

O esquema abaixo ilustra a base de cálculos utilizada para obtermos o custo de manutenção do estoque:

$$\begin{aligned} \text{Custo de estoque} &= \text{Taxa SELIC anualizada} \times \text{Preço médio por quilo} \\ &= 0,025\% \times R\$2,17/\text{kg} = R\$0,00055/\text{kg} \end{aligned}$$

É importante ressaltar que apesar de o modelo original prever que cada depósito teria um custo de manutenção de estoque diferente, será considerado que o custo de estoque será o mesmo para todos os depósitos, pois a forma escolhida para calcular essa variável não possui parâmetros que dependem do depósito onde o produto foi armazenado.

c) Custo de transporte entre o armazém i e a UP j (T_{ij})

A base de dados forneceu o custo de transporte entre armazém e cliente como prevê o modelo em avaliação. Assim, os dados utilizados se encontram abaixo:

Tabela 1: Custo de Transporte por Armazém.

Armazém	C.M. Piranema	C.M. Camarupim	C.M. Pescada	C.M. de Cachalote	C.M. Camorim	C.M. Arabaiana
UO-RNCE/CD	0,12	0,33	0,11	0,33	0,12	0,11
UO-BA/CD	0,09	0,17	0,17	0,17	0,09	0,17
UO-SEAL/CD	0,04	0,19	0,17	0,19	0,04	0,17
UO-ES/CD	0,18	0,11	0,33	0,11	0,18	0,33

d) Custo de ressuprimento do fornecedor para o armazém (A)

O custo de ressuprimento do fornecedor para o armazém foi dado de acordo com cada relação fornecedor-armazém, ou seja, os valores variam dependendo dos dois agentes. No modelo, porém, com fins de simplificação, é considerado somente um custo de ressuprimento padrão que independe tanto do fornecedor quanto do armazém que será abastecido.

Assim, para adaptar os dados ao modelo, usaremos a média aritmética dos valores divulgados, que é apresentada abaixo:

Tabela 2: Custo de Ressuprimento.

Custo de ressuprimento do fornecedor para o armazém (R\$/kg)
A = 0,17

e) *Lead time* médio de entrega do fornecedor ao armazém i (L_i)

O *lead time* de entrega do fornecedor ao armazém, na base de dados utilizada, foi dado de acordo com cada relação fornecedor-armazém. Porém, no modelo utilizado, o *lead time* deve variar apenas com o armazém, independente de qual fornecedor irá fornecer. Assim,

para adequar ao modelo, foi tirada a média aritmética dos valores para cada armazém, chegando no resultado a seguir:

Tabela 3: *Lead Time.*

Armazém	Lead Time (dias)
UO-RNCE/CD	2
UO-BA/CD	2
UO-SEAL/CD	1
UO-ES/CD	2

f) Constante que restringe o tamanho do pedido (G)

Foi definido, em um teste, que a constante que restringe o tamanho do pedido feito pelo armazém aos fornecedores representa a capacidade de armazenamento de um caminhão tanque, que realizaria esse transporte, considerando que o caminhão estaria disponível para realizar uma viagem por dia. Como não há dados relacionados a essa variável na base de dados utilizada, foram buscadas em fontes externas na internet as seguintes informações:

- Capacidade de um caminhão tanque em litros;
- Densidade média dos combustíveis selecionados.

O caminhão considerado para o cálculo será um bitrem tanque para transporte de combustíveis, que possui uma capacidade média de 45.000 litros. Quanto à densidade dos combustíveis, como não há uma especificação detalhada dos tipos de combustíveis na base utilizada, apenas subgrupos de combustíveis, não foi possível obter um valor preciso. Assim, como os valores encontrados variam entre 0,8 e 1,05, será considerado um valor médio de 0,9 kg/L na base de cálculos.

O valor da variável G, que restringe o tamanho do pedido, então, é obtido da seguinte forma:

$$G = \text{Capacidade do Caminhão (L)} \times \text{Densidade Média (kg/L)} = 45.000L \times 0,9 \text{ kg/L} \\ = 40.500 \text{ kg/viagem}$$

g) Fator de Segurança (Z_i)

O fator de segurança de cada armazém, que também pode ser chamado de nível de serviço, foi informado pela base de dados utilizada como um único valor para todos os armazéns:

$$Z_i = 0,95$$

h) Estoque Inicial (E_{0i})

Por fins práticos, o estoque inicial de cada armazém foi desconsiderado, ou seja, foi inserido o valor 0 (zero).

i) Custo Fixo

O custo fixo, apesar de ser um clássico custo sempre existe na vida real, não é considerado no presente modelo. Não se sabe ao certo o porquê de o autor SILVA (2012) não considerar esse custo em seu modelo, porém, para o presente trabalho, foi decidido manter a decisão de desconsiderar tal custo, pelos seguintes motivos:

- Foi buscado, sempre que possível, se manter fiel ao modelo original desenvolvido por SILVA (2012), visto que um dos objetivos desse trabalho é avaliar a aplicabilidade do modelo original a uma base real.
- A função de Custo Fixo traz uma não-linearidade ao modelo, visto que para descrevê-la, tem que ser usada uma função condição. Assim, acrescentar mais uma função não-linear quando outra função não-linear do modelo já trazia problemas de resolução não seria uma decisão razoável.
- A inclusão de tal custo no modelo não impactaria na alocação da demanda aos armazéns, devido a outros parâmetros do modelo, como será visto nas seções subsequentes.

4.6. Demanda

A demanda fornecida corresponde ao ano de 2009, destrinchada para cada cliente e para cada produto. Como demanda é um parâmetro bastante variável, foi concedido seu valor como uma média mensal com seu devido desvio-padrão, divididos por 30 para obtermos um valor diário médio.

A base em questão fornece apenas dados referentes a uma média mensal do ano de 2009. Até agora, esse fato não trouxe quaisquer problemas para a aplicação ao modelo. Entretanto, no que se refere à demanda, seria fundamental que se tivesse dados referentes a mais de um ano, visto que, apesar de o índice *te* ser em dias, podermos verificar como as variações de demanda de um ano para o outro influenciaria no modelo.

Assim, para estimar a demanda para os anos seguintes, buscamos fontes alternativas que pudessem trazer uma estimativa coerente para a demanda dos anos de 2010 a 2013. Dessa forma, extraímos do índice de “Produção nacional de petróleo por Unidade da Federação e

localização (terra e mar) - 2000-2014” (ANP (2014)), a taxa de crescimento anual de produção de petróleo no Brasil em unidades marítimas e a utilizamos como taxa de crescimento da demanda para, a partir dos dados de 2009, obtermos uma boa estimativa para os 4 (quatro) anos subsequentes.

Para tal consideração, tivemos que assumir as seguintes premissas como verdadeiras:

- A demanda por combustíveis no abastecimento de apoio *offshore* de cada cliente cresce na mesma taxa que a produção de petróleo em campos marítimos.
- As demandas por abastecimento de Óleo, Querosene, Álcool e Biodiesel crescem na mesma taxa, sendo representada por uma taxa única de crescimento de demanda por combustíveis.
- A demanda de cada campo marítimo varia na mesma proporção da variação da produção de petróleo do estado (UF) em que está situada.

Tabela 4: Demanda das UP's.

Demanda e Desvio-padrão (kg)						
Cliente	2009	2010	2011	2012	2013	Desvio-Padrão
CM_Piranema	2.794,8	2.435,6	2.851,4	2.544,4	2.877,9	5.231,2
CM_Camarupim	213,5	512,0	753,3	732,7	735,2	1.057,4
CM_Pescada	1.040,8	927,0	840,7	786,7	1.079,6	1.289,4
CM_Cachalote	80,0	192,0	282,4	274,7	275,7	578,7
CM_Camorim	402,6	350,9	410,8	366,5	414,6	803,1
CM_Arabaiana	137,3	122,3	110,9	103,8	142,4	373,4

5. APLICAÇÃO DA METODOLOGIA

Nesse tópico, toda a metodologia explicitada no tópico 3 será aplicada ao problema descrito no tópico 4. A iniciar pelo modelo original, ele será mantido na forma que foi apresentado no tópico 3. Os próximos subtópicos explicitarão os modelos alterados segundo a linearização por partes clássica desenvolvida em SILVA (2012), a linearização utilizando a metodologia SOS2 e a aproximação linear da função do estoque de segurança.

5.1. Modelo com Linearização por Partes Clássica

a) Função Objetivo

$$MinCT = \sum_t \sum_i M_i E_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j P_i y_{it} + \sum_t \sum_i AL_i q_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j T_{ij} D_{jt} w_{ijt} \quad (5.1.1)$$

A função objetivo não se altera em relação ao modelo original.

b) Restrições

A principal restrição que afeta o modelo como um todo é a própria função linearizada, o estoque de segurança. Para tal linearização, foi necessário criar variáveis de linearização que compuseram o modelo:

- Conjuntos e Índices

r = Índice de partição da reta que aproxima uma curva por uma reta

- Parâmetros de Entrada de Linearização

N = Número total de partições dos segmentos de reta que aproximam a função a ser linearizada

ϕ_{it}^r = Abcissa do limite superior da partição r associado ao armazém i e período t

$$\phi_{it}^r = \left(\frac{r}{N} \sqrt{L_i \sum_j \sigma_j^2} \right)^2 \quad (5.1.2)$$

F_{ijt}^r = Coeficiente Linear para a partição r associado ao armazém i e período t

$$F_{ijt}^r = \sqrt{\phi_{it}^r} - C_{ijt}^r \phi_{it}^r \quad (5.1.3)$$

C_{ijt}^r = Coeficiente Angular para a partição r associado ao armazém i e período t

$$C_{ijt}^r = \frac{\sqrt{\phi_{it}^{r+1}} - \sqrt{\phi_{it}^r}}{\phi_{it}^{r+1} - \phi_{it}^r} \quad (5.1.4)$$

- Variáveis de Decisão

u_{it}^r = Variável que ativa a partição r associada ao armazém i e período t

v_{ijt}^r = Variável que realiza varredura na partição r associada ao armazém i , UP j e período t

Definidas essas variáveis, as restrições adicionais referentes à linearização serão explicadas abaixo, juntamente com as demais restrições do modelo, que se mantêm idênticas:

$$\sum_i w_{ijt} = 1 \quad \forall j, t \quad (5.1.5)$$

$$E_{it} = E_{it-1} - \sum_j D_{jt} w_{ijt} + q_{it} \quad \forall i, t \quad (5.1.6)$$

$$E_{it} \geq SS_{it} \quad \forall i, t \quad (5.1.7)$$

$$SS_{it} = z_i \sum_r (F_{it}^r u_{it}^r + C_{it}^r v_{ijt}^r) \quad \forall i, t \quad (5.1.8)$$

- Função linearizada do estoque de segurança.

$$\sum_j L_i \sigma_j^2 w_{ijt} = \sum_r \sum_j v_{ijt}^r \quad \forall i, t \quad (5.1.9)$$

- Estabelece relação entre v_{ijt}^r e w_{ijt} .

$$\phi_{it}^{r-1} u_{it}^r \leq \sum_j v_{ijt}^r \leq \phi_{it}^r u_{it}^r \quad \forall i, t, r \quad (5.1.10)$$

- Procura a partição que será ativada.

$$\sum_r u_{it}^r \leq 1 \quad \forall i, t \quad (5.1.11)$$

- Garante que só uma partição será ativada.

$$q_{it} \leq G y_{it} \quad \forall i, t \quad (5.1.12)$$

$$q_{it}, E_{it}, \geq 0 \quad \forall i, t \quad (5.1.13)$$

$$w_{ijt} \in [0,1] \quad \forall i, j, t \quad (5.1.14)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (5.1.15)$$

$$v_{ijt}^r \geq 0 \quad \forall i,t \quad (5.1.16)$$

$$u_{it}^r \in \{0,1\} \quad \forall i,t,r \quad (5.1.17)$$

c) Dados Adicionais

- N

Foi escolhido usar N=20, pois em SILVA (2012), esse número de partições, dentre os testados, foi o que obteve o melhor resultado em termos de assertividade em relação ao modelo não linear.

- ϕ_{it}^r

Tabela 5: Valores definidos para ϕ_{it}^r .

Partição	UO-RNCE/CD	UO-BA/CD	UO-SEAL/CD	UO-ES/CD
1	156,326.17	156,326.17	78,163.09	156,326.17
2	625,304.68	625,304.68	312,652.34	625,304.68
3	1,406,935.54	1,406,935.54	703,467.77	1,406,935.54
4	2,501,218.73	2,501,218.73	1,250,609.37	2,501,218.73
5	3,908,154.27	3,908,154.27	1,954,077.14	3,908,154.27
6	5,627,742.15	5,627,742.15	2,813,871.08	5,627,742.15
7	7,659,982.37	7,659,982.37	3,829,991.19	7,659,982.37
8	10,004,874.94	10,004,874.94	5,002,437.47	10,004,874.94
9	12,662,419.84	12,662,419.84	6,331,209.92	12,662,419.84
10	15,632,617.09	15,632,617.09	7,816,308.54	15,632,617.09
11	18,915,466.68	18,915,466.68	9,457,733.34	18,915,466.68
12	22,510,968.61	22,510,968.61	11,255,484.30	22,510,968.61
13	26,419,122.88	26,419,122.88	13,209,561.44	26,419,122.88
14	30,639,929.50	30,639,929.50	15,319,964.75	30,639,929.50
15	35,173,388.45	35,173,388.45	17,586,694.23	35,173,388.45
16	40,019,499.75	40,019,499.75	20,009,749.87	40,019,499.75
17	45,178,263.39	45,178,263.39	22,589,131.69	45,178,263.39
18	50,649,679.37	50,649,679.37	25,324,839.69	50,649,679.37
19	56,433,747.69	56,433,747.69	28,216,873.85	56,433,747.69
20	62,530,468.36	62,530,468.36	31,265,234.18	62,530,468.36

- C_{ijt}^r

Tabela 6: Valores definidos para C_{ijt}^r .

Partições	UO-RNCE/CD	UO-BA/CD	UO-SEAL/CD	UO-ES/CD
1	0.00084	0.00084	0.00119	0.00084
2	0.00051	0.00051	0.00072	0.00051
3	0.00036	0.00036	0.00051	0.00036
4	0.00028	0.00028	0.00040	0.00028
5	0.00023	0.00023	0.00033	0.00023
6	0.00019	0.00019	0.00028	0.00019
7	0.00017	0.00017	0.00024	0.00017
8	0.00015	0.00015	0.00021	0.00015
9	0.00013	0.00013	0.00019	0.00013
10	0.00012	0.00012	0.00017	0.00012
11	0.00011	0.00011	0.00016	0.00011
12	0.00010	0.00010	0.00014	0.00010
13	0.00009	0.00009	0.00013	0.00009
14	0.00009	0.00009	0.00012	0.00009
15	0.00008	0.00008	0.00012	0.00008
16	0.00008	0.00008	0.00011	0.00008
17	0.00007	0.00007	0.00010	0.00007
18	0.00007	0.00007	0.00010	0.00007
19	0.00006	0.00006	0.00009	0.00006
20	0.00013	0.00013	0.00018	0.00013

- F_{ijt}^r

Tabela 7: Valores definidos para F_{ijt}^r .

Partições	UO-RNCE/CD	UO-BA/CD	UO-SEAL/CD	UO-ES/CD
1	263.59	263.59	186.38	263.59
2	474.46	474.46	335.49	474.46
3	677.80	677.80	479.27	677.80
4	878.62	878.62	621.28	878.62
5	1,078.31	1,078.31	762.48	1,078.31
6	1,277.38	1,277.38	903.25	1,277.38
7	1,476.09	1,476.09	1,043.75	1,476.09
8	1,674.56	1,674.56	1,184.09	1,674.56
9	1,872.86	1,872.86	1,324.31	1,872.86
10	2,071.04	2,071.04	1,464.45	2,071.04
11	2,269.14	2,269.14	1,604.53	2,269.14
12	2,467.18	2,467.18	1,744.56	2,467.18
13	2,665.16	2,665.16	1,884.55	2,665.16
14	2,863.10	2,863.10	2,024.52	2,863.10

15	3,061.01	3,061.01	2,164.46	3,061.01
16	3,258.90	3,258.90	2,304.39	3,258.90
17	3,456.76	3,456.76	2,444.30	3,456.76
18	3,654.60	3,654.60	2,584.19	3,654.60
19	3,852.43	3,852.43	2,724.08	3,852.43
20	-	-	-	-

5.2. Modelo com Linearização por Partes utilizando SOS2

a) Função Objetivo

$$MinCT = \sum_t \sum_i M_i E_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j P_i y_{it} + \sum_t \sum_i AL_i q_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j T_{ij} D_{jt} w_{ijt} \quad (5.2.1)$$

A função objetivo se mantém inalterada em relação ao modelo original.

b) Restrições

O modelo utilizando SOS2 foi estruturado com base na linearização por partes apresentada acima para a obtenção dos dados de entrada adicionais para esse modelo. O modelo com SOS2 necessita que sejam apresentados N pares ordenados da função $SS = f(x)$, sendo que o estoque de segurança será calculado como uma combinação de dois pontos adjacentes.

- Conjuntos e Índices

r = Índice de partição entre dois pontos escolhidos da função do Estoque de Segurança

- Parâmetros de Entrada de Linearização

N = Número total de pares ordenados da função que irão compor o Estoque de Segurança

ϕ_{it}^r = Abcissa da função linearizada do Estoque de Segurança

$$\phi_{it}^r = \left(\frac{r}{N} \sqrt{L_i \sum_j \sigma_j^2} \right)^2 \quad (5.2.2)$$

ES_{it}^r = Estoque de Segurança para as N abcissas

$$ES_{it}^r = z_i \sum_r (F_{it}^r + C_{it}^r \phi_{it}^r) \quad (5.2.3)$$

F_{ij}^r = Coeficiente Linear para a partição r associado ao armazém i e período t

$$F_{ijt}^r = \sqrt{\phi_{it}^r} - C_{ijt}^r \phi_{it}^r \quad (5.2.4)$$

C_{ijt}^r = Coeficiente Angular para a partição r associado ao armazém i e período t

$$C_{ijt}^r = \frac{\sqrt{\phi_{it}^{r+1}} - \sqrt{\phi_{it}^r}}{\phi_{it}^{r+1} - \phi_{it}^r} \quad (5.2.5)$$

- Variáveis de decisão

λ_i^r = variável que ativa a partição em que o ponto se encontra

Definidas essas variáveis, as restrições adicionais referentes à linearização serão explicadas abaixo, juntamente com as demais restrições do modelo, que se mantêm idênticas:

$$\sum_i w_{ijt} = 1 \quad \forall j, t \quad (5.2.6)$$

$$E_{it} = E_{it-1} - \sum_j D_{jt} w_{ijt} + q_{it} \quad \forall i, t \quad (5.2.7)$$

$$E_{it} \geq SS_{it} \quad \forall i, t \quad (5.2.8)$$

$$SS_{it} = \sum_r (\lambda_{it}^r * ES_{it}^r) \quad \forall i, t \quad (5.2.9)$$

- Função linearizada do estoque de segurança.

$$\sum_r (\lambda_{it}^r \phi_{it}^r) = \sum_j (L_i \sigma_i^2 w_{ijt}) \quad \forall i, t \quad (5.2.10)$$

$$q_{it} \leq G y_{it} \quad \forall i, t \quad (5.2.11)$$

$$q_{it}, E_{it}, \geq 0 \quad \forall i, t \quad (5.2.12)$$

$$w_{ijt} \in [0,1] \quad \forall i, j, t \quad (5.2.13)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (5.2.14)$$

$$\lambda_{it}^r \in [0,1] \quad \forall i, t \quad (5.2.15)$$

$$\sum_r \lambda_{it}^r = 1 \quad \forall i, t \quad (5.2.16)$$

SOS2, ou seja, somente dois valores adjacentes são diferentes de zero.

c) Dados Adicionais

- N

Foi escolhido usar N=20 para podermos comparar com o modelo de linearização por partes, que foi rodado com o mesmo número de partições.

- ϕ_{it}^r

Tabela 8: Valores definidos para ϕ_{it}^r .

Partições	UO-RNCE/CD	UO-BA/CD	UO-SEAL/CD	UO-ES/CD
1	156,326.17	156,326.17	78,163.09	156,326.17
2	625,304.68	625,304.68	312,652.34	625,304.68
3	1,406,935.54	1,406,935.54	703,467.77	1,406,935.54
4	2,501,218.73	2,501,218.73	1,250,609.37	2,501,218.73
5	3,908,154.27	3,908,154.27	1,954,077.14	3,908,154.27
6	5,627,742.15	5,627,742.15	2,813,871.08	5,627,742.15
7	7,659,982.37	7,659,982.37	3,829,991.19	7,659,982.37
8	10,004,874.94	10,004,874.94	5,002,437.47	10,004,874.94
9	12,662,419.84	12,662,419.84	6,331,209.92	12,662,419.84
10	15,632,617.09	15,632,617.09	7,816,308.54	15,632,617.09
11	18,915,466.68	18,915,466.68	9,457,733.34	18,915,466.68
12	22,510,968.61	22,510,968.61	11,255,484.30	22,510,968.61
13	26,419,122.88	26,419,122.88	13,209,561.44	26,419,122.88
14	30,639,929.50	30,639,929.50	15,319,964.75	30,639,929.50
15	35,173,388.45	35,173,388.45	17,586,694.23	35,173,388.45
16	40,019,499.75	40,019,499.75	20,009,749.87	40,019,499.75
17	45,178,263.39	45,178,263.39	22,589,131.69	45,178,263.39
18	50,649,679.37	50,649,679.37	25,324,839.69	50,649,679.37
19	56,433,747.69	56,433,747.69	28,216,873.85	56,433,747.69
20	62,530,468.36	62,530,468.36	31,265,234.18	62,530,468.36

- ES_{it}^r

Tabela 9: Valores definidos para ES_{it}^r .

Partições	UO-RNCE/CD	UO-BA/CD	UO-SEAL/CD	UO-ES/CD
1	375.61	375.61	265.60	375.61
2	751.22	751.22	531.20	751.22
3	1126.84	1126.84	796.79	1126.84
4	1502.45	1502.45	1062.39	1502.45
5	1878.06	1878.06	1327.99	1878.06
6	2253.67	2253.67	1593.59	2253.67
7	2629.28	2629.28	1859.18	2629.28
8	3004.90	3004.90	2124.78	3004.90
9	3380.51	3380.51	2390.38	3380.51
10	3756.12	3756.12	2655.98	3756.12
11	4131.73	4131.73	2921.58	4131.73
12	4507.34	4507.34	3187.17	4507.34
13	4882.96	4882.96	3452.77	4882.96
14	5258.57	5258.57	3718.37	5258.57
15	5634.18	5634.18	3983.97	5634.18
16	6009.79	6009.79	4249.56	6009.79
17	6385.40	6385.40	4515.16	6385.40
18	6761.02	6761.02	4780.76	6761.02
19	7136.63	7136.63	5046.36	7136.63
20	7512.24	7512.24	5311.96	7512.24

5.3. Modelo com Função Aproximada do Estoque de Segurança

a) Função Objetivo

$$MinCT = \sum_t \sum_i M_i E_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j P_i y_{it} + \sum_t \sum_i AL_i q_{it} + \sum_t \sum_i \sum_j T_{ij} D_{jt} w_{ijt} \quad (5.3.1)$$

A função objetivo se mantém inalterada em relação ao modelo original.

b) Restrições

Todas as restrições se mantêm idênticas, exceto uma, justamente a relativa ao estoque de segurança. A aproximação é feita considerando os modelos apresentados por POZO (2010) e descritos anteriormente. Será utilizado o estoque máximo, que será considerado como o estoque médio somado a três desvios padrões. Esse número de desvios foi definido objetivando certa segurança de atendimento da demanda. A diferença entre o Estoque Máximo e o Estoque Médio de cada UP (justamente os três desvios), ponderada pela participação do armazém no atendimento de cada UP, será multiplicada pelo *lead time*, a fim

de garantir que, caso ocorra o estoque máximo durante o *lead time*, haja estoque suficiente para garantir o atendimento.

Seguem abaixo as restrições, com a restrição do estoque de segurança alterada. É válido ressaltar que o parâmetro z_i foi desconsiderado no modelo apresentado aqui. É esperado que esse modelo traga custos maiores, pois o estoque de segurança tenderá a ter um valor mais elevado.

$$\sum_i w_{ijt} = 1 \quad \forall j, t \quad (5.3.2)$$

$$E_{it} = E_{it-1} - \sum_j D_{jt} w_{ijt} + q_{it} \quad \forall i, t \quad (5.3.3)$$

$$E_{it} \geq SS_{it} \quad \forall i, t \quad (5.3.4)$$

$$SS_{it} = L_i * \sum_j (3\sigma_{Dj} * w_{ijt}) \quad \forall i, t \quad (5.3.5)$$

- Função aproximada do estoque de segurança

$$q_{it} \leq G y_{it} \quad \forall i, t \quad (5.3.6)$$

$$q_{it}, E_{it} \geq 0 \quad \forall i, t \quad (5.3.7)$$

$$w_{ijt} \in [0,1] \quad \forall i, j, t \quad (5.3.8)$$

$$y_{it} \in \{0,1\} \quad \forall i, t \quad (5.3.9)$$

6. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os modelos explicitados no tópico anterior foram rodados com os dados apresentados, extraídos do Projeto RELOG e adaptados pelos autores. O computador utilizado foi um Intel® Xeon® CPU ES-2620 0 @ 2.00 GHz (2 processadores) com 170 GB de RAM. Os modelos foram todos implementados em AIMMS. Os modelos lineares foram resolvidos pelo otimizador GUROBI 5.6. O objetivo deste tópico é fazer uma breve análise dos três modelos e, após isso, escolher apenas um para realizar análises de sensibilidade e propor melhorias

6.1. Modelo Linearizado por Partes

O modelo linearizado por partes apresentou um custo total de R\$ 2.420.268,00, representando um custo anual médio de R\$ 484.053,60. Apenas o armazém CD_SEAL foi aberto, significando que ele realizou o atendimento de todos os campos marítimos.

O armazém realizou pedidos com uma frequência média de 6,8 dias ao longo dos anos, sendo mais frequentes os pedidos nos anos de maior demanda. O estoque de segurança necessário para todo o sistema foi constante durante todos os anos, assumindo o valor de 5.289,10 kg, tendo um erro de linearização de 0,43%. O comportamento do estoque total, considerando a frequência de pedidos e a necessidade do estoque de segurança pode ser visto abaixo para um período de 30 dias em cada ano.

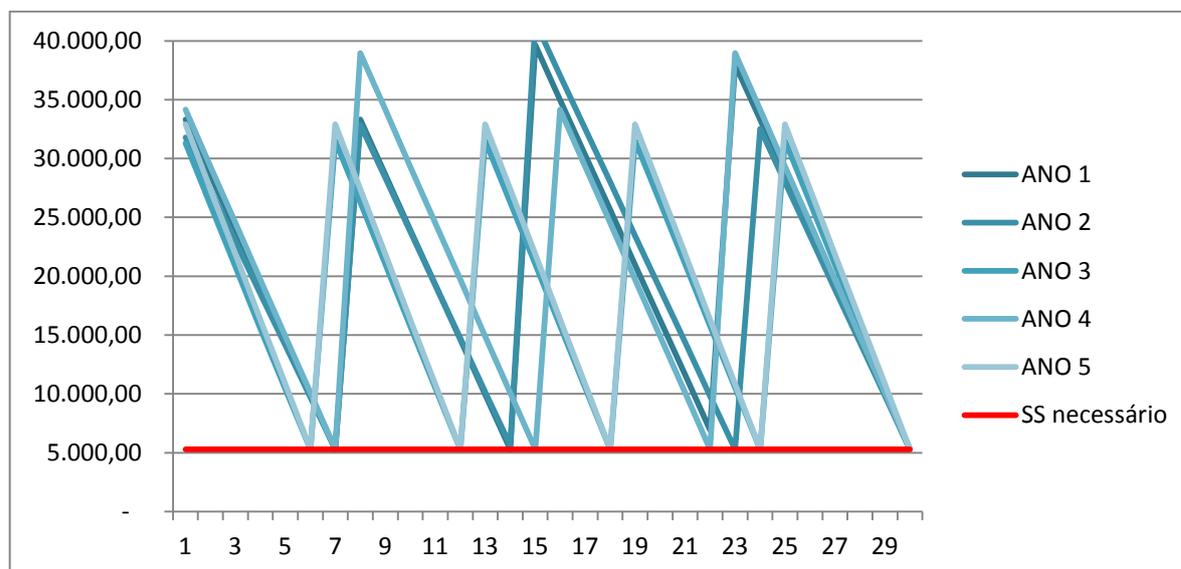


Gráfico 4: Comportamento do Estoque nos Armazéns ao longo dos anos para o modelo linearizado por partes.

O modelo precisou de 59.307 iterações e demorou 10,53 segundos, apresentando uma velocidade de 5.631,2 iterações/segundo.

6.2. Modelo utilizando o SOS2

O modelo linearizado utilizando o método SOS2 apresentou um custo total de R\$ 2.428.068,00 representando um custo anual médio de R\$ 485.613,60. Apenas o armazém CD_SEAL foi aberto, significando que ele realizou o atendimento de todos os campos marítimos.

O armazém realizou pedidos com uma frequência média de 7,1 dias ao longo dos anos, sendo mais frequentes os pedidos nos anos de maior demanda. O estoque de segurança necessário para todo o sistema foi constante durante todos os anos, assumindo o valor de 5.291,00 kg, tendo um erro de linearização de 0,39%. O comportamento do estoque total, considerando a frequência de pedidos e a necessidade do estoque de segurança pode ser visto abaixo para um período de 30 dias em cada ano.

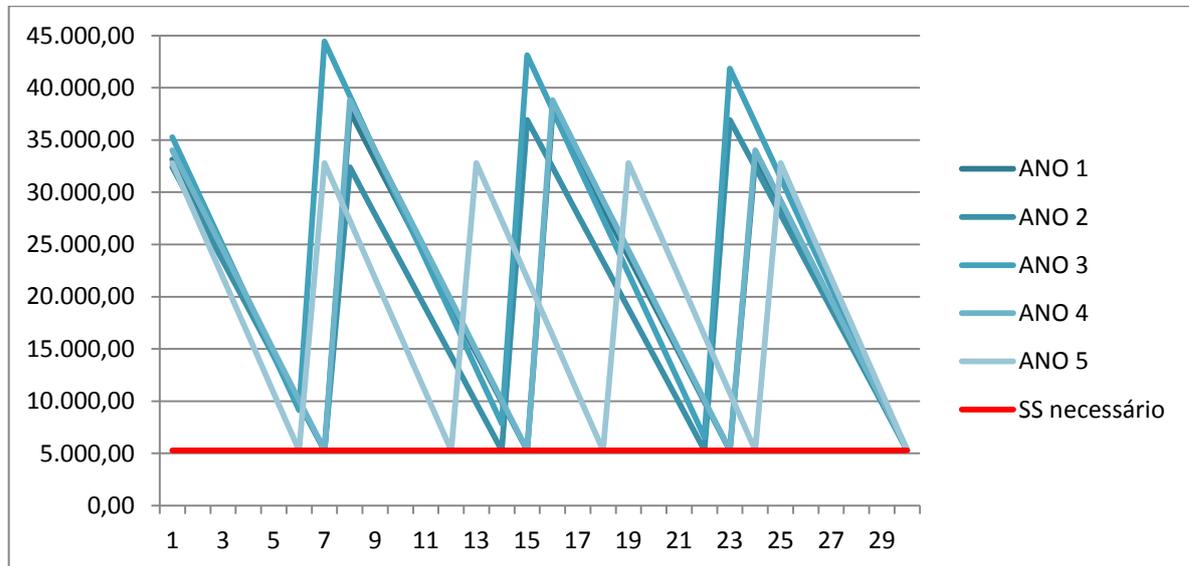


Gráfico 5: Comportamento do Estoque nos Armazéns ao longo dos anos para o modelo utilizando SOS2.

O modelo precisou de 8.029 iterações e demorou 2,92 segundos, apresentando uma velocidade de 2.748,7 iterações/segundo.

6.3. Modelo com Função Aproximada do Estoque de Segurança

O modelo utilizando a Função Aproximada do Estoque de Segurança apresentou um custo total de R\$ 2.672.280,00 representando um custo anual médio de R\$ 534.456,00. Apenas o armazém CD_SEAL foi aberto, significando que ele realizou o atendimento de todos os campos marítimos.

O armazém realizou pedidos com uma frequência média de 6,0 dias ao longo dos anos, sendo mais frequentes os pedidos nos anos de maior demanda. O estoque de segurança

necessário para todo o sistema foi constante durante todos os anos, assumindo o valor de 28.000,00 kg, tendo um erro de 427% comparado à função original. O comportamento do estoque total, considerando a frequência de pedidos e a necessidade do estoque de segurança pode ser visto abaixo para um período de 30 dias em cada ano.

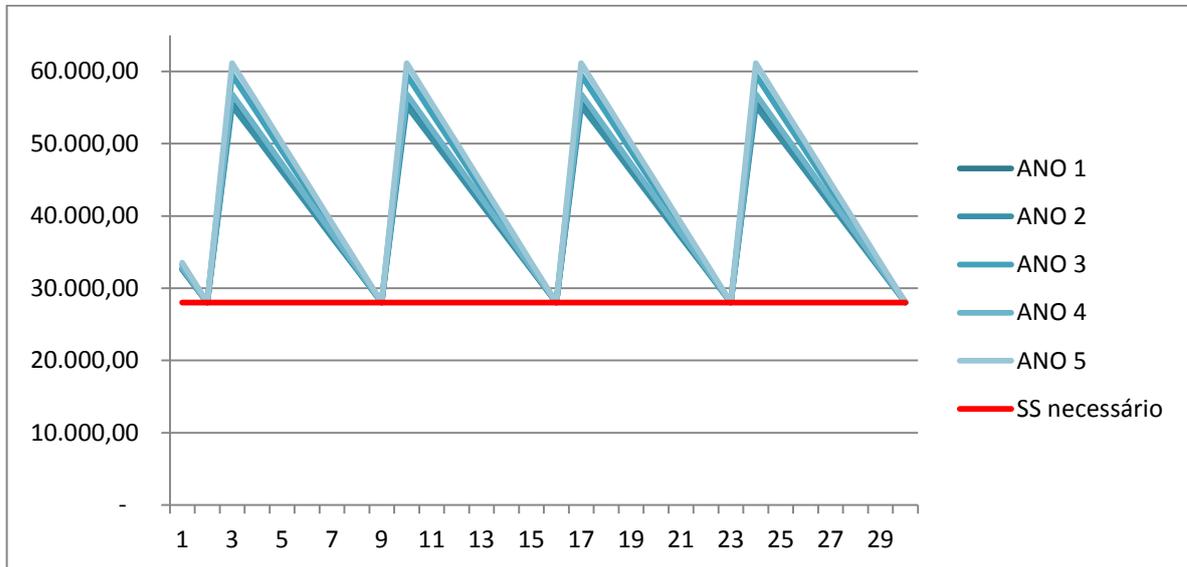


Gráfico 6: Comportamento do Estoque nos Armazéns ao longo dos anos para o modelo utilizando função aproximada.

O modelo precisou de 154.989 iterações e demorou 21,95 segundos, apresentando uma velocidade de 7.061,0 iterações/segundo.

6.4. Breve Comparação dos Modelos

Com os resultados apresentados anteriormente, pode ser feita uma breve análise comparativa dos modelos. Abaixo seguem alguns gráficos comparativos.

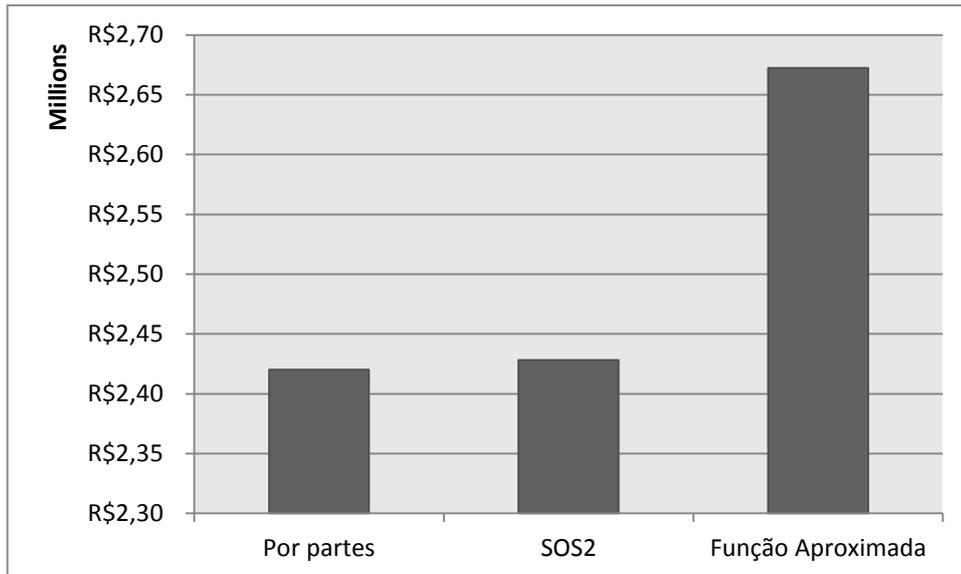


Gráfico 7: Custo total por modelo.

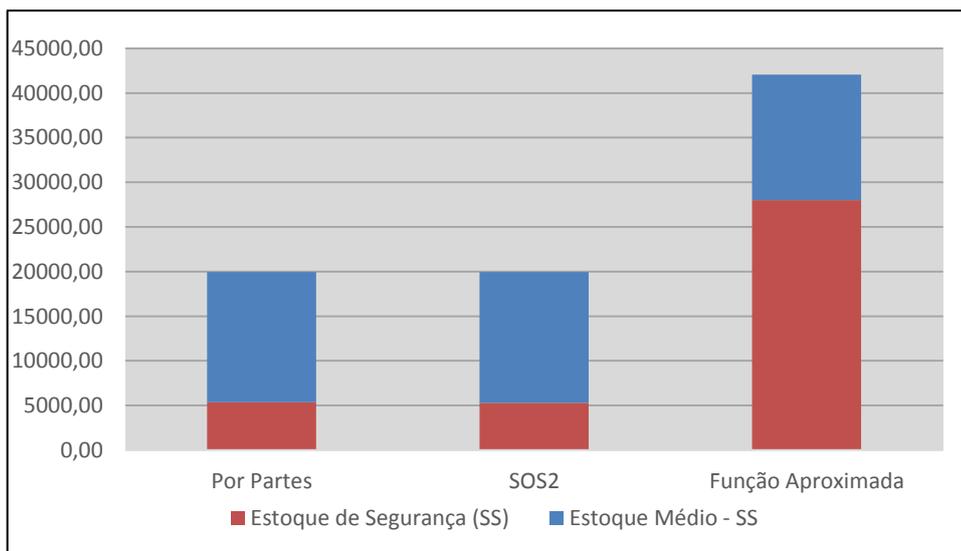


Gráfico 8: Estoque Médio Ano/dia e Estoque de Segurança por modelo.

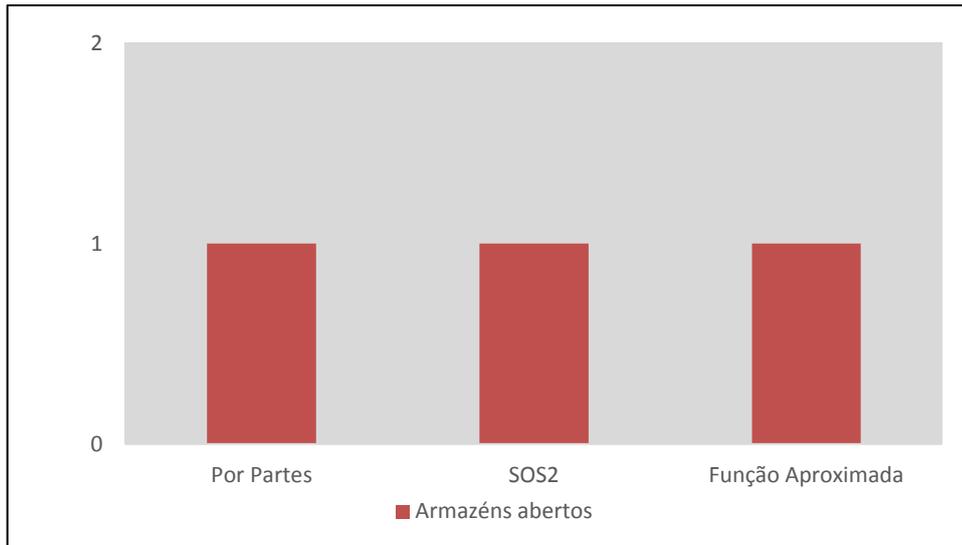


Gráfico 9: Armazéns abertos por modelo.

Tendo em vista os resultados dos modelos lado a lado, pode-se perceber que o modelo da função aproximada foi o mais discrepante em termos de custos e volume de estoque. Isso fica evidenciado pela grande diferença do tamanho do estoque de segurança em comparação com os demais modelos.

Tal discrepância já havia sido adiantada na seção anterior, tendo em vista que a função utilizada para aproximar o estoque de segurança é bem mais conservadora que a função original, onde o *lead time* tem sua participação dentro de uma radiciação, ao contrário da função aproximada. Caso seja necessário utilizar um volume mais conservador, além da opção de aumentar o fator de segurança nos modelos linearizados, pode-se utilizar o modelo da função aproximada. Tal modelo ainda pode se tornar mais conservador caso o Estoque Máximo considerado seja ainda maior.

Já os modelos linearizados mostraram bastante similaridade entre si em seus resultados, com o modelo do método SOS2 apresentando custos e estoque ligeiramente maior que o modelo da linearização por partes. Como vimos no subtópico 3.1.3, a função do estoque de segurança formulado em DASKIN *et al.* (2002) é côncava em relação à origem. Essa concavidade da função confirma o fato de que as linearizações feitas apresentarão valores iguais ou menores que a função original. O gráfico abaixo exemplifica essa garantia:

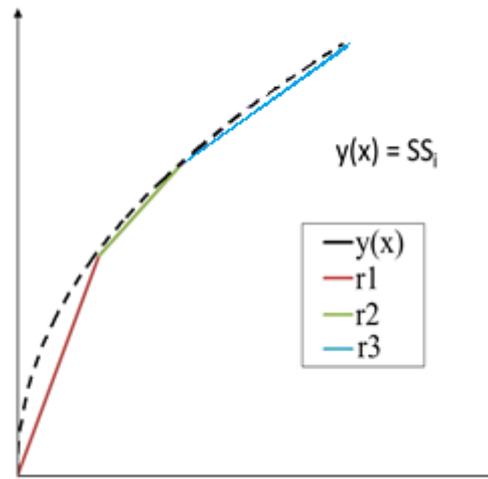


Gráfico 10: Exemplo de linearização de uma função côncava.

Como pode ser visto no gráfico acima, todas as retas que representam as partições da função côncava original se encontram na parte interior da concavidade da curva, garantindo que os valores obtidos por elas sejam sempre menores ou iguais aos originais.

Portanto, caso os dois métodos de linearização sejam comparados, poderia se dizer que a melhor linearização, ou seja, a mais condizente com a função original, dado os mesmos parâmetros e as mesmas restrições, é aquela que apresenta um maior valor para o estoque de segurança, por consequência maiores níveis de estoque e de custo. Como vimos que o nível de estoque do modelo linearizado via o método SOS2 foi ligeiramente maior que o modelo linearizado por partes, pode-se dizer que ela é mais assertiva. Tal explicação é validada pelo cálculo do erro de linearização, onde foi obtido um erro de linearização de 0,39% para o método SOS2 e 0,43% para o método clássico.

Apresentada a análise comparativa, os autores escolheram o modelo linearizado via SOS2 para que possam aprofundar não mais nas formas de linearização, mas sim nas variações de parâmetros e nas fundamentações do modelo.

6.5. Análise Aprofundada do Modelo

Pôde ser visto que, não só no modelo linearizado via SOS2, mas também nos demais, que o armazém UO-SEAL/CD representou 100% da alocação de atendimento da demanda em todos os anos. Esse desbalanceamento no atendimento é consequência de alguns parâmetros que fazem toda a demanda se deslocar para o armazém UO-SEAL/CD. Abaixo, será feita uma análise dos principais parâmetros que estão influenciando o modelo.

Pode-se dividir a função do custo total em quatro tipos de custos: custo de colocação do pedido do armazém para os fornecedores, custo de ressuprimento do armazém pelos fornecedores, custo de manutenção do estoque nos armazéns e custo de transporte do armazém para as unidades de produção. A definição e a representatividade de cada custo no total estão representadas abaixo:

- Custo de Colocação do Pedido : $\sum_t \sum_i \sum_j P_i y_{it}$
- Custo de Ressuprimento: $\sum_t \sum_i AL_i q_{it}$
- Custo de Estoque: $\sum_t \sum_i M_i E_{it}$
- Custo de Transporte: $\sum_t \sum_i \sum_j T_{ij} D_{jt} w_{ijt}$

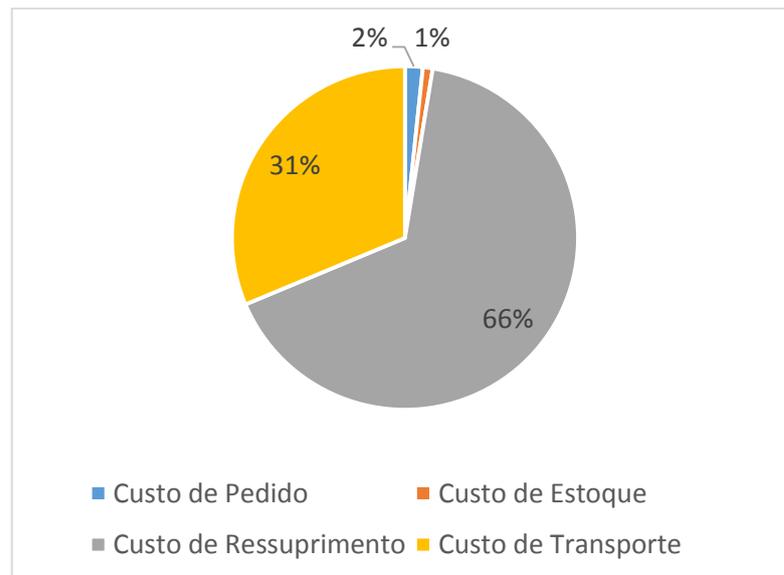


Gráfico 11: Representatividade dos custos.

O custo de ressuprimento visivelmente representa grande parte do custo total, atingindo 66%, seguido do custo de transporte, que representa 31%. Um dos motivos seria a diferença entre os valores unitários por quilo de cada custo. Vale lembrar também que a quantidade transportada para suprir o estoque de segurança inicial é elevada e contribui para que esse custo aumente.

Abaixo, encontra-se um gráfico que mostra essa diferença entre o custo unitário de ressuprimento, custo unitário de transporte a partir de UO-SEAL/CD, de onde sai 100% dos transportes, e o custo unitário de manutenção de estoque.

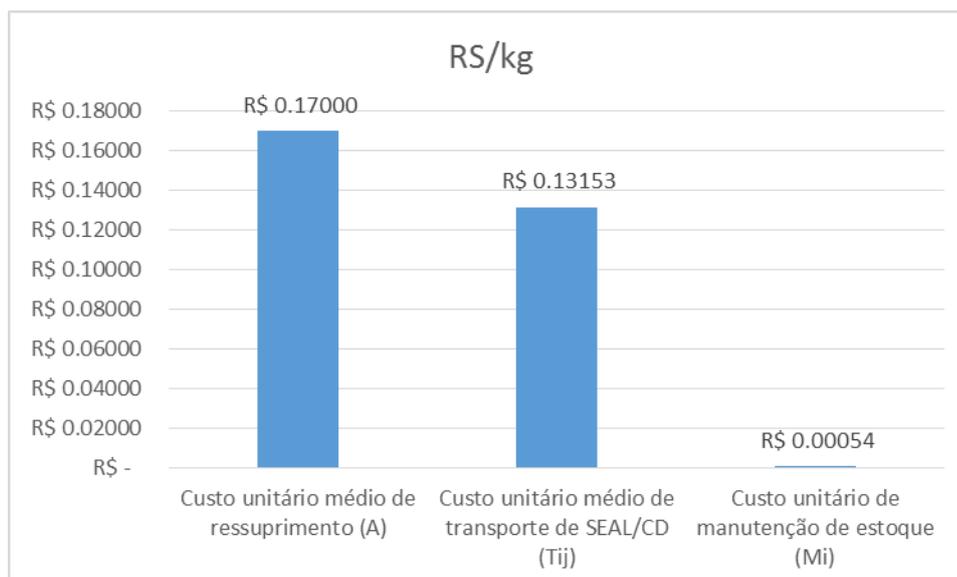


Gráfico 12: Comparação de custos.

Pode-se ver que o custo unitário de ressuprimento (A) é o maior, seguido do custo unitário de transporte (Tij), como ocorre com os custos totais. Porém, enquanto o custo total de ressuprimento é mais que o dobro do custo de transporte, o custo unitário de ressuprimento é apenas cerca de 30% maior que o custo de transporte. Assim, pode-se afirmar que a diferença no custo unitário não explica totalmente a diferença de representatividade do custo total.

Outra variável que pode explicar tal diferença é a quantidade de ressuprimento e a quantidade demandada, que são partes multiplicadoras das funções de custo de ressuprimento e de transporte, respectivamente. Tal diferença se dá pelo fato de haver o ressuprimento do estoque de segurança dos armazéns, fazendo com que dentro de um mês de 2009, a quantidade ressuprida seja de 144.434 kg e a quantidade demanda seja de 140.072 kg.

Tentando identificar a influência de cada custo na alocação da demanda, pode-se verificar que o custo de ressuprimento é o maior responsável pelo deslocamento de toda a demanda para o armazém UO-SEAL/CD. Porém, essa diferença não está relacionada ao custo unitário de ressuprimento (A), já que o valor é o mesmo para todos os armazéns. A principal diferença está no *lead time* (Li), que é um fator multiplicador dentro da função do custo de ressuprimento. Pela tabela 4, vemos que o armazém UO-SEAL/CD é o único que possui um valor diferente para o lead time, sendo de um dia enquanto o dos demais é de dois dias. Essa simples diferença faria com que todo o custo de ressuprimento que se teria em outro armazém fosse dobrado. Assim, o modelo se mostrou bastante sensível a esse fator.

Outra variável que pode ter influência na alocação é o tamanho do pedido. Considerando que:

- O valor limite, definido pela capacidade de um caminhão tanque, é de 40.500 kg, como vimos no item 4.2.4.d.2);
- Somente um caminhão realiza o ressuprimento a cada dia;
- A demanda diária média de 2009 é de 4.669 kg;
- O estoque inicial é igual ao estoque de segurança, ou seja, com o sistema estável o ressuprimento passa a ter que cobrir somente a demanda;
- O custo de estoque por dia é bem inferior ao custo de pedido.

Então, podemos chegar à conclusão de que, em média, é necessário um ressuprimento a cada 7 (sete) dias. Uma variação da variável G , que poderia ser explicada pelo uso de um caminhão com menor ou maior capacidade do que o usado no modelo afetaria a frequência do pedido, impactando no custo. Já na alocação da demanda nos armazéns, essa variação não teria tanto impacto, somente se um ressuprimento para o armazém UO-SEAL/CD não fosse suficiente para atender à demanda diária. Como G é bem maior que a soma das demandas diárias de cada unidade de produção, não consideraremos esse cenário.

Quanto ao custo de colocação do pedido, P_i , acaba por influenciar pouco na alocação da demanda aos armazéns por ter o mesmo valor, independente do armazém. Sua influência se faz, porém, na frequência de pedidos que o armazém UO-SEAL/CD faz aos fornecedores. Ou seja, quanto maior o custo de colocação do pedido, maior será a quantidade pedida e menor a frequência de pedidos do armazém, respeitando o tamanho máximo do pedido G .

Foi testado também um número maior de partições para o estoque de segurança, a fim de verificar se existe diferença significativa em comparação ao $R=20$ que foi utilizado. Assim, testamos com $R=40$, o dobro de partições em relação ao original. O resultado deu uma diferença de R\$ 11,00 em relação ao modelo com $R=20$, o que representa em porcentagem 0,03% do custo total. Portanto, partiremos das seguintes premissas:

- Quanto maior o R mais próximo da curva original se torna;
- A função de estoque de segurança é uma função côncava crescente e, portanto, cada vez que aumentarmos o valor de R , o crescimento da diferença será cada vez menor.

Assim, podemos assegurar que mesmo que aumentássemos abruptamente o valor de R , essa melhora não seria tão representativa para o custo total. Dessa forma, a linearização da função de estoque de segurança utilizando o método SOS2 pode ser considerada boa.

7. CONCLUSÃO

7.1. Críticas ao modelo

Ao longo de nossos testes, pudemos perceber alguns pontos em que tanto o modelo quanto a base de dados utilizada não foram satisfatórios. Esses casos são em maior parte referente a simplificações da realidade para tornar o modelo e a base de dados mais exequíveis.

A respeito da base de dados, a primeira grande crítica pode ser feita em relação ao resultado, que acabou tendendo a abertura de somente um armazém. Mesmo buscando obter uma base mais diversificada para tentar analisar o modelo ao máximo, vimos a influência de uma única variável, o *lead time*, ser fator determinante para a tendência da demanda para um único armazém.

Outro problema verificado foi que o custo unitário de manutenção de estoque e o custo unitário de ressuprimento eram valores iguais para todos os armazéns. Ter valor igual acaba por fazer o modelo depender pouco daquela variável e, assim, não ser possível identificar sua influência na solução encontrada. Além disso, o modelo passa a depender de poucas variáveis, tornando-se ainda mais simplificado do que na vida real.

Em relação ao modelo, podemos destacar que ele peca em alguns pontos. O primeiro deles seria que o custo do material não é afundado, caso um armazém que esteja aberto seja fechado. Também não existe um prazo de vencimento para o item estocado nos armazéns. Esse caso, porém, não ocorreu em nosso teste. Outra questão é que não há um custo fixo de abertura do armazém, ou seja, caso seja aberto um armazém ou quatro, isso não traz grandes impactos no custo total. Porém, se sabe que na vida real para abrir e operar um armazém, existe vários custos fixos que são incorridos.

Outra simplificação que diminui a aderência do modelo é a pouca importância dada ao fornecedor pelo modelo, compactando todos os fornecedores considerados como se fosse apenas um único. Assim, o custo de ressuprimento independe do fornecedor participante e, sobretudo, de sua localização. Ainda em relação ao fornecimento de material, apesar de o modelo ter como *input* o valor do *lead time*, além de não depender da distância e modal de transporte entre fornecedor e armazém, ele só é utilizado para o cálculo do estoque de segurança e do custo de ressuprimento. O ressuprimento de um armazém ocorre no mesmo período em que o pedido foi colocado, ignorando completamente a existência de um *lead time* de ressuprimento na operação.

Quanto ao elo armazém-cliente, podemos destacar a ausência de um *lead time* para esse transporte, ou seja, a demanda que deve ser atendida em um período é retirada do estoque do armazém nesse mesmo período. Outra variável que só entra no modelo para o cálculo do estoque de segurança é o desvio-padrão da demanda. Ela em nada influencia na demanda que deve ser atendida, sendo esta um valor médio diário fixo. Esse fato traz grandes prejuízos à aderência do modelo à realidade, visto que as demandas possuem grandes variações, que inclusive estão representadas pelo alto valor do desvio padrão carregado na base. Ter a demanda como um valor médio diário igual para todos os dias faz com que variáveis, como o estoque de segurança e a frequência de colocação de pedidos se mantenha sempre a mesma, tornando o modelo menos dinâmico e mais simples.

Uma simplificação que está intimamente ligada ao uso do desvio-padrão mencionado acima é o fato de as variáveis, principalmente a demanda, serem determinísticas e não estocásticas. Isso traz uma grande simplificação da realidade, já que não se pode ter certeza em relação a uma demanda futura e seu desvio padrão, por exemplo.

Por fim, podemos destacar a simplificação já descrita nos itens anteriores em relação ao modelo funcionar para apenas um produto, o que está completamente destoante da realidade do apoio *offshore*.

7.2. Sugestões para Trabalhos Futuros

Para o prosseguimento do trabalho de aprimorar e buscar um modelo que retrate bem a realidade do apoio *offshore*, seria interessante que se focasse na solução dos problemas apontados pelo item anterior. A inserção de mais de um produto no modelo, por exemplo, em que teria todas as variáveis atuais sendo dependentes do produto demandado ou ressuprido aumentaria bastante a complexidade do modelo e sua aderência. A inclusão dos *lead times* de atendimento da demanda e de ressuprimento na função de balanceamento de estoque do modelo seria outro avanço, além de um custo fixo do armazém, como apontados no item anterior.

Outro grande passo seria avançar no tratamento das variáveis de demanda e seu desvio-padrão como variáveis estocásticas. Caso isso não seja possível, uma saída seria tratar a base antes de inseri-la no modelo de forma que sejam gerados dados que sigam a distribuição da demanda. Assim, poderia ser possível avaliar oscilações entre um dia e outro maiores do que a diferença de demanda entre os anos, que foi avaliada no presente trabalho.

Pode ser interessante também que se faça um trabalho na direção de ampliar o número de parâmetros do modelo, já que os atuais são valores genéricos que representam uma soma de vários valores menores. Como exemplo podemos citar o custo de ressuprimento por unidade, que é inserido no modelo, mas que varia com o modal utilizado, o preço do combustível, inflação, relação com transportadoras, dentre outros.

Por fim, pode-se perceber que as sugestões dadas acarretam o aumento da complexidade do modelo, podendo trazer não linearidades e complicações que, assim, comprometeriam a solução do modelo pelo otimizador e *software* utilizados. Portanto, é interessante que se busque *softwares* ou otimizadores que possuam melhores performances para comportar modelos cada vez mais complexos e próximos à realidade.

7.3. Aprendizado

Os autores conseguiram por meio desse projeto desenvolver múltiplos aprendizados, pela abrangência e pela certa complexidade em resolver os problemas que nele surgiram.

Primeiramente, é válido destacar o problema escolhido para o trabalho. O tema abordando redes logísticas da cadeia do petróleo é de suma relevância no cenário econômico do país e conhecer este tema foi de fato uma grande oportunidade de aprendizado.

Em seguida, pode-se citar o aprendizado em programação matemática. Foi possível neste trabalho desenvolver os conhecimentos aprendidos em algumas disciplinas da graduação, onde podem ser citadas Pesquisa Operacional I e II, Gestão de Operações na Exploração e Produção de Petróleo, além de outras que complementam todo o arcabouço teórico necessário para desenvolver este trabalho. Somado a isso, desenvolveu-se o conhecimento em um software de otimização de larga utilização no mercado, o que representa uma experiência relevante para os autores.

Por fim, pode-se citar o grande legado que a graduação em Engenharia de Produção na UFRJ proporciona aos seus alunos. Esse legado se trata da capacidade de resolver problemas e desenvolver projetos, o que torna o Engenheiro de Produção um profissional diferenciado no mercado.

BIBLIOGRAFIA

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS, 2014. *Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis*, Rio de Janeiro.

AMARAL, J. T., DOURADO, L. O., 2011, "Gestão de Estoque". *III Encontro Científico e Simpósio de Educação Unisalesiano*, número não informado, Lins, São Paulo, Brasil, 17-21 de Outubro.

BAIN & COMPANY, TOZZINIFREIRE ADVOGADOS, 2009, *Estudos de Alternativas Regulatórias, Institucionais e Financeiras para a Exploração e Produção de Petróleo e Gás Natural e para o Desenvolvimento Industrial da Cadeia Produtiva de Petróleo e Gás Natural no Brasil*. Realizado com recursos do Fundo de Estruturação de Projetos do BNDES (FEP).

BISSCHOP, J., 2012, "AIMMS Optimization Modeling's Guide", disponível em <http://www.aimms.com/downloads/manuals/optimization-modeling/>, Paragon Decision Technology.

CAMEIRA, R, 2003, *Configuração de redes logísticas: objetivos, conceitos e técnicas de Modelagem*. *XXIII Encontro Nac. de Eng. de Produção*.

DASKIN, M. S., COULLARD, C. R. "An Inventory-Location Model: Formulation, Solution", In: **Annals of Operations Research** v. 110, n.1, pp. 83–106, 2002.

FERREIRA, P. A. V., 2005, "Introdução à Pesquisa Operacional", Notas de Aula, **Departamento de Telemática**, Universidade Estadual de Campinas.

FERREIRA FILHO, V. J. M., 2014, *Gestão de Operações e Logística na Produção de Petróleo*. Tese para promoção a Prof. Titular, UFRJ, Rio e Janeiro, RJ, Brasil.

ILOS, 2013, *Planejamento de Redes Logísticas*. Material de capacitação de novos funcionários.

PIQUET, R., 2010, "A Cadeia Produtiva do Petróleo no Brasil e no Norte Fluminense". *III Encontro de Geografia do Instituto Federal Fluminense*, 2179-3263, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil, 16-19 de Novembro.

POZO, H., 2010, *Administração de Recursos Materiais e Patrimoniais: uma abordagem logística*. 6ª ed. São Paulo, Atlas.

RIBEIRO, G., 2014, *Definição de Redes Logísticas*. Visagio Engenharia e Gestão.

SILVA, T. C. M., 2012, *Gerenciamento Dinâmico da Localização de Armazéns e Alocação de Estoques Aplicado ao Abastecimento de Unidades de Produção Offshore*. Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.