

ÉRICA KATO PACHECO FERRAZ

Pesquisa Operacional aplicada à otimização na aquisição de testemunhos de rocha em campo de petróleo.

Santos
2022

ÉRICA KATO PACHECO FERRAZ

Pesquisa Operacional aplicada à otimização na aquisição de testemunhos de rocha em campo de petróleo.

Versão Original

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

Área de concentração: Engenharia Mineral

Linha de pesquisa: Óleo e gás

Orientador: Prof. Dr. Artur Pinto Chaves

Santos
2022

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

FERRAZ, ERICA

Pesquisa Operacional aplicada à otimização na aquisição de testemunhos de rocha em campo de petróleo. / E. FERRAZ -- São Paulo, 2022.

61 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.MODELOS MATEMÁTICOS (ANÁLISE QUANTITATIVA)
2.AMOSTRAGEM 3.PETROLOGIA 4.PESQUISA OPERACIONAL
I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Nome: FERRAZ, Érica Kato Pacheco

Título: Pesquisa Operacional aplicada à otimização na aquisição de testemunhos de rocha em campo de petróleo.

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

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento: _____

Prof. Dr. _____

Instituição: _____

Julgamento _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Prof.^a Dr.^a Elsa Vásquez Alvarez, por me apresentar a um novo mundo de métodos e conceitos e por me incentivar na realização deste trabalho. Por ser minha guia, professora, referência e por tanta paciência, e por me ajudar, e estar ao meu lado a cada passo e dificuldade neste caminho. Sem sua ajuda nada disso seria possível.

Agradeço também ao meu orientador Prof. Dr. Artur Pinto Chaves, por toda a paciência e contribuição.

Agradeço a Petrobras S.A. que me incentivou desde o início, pelo tempo dedicado e o fornecimento dos dados para o trabalho.

Agradeço ao PMI e a USP, pela formação fantástica que pude receber esses anos, e pelo suporte com *softwares*, e em especial a Beleza Matsuoka por me ajudar pacientemente todos esses anos.

Agradeço minha família por todo apoio e incentivo desde os primeiros passos.

Agradeço ao Marcelo por ser parceiro, editor, leitor, incentivador e amigo.

Por fim, agradeço minha filha Lis por ser tão compreensiva com toda a falta de atenção durante o processo, e por nos momentos mais conturbados me trazer paz, amor, carinho e sorrisos.

RESUMO

A aquisição de perfis petrofísicos, dados de rocha e testes de produção e injetividade são ferramentas decisivas no entendimento e desenvolvimento de um campo de petróleo. A aquisição destes dados é bastante custosa, mas consiste em uma informação preciosa na indústria da exploração de hidrocarbonetos. É preciso estimar o valor e necessidade de toda informação a fim de reduzir os custos sem prejudicar os modelos de produção. Minimizar os custos reflete na maximização dos lucros. A programação matemática vem para apoiar engenheiros e geólogos nas tomadas de decisão para a aquisição de dados no desenvolvimento de um campo de petróleo.

É o objetivo da dissertação desenvolver um modelo de programação linear inteira mista (MILP) que minimize os custos na aquisição de testemunhos do reservatório de um campo de petróleo localizada na bacia de Santos (Brasil). A formulação do modelo considera hipóteses para o planejamento da aquisição de testemunhos de rocha desde o início do ciclo de vida de um campo, antes da perfuração dos primeiros poços de produção. Com a perfuração dos poços, obtenção de novas informações e o acúmulo de conhecimento sobre a área, o modelo proposto deverá ser constantemente atualizado, até que os últimos testemunhos sejam coletados. O modelo foi implementado no Software GAMS™ (*General Algebraic Modelling System*) v25.1.2 com o solver CPLEX (v12.8.0.0) em um computador Intel Core i3, 2.3 GHz. O modelo foi aplicado inicialmente na solução de um caso hipotético e posteriormente validado com um caso real. Os resultados indicam a redução de custos, diminuindo muito o número de poços a serem amostrados e as consequentes mobilizações de equipamentos para realização de testemunhagem. A contribuição do trabalho consiste na aplicação de programação matemática como auxílio na tomada de decisão para a escolha dos melhores poços a serem testemunhados, garantindo uma melhor representatividade das fácies do reservatório, além de contemplar as necessidades de informação no ciclo de vida total do campo.

Palavras chave: Pesquisa Operacional, Otimização, Programação Linear, Testemunho, Campo de Petróleo.

ABSTRACT

The acquisition of petrophysical profiles, rock data, and production and injectivity tests are decisive tools in understanding and developing an oilfield. The acquisition of these data is quite costly, but it is valuable information in the hydrocarbon exploration industry. The relationship between value and need for all information is necessary to reduce costs without harming production models. Minimizing costs reflects on maximizing profits. Mathematical programming can support engineers and geologists in decision-making for data acquisition in the development of an oilfield. Therefore, this research aimed to develop a mixed-integer linear programming (MILP) model that minimizes the costs in the acquisition of cores from the reservoir of an oilfield in Santos Basin (Brasil). The model formulation considers hypotheses for planning the acquisition of rock cores from the beginning of a field's life cycle, before drilling the first production wells. The proposed model must be constantly updated with the drilling of wells, acquisition of new information, and the accumulation of knowledge about the area until the last cores are collected. The software GAMS™ (General Algebraic Modeling System) v25.1.2 with solver CPLEX (v12.8.0.0) was used to solve the problem in an Intel Core i3 computer 2.3 GHz. The model was initially implemented in the solution of a hypothetical case and later validated with an actual case. The results indicate a reduction in costs, greatly reducing the number of wells to be sampled and hence the mobilization of equipment to carry out coring. The contribution of this study consists in the application of mathematical programming as an aid in decision-making for the choice of the best wells to be cored, ensuring a better representation of the reservoir's facies, in addition to contemplating the information needs in the total life cycle of the field.

Keywords: operational research, optimization, data acquisition, core sample, oil field.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1. Testemunho de rocha retirado em poço de petróleo.....	31
Figura 2. Coroa de diamante para corte de testemunho de rocha	31
Figura 3. a) Observa-se o testemunho com os pontos de amostragem, nos quais foram retirados os plugues (b) para a confecção de lâminas de rocha (c) e realização de ensaios de laboratório	32
Figura 4. Resolução vertical das diferentes análises em um campo de petróleo e o volume de reservatório avaliado em cada uma das análises	33
Figura 5. Observa-se na curva azul, a variação do valor da informação obtida a partir das análises dos testemunhos ao longo do ciclo de vida de um campo de petróleo, desde as primeiras etapas exploratórias até as etapas de declínio e abandono do campo	34
Figura 6. Esquema de um poço tipo i com as distintas zonas j a serem perfuradas. Onde $P_{i,j}$ é a profundidade prevista para o topo das zonas estratigráficas, $E_{s_{i,j}}$ é a espessura prevista para cada zona no poço e $Y_{i,j}$ é a quantidade de metros a ser testemunhada no poço i , em cada uma das zonas j	39
Figura 7. Perfil geológico do campo de petróleo TAMBORIL.....	44

LISTA DE SIGLAS

- AHP - Metodologia Multicritério de Apoio a Decisão
- AI - Inteligência Artificial
- BB - Branch and Bound
- DEA - Análise Envoltória de Dados
- PO - Pesquisa Operacional
- PL - Programação Linear
- PLIM - Programação Linear Inteira Mista
- PNL - Programação Não Linear
- PNLIM - Programação Não Linear Inteira Mista
- VME - Valor Monetário Esperado
- VPE - Valor Presente Líquido

LISTA DE SÍMBOLOS

Índices

i = poços

j = zonas

Escalar

K = custo métrico da retirada de testemunho (\$)

Cc = custo métrico do corte de testemunho (\$)

Cmb = custo de mobilização (\$)

M = limite superior vinculado ao custo médio de mobilização por poço

Parâmetros

$Es_{i,j}$ = espessura no poço i da zona j

$P_{i,j}$ = profundidade no poço i da zona j

Variáveis binárias

X_i = indica se o poço i é selecionado para ser testemunhado

$Zz_{i,j}$ = Indica se no poço i , a zona j é selecionada para ser testemunhada

Variáveis inteiras

Nt_i = número de descidas do barrilete para testemunhar o poço i (ou seja, o número de barriletes a serem retirados em cada poço)

n = variável inteira positiva

Variáveis contínuas

$Y_{i,j}$ = variável positiva, que indica a quantidade de metros testemunhados do poço i na zona j

L = função a ser minimizada

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Espessuras das zonas de reservatório $E_{s,i,j}$ no campo TAMBORIL.....	45
Tabela 2. Profundidades das zonas de reservatório $P_{i,j}$ no campo TAMBORIL.	45
Tabela 3. Resultados do problema fictício – campo TAMBORIL.....	46
Tabela 4. Espessuras das zonas $E_{s,i,j}$ no campo REGIUS	47
Tabela 5. Profundidades das zonas reservatório $P_{i,j}$ no campo real de REGIUS	48
Tabela 6. Resultados consolidados das duas etapas no planejamento do campo REGIUS.....	51

SUMÁRIO

1.	
INTRODUÇÃO	13
2. REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1 INTRODUÇÃO À PESQUISA OPERACIONAL	16
2.1.1 Histórico da Pesquisa Operacional	16
2.1.2 Ferramentas da Pesquisa Operacional	18
2.1.3 Elementos de um modelo	19
2.1.4 Modelos determinísticos	20
2.1.5 Aplicações da Pesquisa Operacional em áreas diversas	24
2.1.6 A Pesquisa Operacional na Indústria do Petróleo	26
2.1.7 A Pesquisa Operacional na Indústria do Petróleo no Brasil	29
2.2 PROGRAMAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE TESTEMUNHOS	30
3. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA	36
4. MATERIAIS E MÉTODOS	37
5. APRESENTAÇÃO DO MODELO	38
5.1 FORMULAÇÃO DO MODELO	38
5.1.1 Definição do problema de testemunhagem de rocha	38
5.1.2 Elementos do modelo	39
5.1.3 Premissas do modelo	40
5.1.4 Modelo matemático de planejamento	41
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	44
6.1 EXEMPLO DE INSPIRAÇÃO: CAMPO FICTÍCIO DE TAMBORIL	44
6.2 ESTUDO DE CASO REAL: CAMPO REGIUS	46

7. CONCLUSÕES	54
8. CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO	56
9. PROPOSTAS DE CONTINUAÇÃO DO TRABALHO	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

A recente crise na indústria petrolífera, levou as empresas da área a situações extremas. Desta forma, desde a exploração até o refino e a venda, os esforços foram voltados para a redução de custos e otimização de projetos. Atualmente, atravessamos um cenário mais favorável, com a alta dos preços do petróleo no mercado internacional, mas a cultura de redução de custos e otimização de projetos permanecem, no intuito de maximizar lucros e estar preparados para crises futuras.

Na área de perfilagem e aquisição de dados em poços de produção, a demanda por redução em custos é constante e extremamente necessária para que os campos se mantenham lucrativos. No início do desenvolvimento de um campo deve ser previsto o número de poços produtores e injetores a serem perfurados. Esses poços também devem ser utilizados para a aquisição dos dados que irão alimentar os modelos de produção do campo. Em um poço, pode ser adquirida uma série de dados petrofísicos a partir de ferramentas de perfilagem que medem diferentes propriedades das rochas, além da coleta de amostras laterais, amostras de fluido e testemunhos de rocha, testes de formação a poço revestido e testes de injetividade.

A aquisição dessas informações tem custo elevado, mas é essencial para o conhecimento do campo e a construção de um modelo de reservatório que represente o campo adequadamente. Neste sentido o lucro é otimizado quando adquirimos o mínimo de informações que permitam a construção de um modelo coerente e representativo, sem perder a robustez.

Ou seja, o alto custo das informações não pode ser impeditivo para a aquisição delas, pois os ganhos associados são muito mais altos que os custos envolvidos, uma vez que os dados adquiridos visam aumentar os fatores de sucesso e recuperação e, com isso, elevar a lucratividade da companhia. No entanto, quanto menor o lucro previsto em um campo, menores serão os investimentos nessa área, e assim é preciso dimensionar os recursos de maneira otimizada.

As principais informações que costumam ser adquiridas através de perfilagem são:

- perfis de raios gama
- perfis de resistividade
- perfis de densidade
- perfis de nêutrons

- perfis de ressonância Magnética
- perfis de espectroscopia de raios gamma
- perfis de litogeoquímico
- testes de pressão
- perfis de imagem resistiva
- perfis de imagem acústica
- coleta de amostras laterais
- amostragem de fluidos

O custo de uma perfilagem completa pode chegar a cerca de 10 milhões de dólares. Por se tratar de medições de diferentes propriedades das rochas, que fornecem informações e interpretações indiretas, devem ser complementadas e calibradas pelas informações obtidas através da coleta de testemunhos.

A aquisição de testemunhos de rocha é bastante custosa e essencial na compreensão dos reservatórios. Apesar de pontual, a informação obtida dos testemunhos é direta, com a maior resolução vertical possível, sendo por isto tão imprescindível. Quanto mais complexo forem o reservatório e a rocha, maior será o valor fornecido por um testemunho e maior será a necessidade de aquisição. Dependendo da fase do ciclo de vida do campo, essa necessidade também pode variar.

A extensão do campo, a posição do poço no campo/estrutura, a presença ou não de falhas e heterogeneidades ao redor de cada poço, o momento na história de exploração do campo em que os poços serão perfurados, as incertezas do modelo, o número de poços a serem perfurados, o custo e qualidade da sonda que realizará a perfuração e o tipo de completação do poço norteiam o geólogo na decisão de em quantos e quais poços deverão ser coletados testemunhos.

O desafio deste trabalho consiste em construir um modelo de otimização de aquisição de testemunhos de rocha no desenvolvimento de um campo de petróleo, que permita o conhecimento adequado do campo ao menor custo associado.

Na construção desse modelo de otimização pretende-se utilizar os métodos da Pesquisa Operacional (PO, ou *Operational Research* na Inglaterra ou *Operations Research* nos Estados Unidos ou Investigação Operacional em Portugal). Segundo Moraes (2013), pode-se definir como PO a utilização de técnicas tais como modelagem matemática, estatística e algoritmos para o apoio à tomada de decisão,

em problemas e situações reais. O uso da PO em uma empresa envolve o estudo do problema, a formulação, construção, testes de validação do modelo, e, frequentemente, o desenvolvimento e implantação de um sistema de informação envoltório.

Atualmente, a PO vem sendo aplicada em diversas áreas da indústria de óleo e gás, mas ainda não são utilizados modelos de otimização no planejamento de aquisição de dados petrofísicos. No presente trabalho, pretende-se construir um modelo que possa ser aplicado nesta área, gerando economia, sem prejuízo às informações necessárias ao desenvolvimento otimizado do campo.

2. REVISÃO DA LITERATURA

A pesquisa bibliográfica baseou-se em livros textos, dissertações, teses e artigos científicos das bases de dados SCOPUS, *Web of Science*, *Google Scholar*, *Science Direct* e *Research Gate*.

Para a pesquisa realizada nas bases citadas anteriormente, foram utilizadas as palavras-chave abaixo, combinadas de diferentes formas:

- *Operations Research*
- *Operational Research*
- *Petroleum Exploration*
- *Oil*
- *Gas*
- *Optimization*
- *Mathematical Programming*
- *Upstream*

2.1 INTRODUÇÃO À PESQUISA OPERACIONAL

A PO é um ramo da matemática aplicada que faz uso de modelos matemáticos, ferramentas estatísticas e algoritmos para auxiliar na tomada de decisões em sistemas reais determinísticos ou probabilísticos. Consiste em matemática aplicada a soluções do mundo real. Na prática, dado um certo problema, é elaborado um modelo e implementado num *software* que utiliza ferramentas matemáticas, e busca-se assim a melhor solução possível, num universo de inúmeras possibilidades.

2.1.1 Histórico da Pesquisa Operacional

Normalmente associamos as grandes guerras à dor, mortes, destruição e sofrimento, no entanto, as necessidades em tempos de guerra também fomentam grandes ideias e desenvolvimento tecnológico. Novas máquinas, técnicas e tecnologias criadas em tempos de guerra acabam por servir à população civil anos mais tarde. Soluções e tecnologias amplamente difundidas atualmente como por

exemplo os sistemas de posicionamento global, o micro-ondas, o controle de tráfego aéreo e até mesmo o computador surgiram nas dificuldades de grandes guerras.

Nesse sentido, a PO surgiu na Inglaterra durante a Segunda Guerra Mundial (1939-1945). O primeiro uso formal nessa área foi realizado por um grupo de cientistas focado na solução de problemas de ordem logística, tática e estratégia, que estudava a utilização mais eficaz dos recursos militares. Na ocasião, problemas como manutenção e inspeção de aviões, projeto de explosivos, melhoria na utilização de radar, táticas de bombardeio, dimensionamento de frotas, entre muitos outros foram estudados pela equipe de cientistas ingleses (Belfiore & Fávero, 2013).

Os excelentes resultados levaram à disseminação da PO nos Estados Unidos, e em 1947 o método Simplex para a resolução de problemas de programação linear (PL) foi desenvolvido pela equipe liderada por George B. Dantzig (Belfiore & Fávero, 2013).

Dantzig, que na época trabalhava para o Pentágono como conselheiro em matemática da Força Aérea, procurava desenvolver um método para mecanizar o processo de planejamento utilizado pela Força Aérea norte-americana. Seus esforços resultaram no algoritmo Simplex, que se trata de um mecanismo matemático que serve para resolver problemas de PL. A simplicidade, rapidez e precisão da solução computacional levaram ao sucesso do método que é utilizado até os dias de hoje (Colin, 2018).

Em 1963, Dantzig publicou com o apoio da Rand Corporation o livro *Linear Programming and Extensions*, dividido entre capítulos mais teóricos, nos quais o autor discorre sobre conceitos, origem e formulação da PL, e capítulos de aplicação dos métodos em problemas reais. No mesmo livro foi apresentado o método Simplex desenvolvido anteriormente.

Desde então, a PO avançou muito. Tal avanço, associa-se ao impacto financeiro promovido pelos modelos de otimização em PO e ao avanço tecnológico dos computadores. Modelos cada vez mais bem formulados e abrangentes foram desenvolvidos e outros métodos foram criados, permitindo a solução de problemas cada vez mais complexos (Colin, 2018).

Colin (2018) aponta que, em 1952, o método foi utilizado pela primeira vez fora do contexto militar, na procura da mistura ótima de componentes para produção de gasolina. A *Rand Corporation* foi responsável pelo desenvolvimento do primeiro código computacional comercial de PO.

Fávero e Belfiore (2013) definem a PO como “A utilização de um método científico (modelos matemáticos, estatísticos e algoritmos computacionais) para a tomada de decisões”.

Ainda segundo Colin (2018) a PO promove uma nova forma de pensar, uma nova abordagem nas tomadas de decisão e solução de problemas. Atualmente tais técnicas auxiliam nas decisões das áreas mais diversas, tais como engenharia de produção, matemática aplicada, administração de empresas, gestão de negócios, recursos humanos, vendas entre outras.

Após mais de 60 anos de aplicações, a PO consolidou-se e permanece atual. Sua abrangência é imensa sendo utilizada em grandes empresas como AT&T, *Delta Air Lines*, *Eletronbras*, *Exxon*, HP, IBM, Kellogg, Petrobras, Texaco, NBC, Sadia, GE Capital, Procter & Gamble, entre tantas outras (Colin, 2018).

No Brasil acredita-se que a primeira publicação na área foi realizada por Leme (1956) com a construção de uma teoria para tomada de decisão dos empresários, que visa assegurar as melhores e mais eficazes escolhas das ações a serem seguidas em uma empresa qualquer, com o objetivo de maximização dos lucros. Primeiramente Leme (1956) elenca uma série de fatores que desqualificam a Análise Marginal como ferramenta mais adequada, e a seguir, o autor apresenta a técnica de PL como um excelente instrumento que fornece as melhores soluções para problemas de decisão que não envolvam incertezas. Por fim, o autor aborda um novo cenário com o problema da introdução de incertezas, e com base no artigo publicado por Dantzig (1955), ele constrói uma espécie de esboço de uma teoria da PL na incerteza.

2.1.2 Ferramentas da Pesquisa Operacional

Eom & Kim (2006) apresentam uma relação das ferramentas da PO, tais ferramentas são agrupadas pelos autores em três grupos principais, os Modelos Determinísticos, os Modelos Estocásticos e Outras Técnicas.

Modelos Determinísticos	Modelos Estocásticos	Outras Técnicas
Programação Linear	Teoria das Filas	Metodologia Multicritério de Apoio à Decisão (AHP)
Programação em Redes	Modelos de Simulação	Análise Envoltória de Dados (DEA)

Programação Binária e Inteira	Programação Dinâmica Estocástica (Cadeias de Markov)	Inteligência Artificial
Programação por Metas ou Multiobjetivo	Teoria dos Jogos	Inteligência Computacional
Programação Não Linear		Heurísticas e Meta-heurísticas
Programação Dinâmica Determinística		Entre outras

Na presente dissertação serão utilizados Modelos Determinísticos de PL, que serão descritos brevemente a seguir.

2.1.3 Elementos de um modelo

Vásquez-Alvarez (2000) aponta função objetivo, variáveis de decisão e restrições como elementos chave de um modelo matemático.

Função objetivo

Trata-se da função matemática que quantifica a solução do problema, definida como índice de desempenho, deve ser maximizada ou minimizada através de técnicas matemáticas de otimização, a fim de encontrar a melhor solução (solução ótima), que será aquela que apresentar o melhor desempenho do sistema.

Variáveis de decisão

As variáveis de decisão consistem em todas as opções possíveis em um dado problema, são as variáveis independentes definidas na modelagem. Podem representar dimensões, quantidades, condições de operação, etc.

As variáveis podem ser contínuas, discretas ou mistas. As variáveis classificadas como contínuas são aquelas que podem assumir todos os valores contidos em um dado intervalo, ou seja, que apresentam um número infinito de valores entre dois valores quaisquer. Já as variáveis discretas são aquelas que admitem valores preestabelecidos, ou seja, entre dois valores quaisquer, podem assumir um

número finito de valores. Quanto às variáveis mistas têm domínio parcialmente contínuo e discreto.

Variáveis inteiras e variáveis binárias são casos particulares de variáveis discretas. As variáveis inteiras são chamadas assim por pertencerem ao conjunto dos números inteiros, enquanto as variáveis binárias são aquelas que podem assumir dois valores preestabelecidos (geralmente 1 ou 0), que representam dois estados distintos, como por exemplo aberto ou fechado, sim ou não, ligado ou desligado, verdadeiro ou falso.

Restrições

Normalmente representam os limites de operação, ou seja, são limitantes aos valores das variáveis de decisão. São expressas como equações (restrições de igualdade) e/ou inequações matemáticas (restrições de desigualdade) que impõem um limite físico à solução do problema.

2.1.4 Modelos Determinísticos

Para a solução do problema proposto neste estudo serão utilizados problemas determinísticos de PL.

Os Modelos Determinísticos são aqueles cujas soluções possuem valores definidos, livres de perturbações aleatórias. Segundo Belfiore & Fávero (2013), consistem naqueles em que todas as variáveis são conhecidas, para os quais existe uma única solução exata, que por vezes trata-se da solução ótima. Normalmente são resolvidos por métodos analíticos (sistemas de equações).

Programação Linear

A PL é considerada uma das técnicas mais difundidas da PO. Consiste em um método de solução de problemas, que utiliza modelos matemáticos lineares. Em tais modelos a função objetivo e as restrições dos sistemas, que podem ser equações ou inequações, devem ser lineares; bem como todas as variáveis devem ser contínuas. São problemas do tipo convexos, pois as restrições lineares formam um poliedro convexo. Uma vez que, a função objetivo e as restrições são lineares, um ótimo local é também um ótimo global. (Vásquez-Alvarez, 2000).

Passos importantes na solução de um problema consistem na construção de um modelo representativo, na escolha ou desenvolvimento de um algoritmo e na correta interpretação da solução encontrada.

Vásquez-Alvarez (2000) representou um modelo de PL da forma matricial apresentado nas equações 1 a 7:

Minimizar:

$$F = a^T \cdot x \quad (1)$$

Sujeito a:

$$Cx = r \quad (2)$$

$$x \geq 0 \quad (3)$$

Onde:

$$x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \quad (4)$$

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T \quad (5)$$

$$r = (r_1, r_2, \dots, r_m)^T \quad (6)$$

$$C = \text{matriz de dimensões } m \times n \quad (7)$$

Outra forma de representação é a de notação somatória (equações de 8 a 10):

Minimizar:

$$F = \sum_{j=1}^n a_j \cdot x_j \quad (8)$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n c_{i,j} \cdot x_j = r_i \quad \forall i = 1, \dots, m \quad (9)$$

$$x \geq 0 \quad \forall j = 1, \dots, n \quad (10)$$

Programação Não Linear (PNL)

A Programação Não Linear consiste em técnicas de otimização matemática que tratam dos problemas não lineares. Em um modelo PNL, as variáveis devem ser contínuas e ao menos uma das equações de restrição ou função objetivo devem ser não lineares. (Vásquez-Alvarez, 2000).

Um modelo de PNL pode ser representado pelas equações 11 a 17, segundo Vasquez-Alvarez (2000):

Minimizar:

$$F = f(x) \quad (11)$$

Sujeito a:

$$h(x) = 0 \quad (12)$$

$$g(x) \leq 0 \quad (13)$$

$$x \geq 0 \quad (14)$$

Onde:

$$x = (x_1, \dots, x_n)^T \quad (15)$$

$$h = \text{vetor de } m \text{ restrições de igualdade} \quad (16)$$

$$g = \text{vetor de } p \text{ restrições de não igualdade} \quad (17)$$

Programação Linear Inteira Mista (PLIM)

Segundo Vásquez-Alvarez (2000), a PLIM é descrita como um caso particular de PL, que possui variáveis inteiras e variáveis contínuas. Os problemas PLIM são modelados com a introdução de variáveis inteiras que representam quantidades específicas que só poderiam ser inteiras, ou variáveis binárias.

Segundo Vásquez-Alvarez (2000), um modelo de PLIM pode ser representado conforme equações 18 - 31:

Minimizar:

$$F = a^T \cdot x + b^T \cdot y \quad (18)$$

Sujeito a:

$$Cx + Dy = r \quad (19)$$

$$Ex + Gy \leq s \quad (20)$$

$$x \geq 0 \quad (21)$$

$$y \in \{0,1\}^q \quad (22)$$

Onde:

$$x = (x_1, \dots, x_n)^T \quad (23)$$

$$a = (a_1, a_2, \dots, a_n)^T \quad (24)$$

$$b = (b_1, b_2, \dots, b_q)^T \quad (25)$$

$$C = \text{matriz de dimensões } m \times n \quad (26)$$

$$D = \text{matriz de dimensões } m \times q \quad (27)$$

$$E = \text{matriz de dimensões } p \times n \quad (28)$$

$$G = \text{matriz de dimensões } p \times q \quad (29)$$

$$r = \text{vetor de dimensão } m \quad (30)$$

$$s = \text{vetor de dimensão } p \quad (31)$$

Existem diferentes algoritmos desenvolvidos para a solução de modelos PLIM. Floudas (1995) classificou-os em: métodos de planos cortantes, métodos de decomposição de Benders, métodos baseados em lógica e métodos de ramificação e limite (*Branch and Bound-BB*).

Programação Não Linear Inteira Mista (PNLIM)

Segundo Melo (2016), problemas de programação não linear inteira mista, que num passado recente já foram considerados não solucionáveis, são caracterizados pela presença simultânea de variáveis em domínios contínuos e discretos, e de expressões não lineares incorporadas na função objetivo e/ ou restrições.

Também, Floudas (1995) representou um modelo de PNLIM da seguinte forma (Equações 32 - 38):

Minimizar:

$$F = f(x, y) \quad (32)$$

Sujeito a:

$$h(x, y) = 0 \quad (33)$$

$$g(x, y) \leq 0 \quad (34)$$

$$y \in \{0,1\}^q \quad (35)$$

Onde:

$$x = (x_1, \dots, x_n)^T \quad (36)$$

$$h = \text{vetor de } m \text{ restrições de igualdade} \quad (37)$$

$$g = \text{vetor de } p \text{ restrições de desigualdade} \quad (38)$$

Melo (2016) apresentou uma classificação para enquadrar os algoritmos de resolução de problemas PNLIM. No estudo, seis classes foram mencionadas: Algoritmos de aproximação linear, Algoritmos de *Branch-and-Bound* não linear, Algoritmos de subproblemas contínuos, Reformulação como problema de programação disjuntiva, Abordagens híbridas e Heurísticas.

2.1.5 Aplicações da Pesquisa Operacional em áreas diversas

As técnicas de PO são empregadas nas mais diversas áreas de empresas e indústrias de diferentes setores. São encontradas aplicações nos segmentos de agronegócio, alimentício, aviação, bancário, construção civil, controle de tráfego, esportes, fármacos, florestal, informática, mídia e entretenimento, mineração, papel e celulose, petrolífero, portuário, químico, recursos humanos, serviços de saúde, siderúrgico, telecomunicações, varejista, vestuário, entre outros ainda.

Uma aplicação muito utilizada em diferentes setores são os modelos para escolha da melhor mistura de componentes de um produto específico. Esses produtos podem ser desde tintas, aço, gasolina, papel e produtos utilizados na construção civil como cimento ou argamassa até produtos alimentícios. Esses modelos visam maximizar o lucro, atendendo os requisitos mínimos exigidos em cada setor (Bohl, 1994; DeWitt *et al.*, 1989; Roush *et al.*, 1994).

Também são amplamente difundidos modelos para planejamento e otimização da produção de uma determinada empresa, indústria ou agronegócio, ou seja, dadas as capacidades de produção das máquinas e/ou equipes, definir as quantidades

ótimas de cada produto a ser oferecido, visando sempre o maior lucro possível. Tais modelos costumam considerar, além das demandas do mercado, o valor de custo e venda, o tempo de produção de cada produto, a capacidade diária de fabricação de cada item, a disponibilidade de matéria prima, entre outros fatores que podem ser específicos de uma determinada área (Araujo *et al.*, 2004; Arntzen *et al.*, 1995; Camm *et al.*, 1997; Colin, 2009; Demeester & Tang, 1996; Higgins, 1999; Higgins & Muchow, 2003; Pooley, 1994; Portugal, 1997).

Modelos para otimização de frota, transporte e distribuição também são empregados das maiores às menores empresas, já que promovem economia e melhor aproveitamento (Colin *et al.*, 1999; Mehrez *et al.*, 1995; Rejowski & Pinto, 2003; Subramanian *et al.*, 1994; Yoshizaki *et al.*, 1996). Outra aplicação importante e muito estudada é a otimização de carteira de investimentos, limitando riscos e maximizando a capacidade de lucro dos investidores, que vão de indivíduos comuns a grandes conglomerados empresariais (Luenberger, 1998).

A logística de recursos escassos de uma indústria ou mesmo de um país, também aplica extensivamente as técnicas matemáticas nas soluções oferecidas (Holz & Wroth, 1980; Schneiederjans & Markl, 1986; Vasquez & Hao, 2001; Begur *et al.*, 1997) Empresas e governos de muitos países como o próprio Brasil, possuem equipes dedicadas a PO, desenvolvendo modelos com esse intuito.

No marketing a PO é aplicada na alocação e dimensionamento das propagandas nos diferentes veículos de comunicação disponíveis. Os modelos devem considerar entre outros fatores, as diferentes mensagens a serem transmitidas, o tipo de público alvo, a capacidade de exposição de cada veículo, o custo de cada veículo, a relevância de cada mensagem, a atuação da concorrência.

No setor de vendas, as técnicas de PO podem ser empregadas na otimização de preços, volume de vendas, direcionamento de mercado, alocação dos veículos de distribuição, estratégias de *marketing* e vendas, entre outros (Cheng & Liao, 1992; Liu *et al.*, 2019; Lodish *et al.*, 1988; Rubin & Benton, 2003).

Mesmo nos esportes encontra-se aplicações como por exemplo na avaliação de performance e escolha dos jogadores de um time de baseball (Zappe *et al.*, 1993).

Guajardo & Rönnqvist (2015) estudaram o uso da Teoria dos Jogos Cooperativos na resolução de problemas de divisão. Os modelos foram testados em duas aplicações, sendo a primeira no transporte florestal colaborativo e a outra no estoque de peças de reposição para operações na indústria do petróleo.

2.1.6 A Pesquisa Operacional na Indústria do Petróleo

A indústria do Petróleo encontra-se entre as mais ricas do mundo, e maneja cifras altíssimas diariamente. Dessa forma, cada decisão tomada envolve altos custos, e tomar as melhores e mais eficazes decisões em cada área desta indústria é de extrema importância. Os problemas de tomada de decisão no setor de óleo e gás, em geral, são complexos por natureza, envolvendo uma série de riscos e incertezas que requerem a contribuição significativa de especialistas e até mesmo decisores políticos (Shafiee *et al.*, 2019).

Segundo Kuvykin (2018), quanto mais complicado e quanto maior o investimento realizado em um empreendimento, menos o “controle manual” é aceitável. Ou seja, as decisões por “controle manual”, baseadas em senso comum, habilidades passadas e experiências individuais devem ser substituídas por decisões suportadas por modelos matemáticos e métodos de otimização.

Segundo Hamacker & Ferreira Filho (2015), a utilização de métodos quantitativos, em apoio às decisões complexas, ajuda evitar que elas venham a ser pouco criteriosas, fornecendo mais racionalidade além de um acompanhamento mais adequado de sua execução.

Desde meados da década de 50, as técnicas de PO vêm sendo amplamente utilizadas em diversas áreas da indústria de óleo e gás, o setor foi um dos primeiros usuários da PO no universo empresarial, desenvolvendo modelos de otimização da produção de refinarias. Tais modelos, hoje considerados simples, foram evoluindo com o tempo e o avanço das condições tecnológicas (Hamacker & Ferreira Filho, 2015). Atualmente observa-se uma série de aplicações em todos os segmentos da indústria do petróleo. No segmento *downstream* muitas aplicações são encontradas desde problemas para definição da mistura ideal da gasolina até a distribuição dos combustíveis.

Dado o uso amplamente difundido dos modelos de PO no segmento, Kuvykin (2018) questionou a eficiência dos mesmos e apresentou métodos de análises que estimam a eficiência econômica de modelos de planejamento e otimização no setor de refino. O estudo foca na análise de modelos matemáticos e interpretação dos resultados computados, adotando métodos de PL para estimar as consequências de cada solução, rejeitar alternativas inaceitáveis e recomendar as mais econômicas. O

estudo resulta em um procedimento bem definido de construção de modelos que reduz o risco de soluções incorretas e aumenta a eficiência de atividades operacionais.

Shafiee *et al.* (2019) apresentaram uma ampla revisão da literatura e propuseram uma classificação para os estudos publicados entre os anos de 1977 e 2016 sobre a aplicação de métodos de suporte à decisão no setor *upstream* (Exploração e Produção) de óleo e gás. No setor, são apontadas aplicações em todas as etapas desde a exploração, desenvolvimento de campos de petróleo, produção, manutenção de poços e instalações, extensão da vida útil de um campo até o descomissionamento. A revisão reuniu e classificou, entre outras, propostas de métodos qualitativos e quantitativos de suporte à tomada de decisão aplicadas à compreensão de características do reservatório, operações de simulações em campos produtores, desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono e justificativa de decisões em relação à exploração e desenvolvimento de campos jovens e maduros, como por exemplo, escolha das melhores técnicas de perfuração e embarcações, escolha das melhores técnicas de manutenção para os diferentes componentes e sistemas de plataformas, determinação de estratégias de abandono de poços mais favoráveis ao meio ambiente, identificação dos processos mais viáveis de desmobilização de equipamentos.

A publicação de mais de 60% dos estudos analisados na última década, indicaram o aumento da importância e aplicabilidade de métodos de suporte à decisão na indústria do petróleo ao longo do tempo. No entanto, observou-se ainda que algumas das áreas abordadas na classificação apresentam defasagem de estudos e, portanto, pesquisas futuras são amplamente recomendadas, como no caso dos estudos associados a reservas não convencionais (como *shale gas* por exemplo) e estudos de caso na região oeste da África, que apesar de ser responsável por uma produção considerável de óleo e gás no cenário mundial, conta com pouquíssimos estudos de caso até o presente momento. Recomendam-se ainda estudos direcionados às fases de extensão do tempo de vida de um campo e o descomissionamento/abandono, já que, constituem atualmente um desafio no setor, uma vez que no mundo todo observa-se que um número significativo de estruturas de suporte às operações no setor *upstream* aproximam-se ou já excederam o tempo de vida projetado inicialmente, exigindo rápidas decisões quanto à extensão ou descomissionamento dos campos e estruturas (Shafiee *et al.*, 2019).

Dos 110 artigos incluídos na revisão apenas 3 deles utilizaram a PO como método de suporte à tomada de decisão no setor *upstream*. O primeiro deles, proposto por Iyer *et al.* (1998) consiste na apresentação de um modelo de PLIM para otimização do planejamento e programação de investimentos e operações de infraestrutura em um campo de petróleo *offshore*. O modelo utiliza uma função objetivo que maximiza um indicador econômico, como por exemplo valor presente líquido. As variáveis de decisão do modelo consistem na escolha dos reservatórios a serem desenvolvidos, na seleção das posições dos poços candidatos à perfuração, na programação de instalação das plataformas, nas capacidades dos poços e plataformas de produção e nas taxas de produção de poços previstas para cada período. O modelo incorpora a performance não linear do reservatório e considera as restrições de pressão de superfície e restrições dos recursos das plataformas de perfuração.

No segundo estudo, Cullick *et al.* (2007) apresentam uma estrutura de decisão que considera as interações complexas entre aspectos de superfície e subsuperfície em um sistema único de produção. Tal estrutura otimiza e avalia os riscos e incertezas associadas à seleção e dimensionamento das estruturas de instalação com as incertezas do reservatório em subsuperfície, que ganham uma resolução maior e mais efetiva. Os autores apontam que em uma série de projetos, as incertezas de subsuperfície não são devidamente transmitidas às equipes responsáveis pelo projeto de instalações, essa desconexão leva frequentemente ao dimensionamento não otimizado das estruturas, seguido de gastos altíssimos em função da readequação. A análise de múltiplas alternativas de plataformas de produção e número otimizado de poços é avaliada de acordo com os volumes do reservatório e dirigida por um mecanismo de incertezas representado por análises probabilísticas. Esse fluxo de trabalho unificado aplica otimização não linear avançada a fim de entregar as melhores decisões em relação às instalações. Eles apresentam dois estudos de casos, um em águas profundas no Golfo do México e outro em águas intermediárias no Norte da Europa.

O último artigo revisado por Shafiee *et al.* (2019) que utiliza técnicas de PO foi proposto por Maddah *et al.* (2014) consiste em uma abordagem integrada para tomada de decisão em operações de *upstream* na indústria do petróleo com aplicação no Líbano. O estudo aborda a dificuldade nas decisões políticas quanto a exploração e desenvolvimento, uma vez que os termos e condições de produção e os contratos de concessão e partilha, normalmente são finalizados anteriormente, ao início das

operações, quando o conhecimento da reserva é parcial e bastante limitado. O modelo visa otimizar as decisões do governo, com base no volume de reserva estimado inicialmente e o valor de mercado do hidrocarboneto a ser produzido, gerando o máximo de benefício para o estado com uma taxa de retorno aceitável para as organizações petrolíferas internacionais. O modelo foi aplicado no Líbano e resultou nas indicações das melhores estratégias contratuais quanto, a partilha da produção, participação nos lucros e pagamento de *royalties* por exemplo, a depender dos volumes estimados, tempo de produção e valores de mercado. O artigo ainda indica que no cenário estudado, o baixo preço do gás natural não justificaria o investimento na construção de um sistema de dutos para exportação, sendo o gasoduto árabe a melhor opção para o escoamento do gás.

2.1.7 A Pesquisa Operacional na Indústria do Petróleo no Brasil

Carvalho (2005), desenvolveu modelos e técnicas de otimização aplicados ao setor *Upstream* da indústria de óleo e gás. Foi sugerida uma sistemática para o planejamento de infra-estrutura de exploração em alto-mar, com o intuito de redução nos custos de instalação de plataformas, perfuração e conexão de plataformas aos poços; visando assim a maximização do valor presente líquido (VPL), foram propostos modelos com e sem restrições de investimento por período de tempo.

Em 2015, Hamacher & Ferreira Filho reuniram em um livro uma série de aplicações de PO na Indústria Internacional de Petróleo e Gás. Os estudos apresentados ilustram a imensa aplicação nos diferentes setores como exploração, construção de poços, operações de produção, transferência, abastecimento, refino e distribuição. Dentre as técnicas observadas podemos citar a PL, Teoria dos Jogos, Programação Inteira, PNL, Programação Estocástica, Metaheurísticas e Simulação. Dentre os trabalhos reunidos por Hamacher & Ferreira Filho (2015), destacam-se alguns exemplos em diferentes áreas da indústria. No setor de Exploração, Oliveira *et al.* (2015) *apud* Hamacher & Ferreira Filho (2015) desenvolveram um modelo de gerenciamento de Portfólio de Projetos de Exploração, a partir do qual se obtém para cada prospecto o Valor Monetário Esperado (VME) em função de parâmetros críticos, permitindo assim o planejamento adequado do melhor fluxo de atividades exploratórias nos blocos avaliados.

Ainda na área de exploração, Montechiari *et al.* (2015) *apud* Hamacher & Ferreira Filho (2015) propuseram uma metodologia de previsão de reservas que considera as chances de haver novas reservas e o conhecimento obtido ao longo do tempo.

Grande parte das aplicações encontradas na indústria do petróleo, concentram-se no setor de Produção. Emerick & Oliveira (2015) *apud* Hamacher & Ferreira Filho (2015) levantaram as principais aplicações de técnicas de otimização na área de Engenharia de Reservatórios. Teixeira (2015) *apud* Hamacher & Ferreira Filho (2015) apresentou um sistema de suporte a decisão, baseado em otimização matemática, e obteve resultados promissores em dois casos reais na Petrobras. O sistema visa otimizações de curto prazo podendo ser aplicado em qualquer plataforma com poços de óleo ligados a rede da companhia.

Ainda no setor de produção encontram-se aplicações na construção de poços marítimos, na programação de operações em poços de petróleo com restrição de recursos e gerenciamento de risco, no planejamento e programação de sondas, no planejamento de rede logística de transporte aéreo de passageiros *offshore*, no gerenciamento de resíduos de operações de Exploração e Produção de hidrocarbonetos e na programação de navios (Hamacher & Ferreira Filho, 2015).

A PO também é amplamente aplicada no setor *downstream*. Hamacher & Ferreira Filho (2015), destacam as aplicações no planejamento operacional e da produção de refinarias, no gerenciamento da cadeia de distribuição de derivados de petróleo, em projetos de redes de dutos até o planejamento da logística e comercialização dos produtos finais.

2.2 PROGRAMAÇÃO DA AQUISIÇÃO DE TESTEMUNHOS

Testemunhos são amostras de rocha cilíndricas como observa-se na Figura 1, retiradas durante a perfuração de poços, na exploração e desenvolvimento de um campo de petróleo.

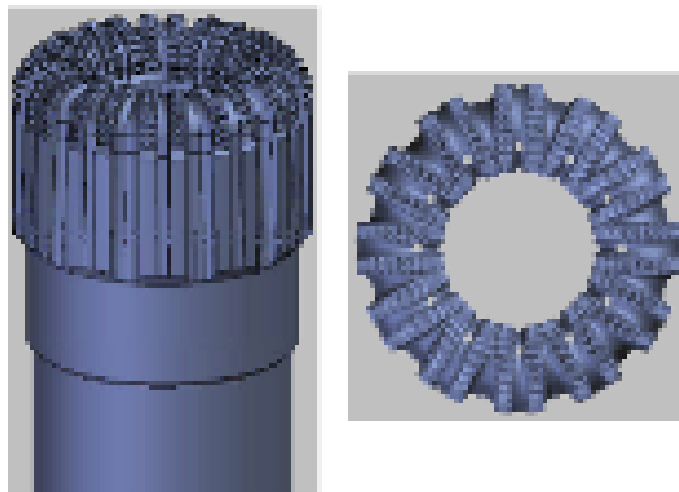
Figura 1. Testemunho de rocha retirado em poço de petróleo



Fonte: acervo Petrobras.

Usualmente, os testemunhos podem ser adquiridos em dois tamanhos principais, cerca de 30 ou 60 m, e os custos de aquisição médios; por barrilete retirado; são da ordem de 3,5 ou 5 milhões de dólares, respectivamente. Esses valores de aquisição podem variar de acordo com a sonda de perfuração e as companhias envolvidas no serviço solicitado. Os cilindros de rocha são cortados por uma broca com uma coroa de diâmetro em torno de 10 a 13 cm composta por cortadores de diamante, como as da Figura 2.

Figura 2. Coroa de diamante para corte de testemunho de rocha

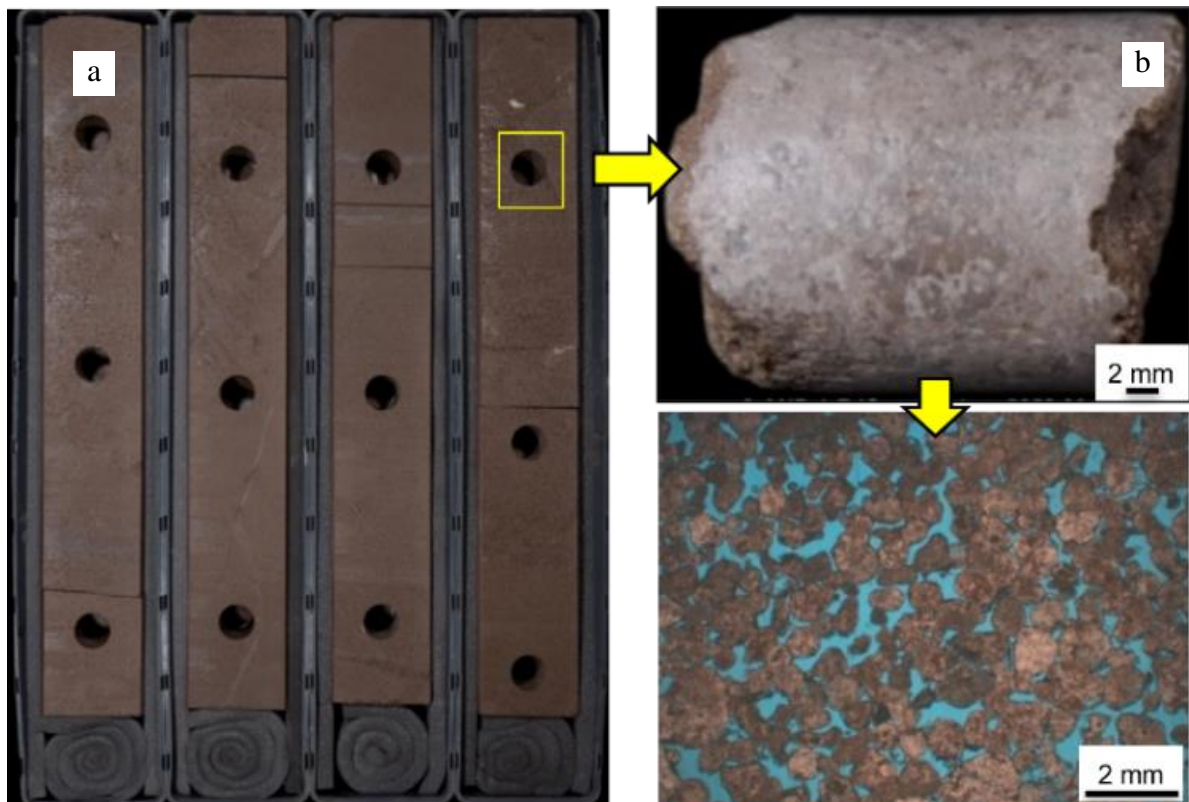


Fonte: acervo Petrobras.

Nos estudos para a exploração e desenvolvimento de uma jazida, são obtidas diversas informações de diferentes fontes. Inicialmente, são adquiridos dados sísmicos capazes de avaliar um grande volume de rocha (dados indiretos), com resolução vertical da ordem de dezenas de metros; posteriormente, com a perfuração

dos poços, são adquiridos perfis petrofísicos nos quais, a resolução vertical varia de metros a centímetros (também dados indiretos). Os testemunhos consistem em informação pontual, mas direta da rocha, e com maior resolução vertical possível na compreensão de um reservatório, as lâminas de rocha e ensaios de laboratório realizados em plugues retirados do testemunho permitem a avaliação em escala microscópica, conforme Figura 3.

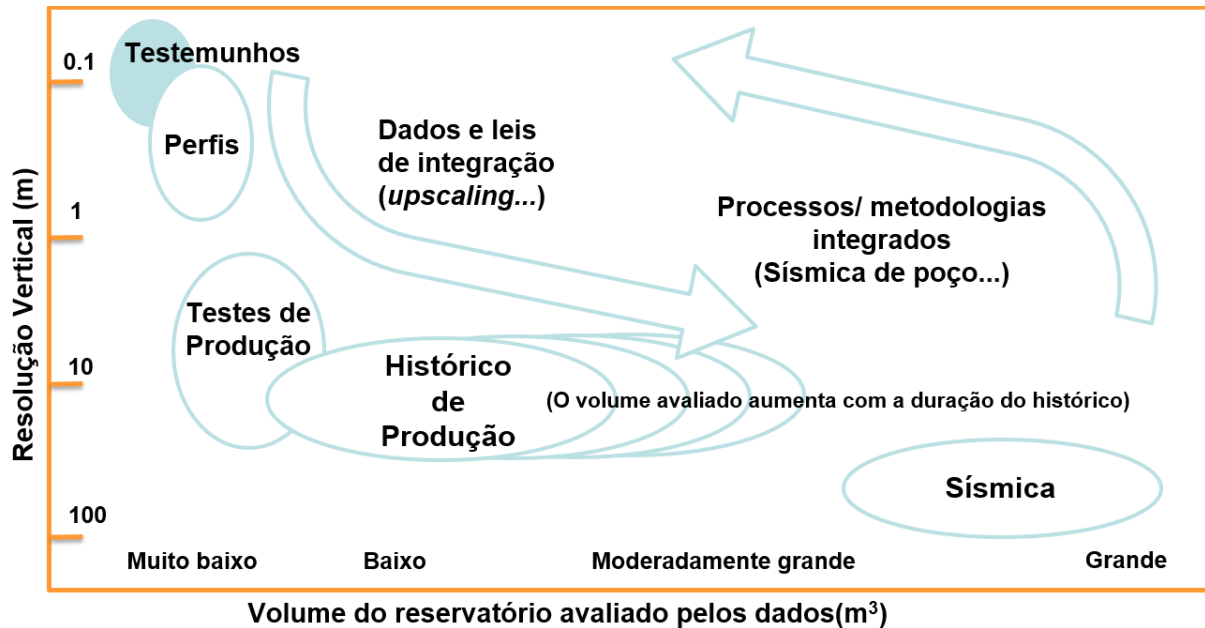
Figura 3. a) Observa-se o testemunho com os pontos de amostragem, nos quais foram retirados os plugues (b) para a confecção de lâminas de rocha (c) e realização de ensaios de laboratório



Fonte: acervo Petrobras.

As informações pontuais obtidas através dos testemunhos não substituem as informações de perfil, e sim complementam e calibram tais medidas indiretas. Segundo Forbes (1998), as informações mais detalhadas da rocha, que auxiliarão no modelo do reservatório são obtidas através das análises de testemunho (Figura 4), ele destaca que estudos internos das companhias de petróleo apontam que os benefícios provenientes das análises de rocha, são imensamente superiores ao custo de aquisição das mesmas.

Figura 4. Resolução vertical das diferentes análises em um campo de petróleo e o volume de reservatório avaliado em cada uma das análises



Adaptado de Forbes, 1998.

Ou seja, apesar do custo elevado e pequeno volume investigado, a informação de alta resolução, obtida através dos testemunhos é de extrema importância no desenvolvimento de um campo, realizada a transferência de escala adequada, os demais processos e métodos podem ser calibrados e populados com tal informação.

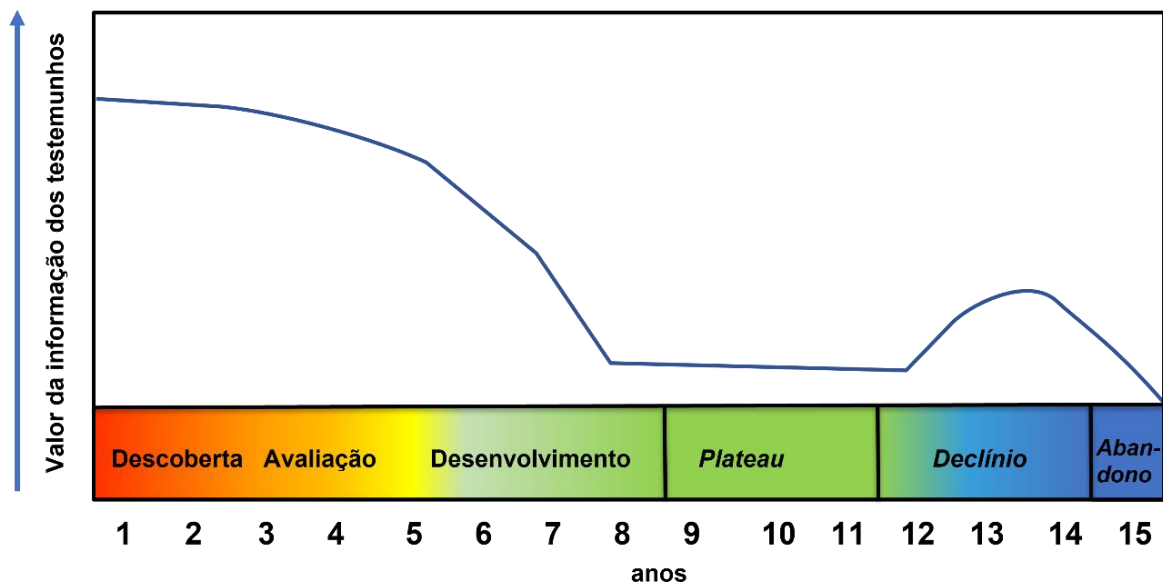
A rocha prevista nos poços a serem perfurados e a necessidade de representatividade dos diferentes tipos existentes naquele campo deverão nortear a escolha dos poços a serem testemunhados e a metragem de cada testemunho a ser adquirido.

Forbes (1998) realizou uma revisão bibliográfica dos estudos relacionados à análise de testemunhos, ele destacou a importância das amostras de rocha, e relatou por exemplo, que a Mobil considera que de 10 a 15% da sua produção de óleo no mundo, não existiria sem a análise de testemunhos, enquanto a Shell aponta que o valor da informação dos resultados de laboratório das análises de testemunhos, é cerca de 8 vezes maior que os custos investidos nos mesmos.

O valor e a importância de um testemunho variam durante as diferentes fases de um campo de petróleo. No início do ciclo de vida do campo (exploração), a informação fornecida pelo testemunho é vital para uma melhor compreensão do reservatório. Ao longo do tempo, o conhecimento aumenta e a necessidade de novos

testemunhos diminui, até a situação de declínio da produção, quando a informação de rocha pode voltar a ser muito valiosa, na tentativa de aumentar o fator de recuperação do petróleo no campo. Owens (1996) propôs um gráfico que relaciona o valor das análises de testemunho no ciclo de vida de um campo (Figura 5). Em virtude da importância dos testemunhos e o alto custo envolvido com a aquisição deles, é imprescindível que haja um planejamento adequado e criterioso para sua obtenção, de modo a se obter o máximo de informação com o menor custo possível.

Figura 5. Observa-se na curva azul, a variação do valor da informação obtida a partir das análises dos testemunhos ao longo do ciclo de vida de um campo de petróleo, desde as primeiras etapas exploratórias até as etapas de declínio e abandono do campo



Fonte: Modificado de Owens, 1996.

Não foram encontrados na literatura estudos que visem otimizar o planejamento da aquisição de testemunhos. Na maior parte das companhias de petróleo, o planejamento é feito pelos geólogos e engenheiros de reservatório que utilizam a experiência adquirida ao longo dos anos vinculada à disponibilidade de recursos financeiros.

Dada a necessidade de informações diretas da rocha desde as primeiras fases da produção de um campo para escolha dos melhores poços a serem testemunhados, em geral, são considerados o posicionamento dos mesmos na estrutura do reservatório, além do momento em que serão perfurados; bem como a quantia destinada a esse fim.

Em campos pequenos nos quais a rocha seja homogênea e poucos poços venham a ser perfurados, a análise de quais poços devem ser testemunhados não oferece muitas complicações aos especialistas envolvidos no planejamento da aquisição. No entanto, quando tratamos de campos grandes ou gigantes, com, às vezes, centenas de poços a serem perfurados, e/ou reservatórios mais complexos, com rochas heterogêneas compostas de diferentes zonas ou fácies de rocha, o planejamento manual da aquisição de testemunhos se torna muito mais difícil. Sem a ajuda de um modelo que possa avaliar centenas de possibilidades em segundos, os erros podem ser mais recorrentes, podendo comprometer tanto os custos quanto a aquisição dos dados necessários à construção dos modelos do reservatório.

Assim, é objetivo desse trabalho apresentar uma metodologia de otimização de retirada de testemunhos, que indique no início da implantação de um campo de petróleo, os poços mais adequados à testemunhagem. Dada uma necessidade mínima de amostragem em cada zona/ fácies do reservatório, de acordo com as zonas previstas em cada um dos poços planejados, a posição dos poços e o momento da perfuração dos mesmos no ciclo de vida do campo, deverão ser retirados os testemunhos mais valiosos, com o menor custo associado.

3. OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA

O objetivo da presente dissertação é desenvolver um modelo de programação matemática que minimiza os custos de aquisição de testemunhos em um reservatório de petróleo localizado na Bacia de Santos, no Brasil. O intuito do modelo desenvolvido consiste em otimizar a coleta de testemunhos, minimizando os custos, e ainda assim permitir a construção de um modelo consistente de desenvolvimento do campo.

Conforme observou-se não foram encontrados na literatura estudos que visem otimizar o planejamento da aquisição de testemunhos ou perfis petrofísicos. Dessa forma os planejamentos para aquisição de dados são condicionados à experiência e percepção da equipe envolvida com o planejamento. A experiência adquirida ao longo dos anos é muito desejável, mas deve atuar como aliada às tomadas de decisão, e não como critério único. Modelos matemáticos podem incluir, além da experiência passada, diversas variáveis e restrições relacionadas a todo o processo de obtenção e utilização dos dados.

Os planejamentos otimizados podem evitar que decisões sejam tomadas às pressas, sem os critérios mais adequados. Os modelos matemáticos executam tarefas que seriam impossíveis de serem realizadas por seres humanos, pois podem analisar um sem número de possibilidades, e apontar a mais adequada. A união entre a experiência humana adquirida em uma empresa e modelos de otimização, quase sempre deverá levar às melhores decisões.

Outro objetivo do presente estudo é o desenvolvimento de uma metodologia de otimização no planejamento da aquisição de testemunhos que indique, no início da implantação de um campo de petróleo, quais poços deverão ser testemunhados. Tal modelo deverá ser econômico e ao mesmo tempo trazer as informações necessárias ao desenvolvimento do campo.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para resolver o problema de planejamento de aquisição de testemunhos foi utilizada a PLIM.

O problema foi pensado, considerando um modelo geológico simplificado de um campo de petróleo fictício desenvolvido nesse estudo. O reservatório foi dividido em 4 diferentes zonas (A, B, C e D) e 12 poços a serem perfurados. Esse modelo geológico simplificado, nomeado TAMBORIL, foi desenvolvido com a finalidade de observar o comportamento do modelo de otimização da testemunhagem, num universo de poucos poços. Na criação desse campo fictício foi desenvolvida uma seção geológica simulando diferentes situações estratigráficas e estruturais possíveis, de forma que os poços atravessassem situações diferentes que ilustrassem as mais diversas possibilidades.

Posteriormente, o modelo foi testado num caso de estudo com dados de um campo real explorado pela Petrobras. Por se tratar de informação classificada como confidencial, os dados foram descaracterizados e a origem não será revelada. As características dos dados necessárias ao teste dos modelos foram mantidas.

Para fins da pesquisa, nomes fictícios serão utilizados tanto para o campo quanto para os poços. Desta forma, considera-se o campo REGIUS com 83 poços perfurados, que serão chamados simplesmente pelo número correspondente de 1 a 83. O reservatório em questão foi classificado em 5 diferentes zonas reservatório que serão chamadas de zonas A, B, C, D e E.

Assim, o objetivo final é encontrar a solução ótima de um problema de minimização de custos na testemunhagem do reservatório. Uma vez formulado o problema, ou seja, definidas a função objetivo e as restrições, do modelo, este foi resolvido usando o sistema de modelagem GAMS™ (*General Algebraic Modelling System*) v25.1.2 num computador Intel Core i3, 2.3 GHz.

5. APRESENTAÇÃO DO MODELO

O presente estudo propõe um modelo matemático de otimização, que utiliza a PLIM para otimizar a aquisição de testemunhos de rocha em um campo de petróleo, propondo um planejamento para a aquisição desde o início do ciclo de vida de um campo, antes da perfuração dos primeiros poços de produção.

Com a perfuração dos poços, obtenção de novas informações e o acúmulo de conhecimento sobre a área o modelo proposto deverá ser constantemente atualizado, até que os últimos testemunhos sejam coletados.

5.1 FORMULAÇÃO DO MODELO

5.1.1 Definição do problema de testemunhagem de rocha

Atualmente a aquisição de testemunhos de rocha na indústria do petróleo é normalmente planejada por geólogos da área de reservatórios. Com base nas informações do campo desejadas por eles em diferentes momentos durante a exploração de um campo, especialistas utilizam a experiência adquirida ao longo dos anos para escolher quais os melhores poços a serem testemunhados, para a construção do modelo do reservatório.

Dada a necessidade de informação de rocha desde as primeiras fases da produção de um campo para escolha dos melhores poços a serem testemunhados, em geral, são considerados o posicionamento dos mesmos na estrutura do reservatório, além do momento em que serão perfurados; bem como a quantia destinada a esse fim.

Em campos pequenos nos quais a rocha seja homogênea e poucos poços venham a ser perfurados, a análise de quais poços devem ser testemunhados não oferece muitas complicações aos especialistas envolvidos no planejamento da aquisição. No entanto, quando tratamos de campos grandes ou gigantes, com, às vezes, centenas de poços a serem perfurados, e/ou reservatórios mais complexos, com rochas heterogêneas compostas de diferentes zonas ou fácies de rocha, o planejamento manual da aquisição de testemunhos se torna muito mais difícil.

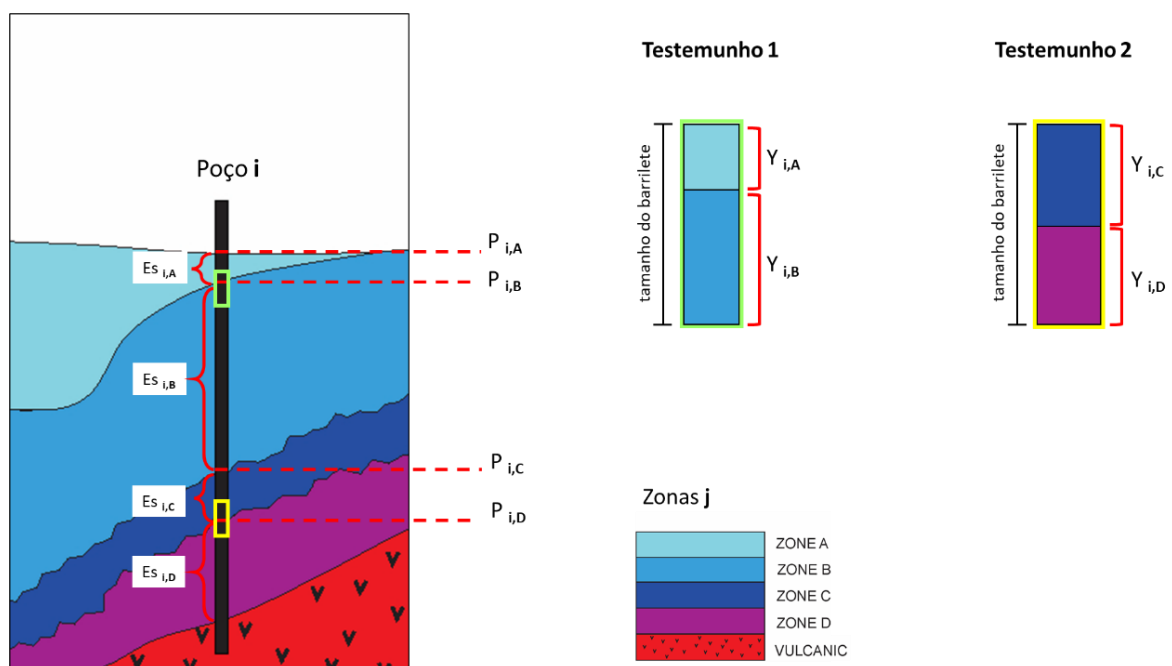
Num cenário mais complexo, a análise humana das inúmeras possibilidades de aquisição de testemunhos nos poços a serem perfurados se torna exaustiva, podendo levar a equívocos, sendo assim, se torna muito bem-vinda, a ajuda de um modelo matemático capaz de analisar todas as possibilidades em questão de minutos, como apoio na tomada de decisão.

Neste cenário então, é proposto um modelo que leve em consideração as camadas previstas a serem perfuradas em cada um dos poços, o posicionamento dos mesmos e o momento em que deverão ser perfurados.

5.1.2. Elementos do modelo

Para o trabalho proposto, consideramos campos de petróleo no início da etapa de desenvolvimento, desde a perfuração dos primeiros poços de produção. Os poços planejados contêm as previsões das diferentes zonas estratigráficas a serem perfuradas, conforme Figura 6 e, a partir desse modelo inicial do campo, é proposta a otimização na escolha dos poços para retirada de testemunhos, partindo de uma necessidade mínima de amostragem das diferentes zonas, utilizando barriletes de 60 m.

Figura 6. Esquema de um poço tipo i com as distintas zonas j a serem perfuradas. Onde $P_{i,j}$ é a profundidade prevista para o topo das zonas estratigráficas, $ES_{i,j}$ é a espessura prevista para cada zona no poço e $Y_{i,j}$ é a quantidade de metros a ser testemunhada no poço i , em cada uma das zonas j



Fonte: Do autor 2022.

5.1.3 Premissas do modelo

- Cada trecho testemunhado deverá ter 60 m contínuos, correspondente ao maior comprimento de barrilete retirado no cenário atual de testemunhagem de rochas coesas.
- Não é obrigatório testemunhar uma zona completa em um poço, podendo escolher a quantidade de metros mais adequada em função das demais exigências do modelo.
- É possível coletar um testemunho de 60 m, em seguida perfurar um intervalo de rocha com broca comum de perfuração e voltar a testemunhar numa camada inferior ou até mesmo na mesma camada mais abaixo. O custo de perfuração com broca comum não é contabilizado no custo total da testemunhagem.
- Dada a necessidade de melhor compreensão do reservatório no início da perfuração, é obrigatório que o modelo escolha ao menos um dos três primeiros poços a serem perfurados.
- Poços que tenham indicativos de cortar zonas de falhamento intenso devem ser excluídos da escolha para testemunhagem.
- O custo de mobilização consiste no custo associado aos equipamentos e equipe especializada em testemunhagem, além do custo de paralização da sonda para a realização do procedimento em questão.
- O custo do corte do testemunho varia com a quantidade de metros a ser testemunhada.
- O custo de retirada consiste no custo associado ao tempo de sonda empregado na retirada do barrilete que deve ser extremamente lenta a fim de uma boa recuperação, sem a queda de partes ou de todo o testemunho, dependendo portanto, da profundidade.
- O custo total de testemunhagem inclui os custos de mobilização, corte e retirada do testemunho.
- Deverá ser retirada uma espessura mínima em cada uma das zonas de reservatório a depender das necessidades de amostragem do campo.
- Dado o custo muito elevado e todos os recursos de segurança empregados em se paralisar uma sonda para a realização de testemunhagem, é desejável que os

testemunhos necessários sejam adquiridos no menor número de poços possível, evitando o custo de mobilização/ paralisação em muitos poços.

5.1.4 Modelo matemático de planejamento

O problema descrito é formulado como um modelo de otimização para resolver o problema de planejamento da aquisição de testemunhos em um campo de petróleo. Ele contém duas variáveis de decisão binárias. X_i que representa a seleção ou não, do poço i , na testemunhagem e $Zz_{i,j}$ que indica se no poço i , a zona j é selecionada para ser testemunhada.

Dessa forma, a função objetivo do modelo proposto consiste em minimizar o custo total de testemunhagem, que é composto pelos custos de corte, retirada e mobilização, e o modelo é definido como segue:

$$\text{Min } L = \sum_i (Cc * Nt_i * 60) + \sum_{i,j} (Zz_{i,j} * K * P_{i,j}) + \sum_i (X_i * Cmb) \quad (39)$$

Sujeito a:

$$\sum_j y_{i,j} = Nt_i * 60 \quad \forall i \quad (40)$$

$$y_{i,j} + y_{i,j+1} \leq n * 60 \quad \forall i, j \quad (41)$$

$$\sum_i y_{i,j} \geq \text{espessura mínima de cada zona em todo o reservatório} \quad \forall j \quad (42)$$

$$y_{i,j} \leq ES_{i,j} \quad \forall i, j \quad (43)$$

$$Zz_{i,j} * M \geq y_{i,j} \quad \forall i, j \quad (44)$$

$$Zz_{i,j} \leq y_{i,j} \quad \forall i, j \quad (45)$$

$$x_i * M \geq \sum_j y_{i,j} \quad \forall i \quad (46)$$

$$x_i \leq \sum_j y_{i,j} \quad \forall i \quad (47)$$

A equação (39) representa a função objetivo do modelo que minimiza o custo total de testemunhagem. Onde a primeira parcela é o custo de corte, a segunda parcela é o custo da retirada e a última parcela é o custo de mobilização.

O custo relacionado ao corte dos testemunhos Cc em um poço i deve ser multiplicado pelo número de barriletes retirados no poço N_i e pelo comprimento do barrilete que é de 60 m.

O custo relacionado à retirada dos testemunhos, consiste na multiplicação do custo métrico de retirada K pela profundidade $P_{i,j}$ da zona testemunhada.

E o custo de mobilização Cmb é a parcela fixa de instalação dos equipamentos e preparação da sonda.

É importante salientar que os valores de custo atribuídos aos escalares Cc e K , foram escolhidos com base nos custos reais médios atuais de testemunhagem no pré sal brasileiro: para o custo métrico de corte dos testemunhos Cc , considerou-se 250 dólares e para o custo métrico de puxada do testemunho K , considerou-se 360 dólares (Petrobras, 2021).

A equação (40) determina que a soma de todos os metros testemunhados no poço i está relacionada ao comprimento do barrilete de 60 m.

A restrição (41) indica que a soma de duas zonas contínuas testemunhadas no poço i deverá ser múltipla de 60 (comprimento do barrilete).

A restrição (42) representa a exigência de ser testemunhada uma espessura mínima na zona j em todo o reservatório.

A restrição (43) consiste em que o maior comprimento que poderá ser testemunhado em um poço i de uma zona j qualquer é a espessura dessa zona no poço.

As restrições (44) e (45) em conjunto determinam no poço i , a zona j testemunhada. A variável $Z_{i,j}$ é uma variável binária, caso ela seja 0 não existirá zona j testemunhada no poço i e se $Z_{i,j}$ for 1, haverá testemunhagem. Note que a equação (44) usa um valor muito alto M o qual é vinculado ao custo de mobilização.

As restrições (46) e (47) garantem que se o poço i for escolhido para ser testemunhado, obrigatoriamente, uma ou mais zonas j desse poço deverão ser selecionadas para serem testemunhadas. Note novamente o artifício M usado para a escolha do menor número de poços possíveis, uma vez que, o custo e a logística para

parada e preparação de toda a sonda para a aquisição de testemunhos é muito elevado.

O modelo apresentado corresponde a um modelo MILP cuja dimensão depende dos poços e as zonas do reservatório.

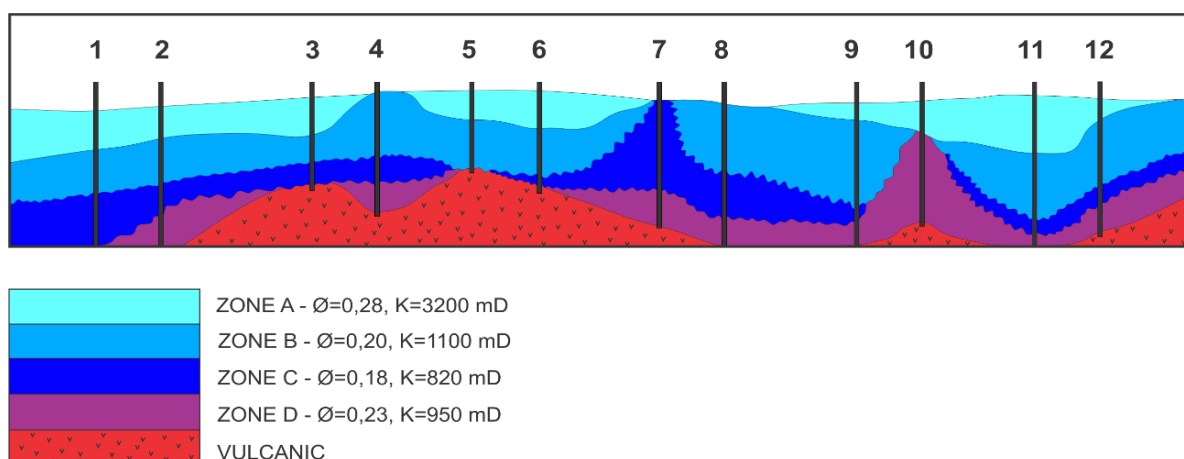
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No *upstream* da indústria do petróleo há várias fases ou sub-processos e ferramentas que ajudem na tomada de decisão desde o início dos trabalhos devem ser propostas para otimização de custos e maior garantia de sucesso. Conforme comentado anteriormente, não foram encontrados na literatura estudos que visem otimizar o planejamento da aquisição de testemunhos. Nesse sentido, um campo de petróleo com dados fictícios foi proposto para avaliar a viabilidade da formulação do modelo apresentado. Após obter resultados funcionais com o problema imaginário, o modelo foi testado em um estudo de caso com dados reais de um campo do pré-sal brasileiro. Em ambos os casos, o custo de mobilização (**Cmb**) foi de US\$ 3.000.000,00 custo que representa o custo médio dos gastos da sonda de perfuração, equipamentos de testemunhagem e equipe de trabalho.

6.1 EXEMPLO DE INSPIRAÇÃO: CAMPO FICTÍCIO DE TAMBORIL

O modelo geológico simplificado, nomeado TAMBORIL, foi desenvolvido com a finalidade de observar o comportamento do modelo de otimização da testemunhagem, num universo de poucos poços. Na criação desse campo fictício foi desenvolvida uma seção geológica simulando diferentes situações estratigráficas e estruturais possíveis, de forma que os poços atravessassem situações diferentes que ilustrassem as mais diversas possibilidades. O reservatório foi dividido em quatro diferentes zonas (A, B, C e D) com 12 poços a serem perfurados, conforme Figura 7.

Figura 7. Perfil geológico do campo de petróleo TAMBORIL



Fonte: Do autor, 2022.

As espessuras das zonas de reservatórios $E_{s,i,j}$ em cada um dos poços planejados são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Espessuras das zonas de reservatório $E_{s,i,j}$ no campo TAMBORIL.

POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D
1	80	90	110	0
2	70	70	60	90
3	110	50	60	0
4	0	90	70	60
5	70	80	0	0
6	90	90	50	0
7	0	0	110	70
8	0	100	80	90
9	50	110	70	70
10	60	0	0	110
11	130	90	60	80
12	60	70	50	60

As profundidades das zonas $P_{i,j}$ de reservatório nos poços planejados, no campo fictício de TAMBORIL são apresentadas na tabela 2.

Tabela 2. Profundidades das zonas de reservatório $P_{i,j}$ no campo TAMBORIL

POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D
1	1000	1080	1170	
2	1100	1170	1240	1300
3	1400	1510	1560	
4		1600	1690	1760
5	1650	1720		
6	1600	1690	1780	
7			1300	1410
8		1200	1300	1380
9	1250	1300	1410	1480
10	1300			1360
11	1420	1500	1640	1700
12	1320	1380	1450	1500

Neste exemplo, para a restrição (42) do modelo, foi definida a testemunhagem mínima de 120 m em cada uma das quatro zonas do reservatório. Quanto aos resultados obtidos com os dados provenientes do campo TAMBORIL, o modelo sugere a testemunhagem dos poços 2 e 11 para a retirada dos 120 m de testemunho

em cada uma das quatro zonas do reservatório, conforme tabela 3. Na mesma tabela é apresentada quantas vezes o barrilete desce para pegar os testemunhos no poço i .

Tabela 3. Resultados do problema fictício – campo TAMBORIL

Nº POÇO (X_i)	ZONA (m)	A ZONA (m)	B ZONA (m)	C ZONA (m)	D ZONA (m)	Nº descidas barrilete (N_{ti})
2	-	30	60	90		3
11	120	90	60	30		5

Note que, uma vez que o modelo escolhe o poço a ser testemunhado, a captura contínua de amostras é sugerida. O custo para aquisição dos testemunhos nos dois poços selecionados foi de \$9.709.200,00. Para encontrar a solução ótima, o *software* GAMS utilizou 201 iterações, com um tempo computacional de 0.047 seg.

Dessa forma, para o campo TAMBORIL, os resultados foram satisfatórios, atendendo todas as exigências do modelo. O tempo de execução baixo é um ponto favorável à utilização do modelo em casos reais mais complexos.

6.2 ESTUDO DE CASO REAL: CAMPO REGIUS

A proposta é validar o modelo com um caso de estudo real usando dados de um campo explorado pela Petrobras. Por se tratar de informação classificada como confidencial, os dados foram descaracterizados e a origem não será revelada. Mas nomes fictícios serão utilizados tanto para o campo quanto para os poços. Desta forma, considera-se o campo REGIUS com 83 poços perfurados, que serão chamados simplesmente pelo número correspondente de 1 a 83. O reservatório em questão foi classificado em 5 diferentes zonas (uma a mais que o caso fictício) que serão chamadas de zonas A, B, C, D e E. Todas as características dos dados foram mantidas. Na tabela 4 são apresentadas as espessuras das zonas de reservatório $Es_{i,j}$ em cada um dos poços planejados.

Tabela 4. Espessuras das zonas $E_{s_{i,j}}$ no campo REGIUS

POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E
1	79.77	116.95	43.63	78.93	178.72
2	107.14	147.26	96.91	0	0
3	74.02	72.25	47.94	89.48	
4	78.49	52.26	140.5	0	102.92
5	112.62	191.37	104.58	88.4	279.51
6	85.97	23.17	0	0	0
7	93.25	182.26	86.69	0	0
8	81.8	126.4	81.81	78.79	0
9	57.3	0	0	0	0
10	85.8	137.33	68.02	0	0
11	83.11	45.86	0	26.37	66.28
12	61.28	70.96	0	0	0
13	100.42	78.32	25.9	0	0
14	190.54	123.59	0	0	0
15	94	74	39.1	0	0
16	131.17	164.77	55.38	91	0
17	89.61	99.69	0	102.05	0
18	108.19	40.36	117.04	0	0
19	113.7	155.03	0	51.57	0
20	111.54	42.85	23.41	220.76	0
21	78.9	75.9	80.23	0	0
22	96.06	52.66	0	0	0
23	83.7	26	0	193.1	0
24	101	0	68.7	121.7	0
25	104.76	34.65	23.34	69.81	0
26	105.94	78.42	46.34	0	0
27	79.28	86.24	0	87.08	79.81
28	88.15	67.03	13.71	0	0
29	88.59	24.53	114.65	0	68.79
30	118.45	0	0	0	0
31	80.29	23.44	27.08	0	0
32	122.4	68.6	88.2	0	0
33	28.66	130.83	0	0	0
34	98.28	120.83	40.59	69.05	0
35	87.4	121.5	64.03	0	0
36	100	119.6	42.2	0	0
37	80.66	58.51	0	0	0
38	76.76	60.64	23.9	0	0
39	70.94	44.68	0	0	0
40	82.3	81.49	56.15	0	0
41	106.1	34.3	0	0	132.3
42	88.36	81.52	0	65.45	0
43	76.47	32.32	0	215.51	0
44	79.64	122.15	30.21	0	0
45	72.98	42.86	0	258.99	0
46	92.53	177.47	74.47	0	0
47	92.14	98.73	0	0	0
48	92.26	133.14		0	0
49	102.95	159.29	73.04		0

continua

conclusão

POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E
50	110.4	176.2	0	0	0
51	116.9	61.6	0	110.84	0
52	67.37	69.63	34	47.45	160.55
53	81.59	41.66	0	0	0
54	89.25	136.33	68.75	131.43	0
55	97.85	147	52.49	0	0
56	133.63	145.37	0	0	0
57	84.22	87.81	80.85	0	0
58	77.21	95.39	258.4	314.35	58.88
59	69.68	77.13	89.24	0	0
60	122.93	83.19	0	0	0
61	88.41	105.37	0	0	0
62	93.93	63.51	35.74	0	0
63	88.27	87.72	116.5	0	0
64	85.85	119.49	0	0	0
65	80.18	118.64	0	0	0
66	74.71	154.35	0	0	0
67	56.43	165.33	60.44	0	0
68	40.93	123.96	79.78	0	0
69	79.59	131.13	279.3	0	0
70	97.23	0	0	0	0
71	45.16	138.06	0	0	0
72	39.73	104.72	58.67	0	0
73	148.76	0	0	0	0
74	37.85	101.41	64.18	0	0
75	55.01	94.58	59.9	0	0
76	40.1	112.22	57.81	0	0
77	62.18	0	0	0	0
78	71.82	132.17	0	0	0
79	38.31	101.33	57.22	0	0
80	146.81	6.78	0	0	0
81	109.86	47.84	0	0	0
82	44.78	132.89	0	0	0
83	88.2	143.53	51.96	0	0

As profundidades das zonas de reservatório $P_{i,j}$ nos poços planejados no campo de REGIUS são apresentadas na tabela 5.

Tabela 5. Profundidades das zonas reservatório $P_{i,j}$ no campo real de REGIUS

POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E
1	4949	5028.77	5145.72	5189.35	5268.28
2	5098.69	5205.83	5353.09	5450	
3	4916.31	4990.33	5062.58	5110.52	5200
4	4896	4974.49	5026.75		5167.25
5	5064.03	5176.65	5368.02	5472.6	5561

continua

continuação

POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E
6	4786.44	4872.41	4895.58		
7	5017.8	5111.05	5293.31	5380	
8	4991.2	5073	5199.4	5281.21	5360
9	4805.27	4862.57			
10	5048.85	5134.65	5271.98	5340	
11	4861.54	4944.65		4990.51	5016.88
12	4877.77	4939.05	5010.01		
13	5118.53	5218.95	5297.27	5323.17	
14	5013.2	5203.74	5327.33		
15	5136.6	5230.6	5304.6		5343.7
16	5856.44	5987.61	6152.38	6207.76	6298.76
17	4995.05	5084.66		5184.35	5286.4
18	4868.27	4976.46	5016.82		5133.86
19	4860	4973.7		5128.73	
20	5222.18	5333.72	5376.57	5399.98	5620.74
21	5104.1	5183	5258.9		5339.13
22	4877.55	4973.61			
23	5246.3	5330		5356	5549.1
24	4902.8		5003.8	5072.5	
25	4845.12	4949.88	4984.53	5007.87	5077.68
26	5209.97	5315.91	5394.33	5440.67	
27	4914.84	4994.12		5080.36	5167.44
28	5029.4	5117.55	5184.58	5198.29	
29	4989.67	5078.26	5102.79		5217.44
30	5390.19	5508.64			
31	5290.59	5370.88	5394.32	5421.4	
32	5163.9	5286.3	5354.9		
33	4734.51	4763.17	4894		
34	5062	5160.28	5281.11	5321.7	
35	5131	5218.4	5339.9	5403.93	
36	5160	5260	5379.6	5421.8	
37	4817.63	4898.29	4956.8		
38	5039	5115.76	5176.4	5200.3	
39	4898.66	4969.6			5014.28
40	4975.78	5058.08	5139.57	5195.72	
41	4839	4945.1			4979.4
42	5122.42	5210.78		5292.3	
43	5105.99	5182.46		5214.78	5430.29
44	4954.8	5034.44	5156.59	5186.8	
45	5158.44	5231.42		5274.28	5533.27
46	5031.42	5123.95	5301.42	5375.89	
47	4847.53	4939.67	5038.4		

continua

conclusão

POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E
48	5025.18	5117.44	5250.58		
49	5425.98	5528.93	5688.22	5761.26	
50	5046.9	5157.3	5333.5		
51	4800	4916.9		4978.5	5089.34
52	4846	4913.37	4983	5017	5064.45
53	4787.8	4869.39	4911.05		
54	5053.93	5143.18	5279.51	5348.26	
55	5221.07	5318.92	5465.92	5518.41	
56	4985.56	5119.19	5264.56		
57	4945.28	5029.5	5117.31	5198.16	
58	4947.8	5025.01	5120.4	5378.8	5693.15
59	4953.95	5023.63	5100.76	5190	
60	5433.88	5556.81	5640		
61	5023.99	5112.4	5217.77		
62	5056.82	5150.75	5214.26	5250	
63	4963.12	5051.39	5139.11	5255.61	
64	5015.97	5101.82	5221.31		
65	5157.97	5238.15	5356.79		
66	5024.55	5099.26	5253.61		
67	4883.6	4940.03	5105.36	5165.8	
68	5011.54	5052.47	5176.43	5256.21	
69	4784.7	4864.29	4995.42	5274.72	
70	5362.77	5460			
71	5234.42	5279.58	5417.64		
72	4907.11	4946.84	5051.56	5110.23	
73	5121.24	5270			
74	4929.47	4967.32	5068.73	5132.91	
75	4980.51	5035.52	5130.1	5190	
76	4912.6	4952.7	5064.92	5122.73	
77	5405.57	5467.75			
78	4992.81	5064.63	5196.8		
79	4982.62	5020.93	5122.26	5179.48	
80	5213.58	5360.39	5367.17		
81	5281	5390.86	5438.7		
82	5020.27	5065.05	5197.94		
83	5036.31	5124.51	5268.04	5320	

Conforme mencionado anteriormente, o valor da informação obtida a partir dos testemunhos varia ao longo do ciclo de vida de um campo de petróleo (Figura 5), sendo que a maior importância destas informações se dá nas primeiras etapas de exploração e avaliação. A fim de garantir informações de rocha essenciais nessas

fases iniciais, dada a maior complexidade e elevado número de poços, o modelo foi aplicado em duas etapas. Desta forma, num primeiro momento, aplicou-se o modelo ao conjunto dos três primeiros poços, neste estágio foi exigida uma espessura mínima de 60 m a serem testemunhados em cada uma das zonas. Após esta etapa, o modelo foi aplicado aos outros 80 poços com a exigência de que fossem testemunhados no mínimo 180 m em cada uma das zonas, totalizando assim 240 m de testemunho em cada zona do reservatório.

Na primeira etapa, o modelo sugere os poços 1 e 2 para a retirada de 60 m de testemunho em cada uma das 5 zonas, conforme a tabela 6. Essas exigências de investigação inicial podem ser alteradas caso a caso, conforme a necessidade e interesse dos geólogos e engenheiros do campo. A aquisição dos testemunhos nos dois poços selecionados teve um custo ótimo de \$15.358.856,40.

Na segunda etapa onde foram considerados os demais poços (80), o modelo sugere a escolha dos poços 5 e 58 conforme tabela 6, com um custo de \$17.489.524,80. O modelo foi rodado num laptop com processador Intel core i3, 2.30 GHz. O tempo de execução foi de 0.218 segundos e foram necessárias 247 iterações.

Tabela 6. Resultados consolidados das duas etapas no planejamento do campo REGIUS.

Nº POÇOS	ZONA A	ZONA B	ZONA C	ZONA D	ZONA E	Nº descidas barrilete (N_t)
1	60	60		60	60	4
2			60			1
5	102.790	180			197.210	8
58	77.210		180	222.790		8

Desta forma, foram escolhidos 4 poços para testemunhagem, com custo total de \$32.848.381,20. Os resultados obtidos pelo modelo, otimizam a aquisição, escolhendo a melhor combinação entre os 83 poços a serem testemunhados. É cumprida a exigência mínima de metros a serem testemunhados em cada zona no menor número de poços possível, com um custo mínimo, em função das espessuras e profundidades das zonas em cada um dos poços.

Comparando com os testemunhos retirados no campo real, o modelo promove uma redução no número de mobilizações para retirada de testemunhos da ordem de

75%. E ainda contempla uma amostragem homogênea das fácies do reservatório, conforme exigido pelo modelo. Esta redução de mobilizações é extremamente desejável, pois reduz o número de poços nos quais haverá necessidade de paralisação da sonda e todas as necessidades de logística e Segurança, Meio Ambiente e Saúde (SMS) associadas à retirada de testemunhos.

A aplicação do modelo aos dados do campo REGIUS apresentou resultados condizentes com o esperado, otimizando a aquisição. Mesmo com o elevado número de poços, o modelo é bem rápido, chegando a um resultado em uma fração de segundos, mesmo executado por computadores simples, que tenham instalado o *software* GAMS. Com um treinamento mínimo espera-se que possa ser aplicado pelos geólogos e engenheiros responsáveis pelo planejamento da aquisição de dados em um campo, auxiliando assim na otimização de suas atividades.

É importante notar que o modelo, sugere a testemunhagem no poço 2 exclusivamente para a retirada de 60 m na zona C. Porém no poço 1 há uma amostra de comprimento de 46,63 m que pode representar a zona C. Caso o engenheiro/geólogo responsável pelo planejamento renuncie à exigência mínima de 60 m, a amostra se torna uma solução viável otimizando ainda mais a redução de custos com testemunhagem no campo. Neste sentido sugere-se que os resultados sempre devem ser analisados pelos responsáveis, de maneira a agregar sensibilidade humana aos diferentes cenários resultantes.

Conforme Forbes (1998) apesar do custo elevado e pequeno volume investigado, a informação de alta resolução, obtida através dos testemunhos é de extrema importância no desenvolvimento de um campo, realizada a transferência de escala adequada, os demais processos e métodos podem ser calibrados e populados com tal informação.

Em um cenário complexo, a análise humana das inúmeras possibilidades de aquisição de testemunhos nos poços a serem perfurados se torna extenuante sem a ajuda de ferramentas de decisão, podendo levar a equívocos, sendo assim, se torna muito bem-vinda, a ajuda de um modelo de programação matemática capaz de analisar todas as possibilidades em questão de minutos (ou até segundos) como apoio na tomada de decisão. Um erro bastante comum é não contemplar nos custos iniciais, a retirada de testemunhos no final da vida de um campo. E em geral, nesse momento os recursos não são fartos e a informação pode ser extremamente necessária para

redução do fluido residual. Não são incomuns projetos de revitalização de campos mais antigos, que exigem a perfuração de poços e retirada de novos testemunhos; implicando recursos que não foram previamente planejados no início da exploração do campo.

7. CONCLUSÕES

Atualmente a aquisição de testemunhos de rocha na indústria do petróleo é planejada por geólogos da área de reservatórios. Durante a exploração de um campo, especialistas utilizam a experiência adquirida ao longo dos anos para escolher quais os melhores poços a serem testemunhados, para a construção do modelo do reservatório.

Com a aplicação do modelo proposto desde as etapas de planejamento do desenvolvimento do campo, é possível adquirir toda a informação necessária, em um número inferior de poços, reduzindo drasticamente os custos com mobilização para testemunhagem. É importante salientar que o modelo pode e deve ser adaptado caso a caso, atendendo as exigências de amostragem em cada uma das fácies previstas, posição no reservatório e momento de perfuração dos poços, de acordo com as necessidades dos intérpretes e engenheiros do reservatório.

A rocha prevista nos poços a serem perfurados, e a necessidade de representatividade dos diferentes tipos existentes no campo estudado deverão nortear a escolha dos poços a serem testemunhados e a metragem de cada testemunho a ser adquirido.

Em ambos os casos testados (TAMBORIL e REGIUS), o modelo MILP para planejamento de aquisição de testemunhos se mostrou eficiente, resultando na opção pelo conjunto de poços mínimo e com amostras em todas as zonas solicitadas, representando conseqüentemente, a solução mais econômica.

A execução do modelo é extremamente rápida, facilitando o planejamento e podendo, após um treinamento mínimo, ser facilmente implementada pelos geólogos e engenheiros responsáveis pelo planejamento da aquisição.

Os parâmetros e exigências podem e devem ser alterados conforme a necessidade do reservatório, oferecendo assim resultados condizentes com cada campo.

Após o início da perfuração dos poços e desenvolvimento do campo de petróleo a ser estudado, o modelo MILP deve ser atualizado constantemente para garantir que as melhores decisões sejam tomadas ao longo do ciclo de vida do campo.

Comparada às estratégias atuais para o planejamento de aquisição de dados, os modelos de otimização se mostram como alternativas mais econômicas. Assim,

recomenda-se que a utilização de modelos matemáticos de PO seja realizada sempre em conjunto com a experiência e sensibilidade humana adquirida em experiências anteriores.

8. CONTRIBUIÇÃO DA DISSERTAÇÃO

A maior contribuição deste trabalho foi oferecer um modelo determinístico (MILP) com variáveis binárias, inteiras e contínuas que auxilia na tomada de decisão dos responsáveis pelo planejamento da aquisição de testemunhos de rocha. Introduzindo assim, modelos de otimização na fase de exploração da indústria do petróleo e a PO como ferramenta de resolução inspirando o desenvolvimento de trabalhos futuros nesta linha.

9. PROPOSTAS DE CONTINUAÇÃO DO TRABALHO

Aprimorar, trazendo para um modelo único, a exigência mínima de testemunhagem nos primeiros poços, evitando assim a exigência das duas etapas executadas atualmente.

Adicionar uma variável espacial com vistas a priorizar a escolha de poços mais distantes, na tentativa de se obter amostras de rocha nas diferentes porções da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAUJO, S.A. de; ARENALES, M.N.; CLARCK, A.R. **Dimensionamento de lotes de programação do forno de uma fundição de pequeno porte.** *Gestão & Produção*, v. 11, n. 2, p. 165-176, 2004.
- ARNTZEN, B.C.; BROWN, G.C.; HARRISON, T.P.; TRAFTON, L.L. **Global supply chain management at Digital Equipment Corporation.** *Interfaces*, v. 25, n. 1, p. 69-93, 1995.
- BEGUR, S.V.; MILLER, D.; WEAVER, J.R. **An integrated spatial DSS for scheduling and routing home-health-care nurses.** *Interfaces*, v. 27, n. 4, p. 35-48, 1997.
- BELFIORE, P. & FÁVERO, L.P. **Pesquisa Operacional para cursos de engenharia.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.
- BOHL, A.H. **Computer-aided formulation of silica defoamers for the paper industry.** *Interfaces*, v.24, n.5, p. 41-8, 1994.
- CAMM, J.D.; CHORMAN, T.E.; DILL, F.A.; EVANS, J.R.; SWEENEY, D.J.; WEGRYN, G.W. **Blending OR/MS, judgement, and GIS: restructuring P&G's supply chain.** *Interfaces*, v. 27, n. 1, p. 128-142, 1997.
- CARVALHO, M.C.A. **Técnica de Otimização no segmento *Upstream*: Planejamento da infraestrutura em campos de exploração de petróleo *offshore*.** São Paulo; USP, 2004. 158 p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo, 2005 (versão revisada).
- CHENG, C.S.A.; LIAO, W.M. **Simultaneous determination of joint product cost allocations and cost-plus prices.** *Decisions Sciences*, v. 23, n. 4, p. 785-796, 1992.
- COLIN, E.C.; CIPARRONE, F.A.M.; SHIMIZU, T. **Otimização do custo de transporte na distribuição-armazenagem de açúcar.** *Produção*, v. 9, n. 1, p. 23-30, 1999.
- COLIN, E.C. **Mathematical programming accelerates implementation of agro-industrial sugarcane complex.** *European Journal of Operational Research*, v. 199, p. 232-235, 2009.
- COLIN, E.C. **Pesquisa Operacional: 170 aplicações em estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas.** 2. ed., São Paulo: Atlas, 2018.
- CULLICK, A.S.; CUDE, R. G.; TARMAN, M. **Optimizing Field Development Concepts for Complex Offshore Production Systems.** In: Paper SPE 108562-MS. Society of Petroleum Engineers. Offshore Europe 2007, Aberdeen, Scotland, U.K, 2007.

DANTZIG, G. B. **Linear programming under Uncertainty**. Management Science, v. 1, n. 3-4, p. 197-206, 1955.

DANTZIG, G. B. **Linear programming and extensions**. Princeton. Princeton University Press, 1963.

DEMEESTER, L.; TANG, C. **Reducing cycle time at an IBM wafer fabrication facility**. Interfaces, v. 26, n. 2, p. 34-49, 1996.

DeWITT, C.E.; LASDOM, L.S.; WARREN, A.D.; BRENNER, D.A.; MELHEIM, S.A. **OMEGA: an improved gasoline blending system for Texaco**. Interfaces, v. 19, n. 1, p. 85-101, 1989.

EOM, S. & KIM, E. **A survey of decision support system applications (1995-2001)**. Journal of the Operational Research Society, v. 57, p. 1264-1278, 2006.

FLOUDAS, C. A. **Nonlinear and Mixed-integer Optimization: Fundamentals and Applications**, Oxford University Press, New York, 1995.

FORBES, P. **The status of core analysis**. Journal of Petroleum Science and Engineering. V.19, n. 1-2, p. 1-6, 1998.

GUAJARDO, M & RÖNNQVIST, M. **Operations research models for coalition structure in collaborative logistics**. European Journal of Operational Research, v. 240, p. 147-159, 2015.

HAMACHER, S. & FERREIRA FILHO, V.J.M. (Org.). **Aplicações de Pesquisa Operacional na indústria internacional de petróleo e gás**. 2. ed., Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

HIGGINS, A.J. **Optimizing cane supply decisions within a sugar mill region**. Journal Scheduling, v. 2, p. 229-244, 1999.

HIGGINS, A.J.; MUCHOW, R.C. **Assessing the potential benefits of alternative cane supply arrangements in the Australian sugar industry**. Agricultural Systems, v. 76, n. 2, p. 523-638, 2003.

HOLZ, B.W.; WROTH, J.M. **Improving strength forecasts: support for army manpower management**. Interfaces, v.10, n.1, p. 37-49; 1980.

IYER, R. R.; GROSSMANN, I. E.; VASANTHARAJAN, S.; CULLICK, A. S. **Optimal Planning and Scheduling of Offshore Oil Field Infrastructure Investment and Operations**. Industrial & Engineering Chemistry Research. V. 37, n. 4, p 1380-1397, 1998.

KUVYKIN, V. I. **Optimal Planning and Analysis of Continuous Production Models**. Automation and Remote Control. V. 79, n. 2, p.384-390, 2018.

LEME, Ruy Aguiar da Silva. **Aplicação da programação linear ao estudo da decisão dos empresários**. São Paulo, 1956. 172 pp. Tese (Provisório de Cátedra) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1956.

LIU, M.; XU, X.; ZHANG, D. **Integrated optimization model for distribution network design: a case study of the clothing industry**. International Transactions in Operational Research. v. 26, n. 4, p. 1269-1292, 2019.

LODISH, L.M.; CURTIS, E.; NESS, M.; SIMPSON, M.K. **Sales force sizing and deployment using decision calculus model at Syntex Laboratories**. Interfaces, v. 18, n. 1, p. 5-20, 1988.

LUEMBERGER, D.G.; **Investment Science**. New York: Oxford University Press. Inc, 1998.

MADDAH, B.; AL-HINDI, M.; YASSINE, A.; WAHAB, Z. **An integrated approach to state decision-making in upstream hydrocarbon operations with application to Lebanon**. IEEE Transactions on Engineering Management, v. 61, n. 4, p. 755-767, 2014.

MEHREZ, A.; HUNG, M.S.; AHN, B.H. **An industrial ocean-cargo shipping problem**. Decision Sciences, v. 26, n. 3, p. 395-423, 1995.

MELO, W. A. X. **Novas abordagens de solução para programação não linear inteira mista binária e programação quadrática não convexa**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia de Sistemas e Computação. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

MORAES, L.A.M. **Uso de modelos de otimização pela área de gás e energia da Petrobras**. XLV Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, Natal, 2013. Anais do SBPO, 2013.

OWENS, J. **How the DTI considers the value of acquiring data for field development issues**. In: Workshop on Economics Benefits of Core Analysis. Society of Core Analysts Symposium, Montpellier, France, 1996.

POOLEY, J. **Integrated production and distribution facility planning at Ault Foods**. Interfaces, v. 27, n. 6, p. 51-64, 1994.

PORTOUGAL, V. **Production scheduling in the snack-food industry**. Interfaces, v. 27, n. 6, p. 51-64, 1997.

REJOWSKI Jr, R.; PINTO, J.M. **Programação de distribuição dutoviária de derivados de petróleo**. Boletim Técnico da Petrobras, v. 46, p. 134-166, 2003.

ROUSH, W.B; STOCK, R.H.; CRAVENER, T.L.; D'ALFONSO, T.H. **Using chance-constrained programming for animal feed formulation at Agway**. Interfaces, v. 24, n. 2, p. 53-58, 1994.

RUBIN, P.A.; BENTON. W.C. **A generalized framework for quantity discount pricing schedules**. Decision Sciences, v. 34, n. 1, p. 173-188, 2003.

SHAFIEE, M.; ANIMAH, I.; ALKALI, B.; BAGLEE, D. **Decision Support methods and applications in the upstream oil and gas sector.** Journal of Petroleum Science and Engineering. V. 173, p. 1173-1186, 2019.

SCHNEIEDERJANS, M.J.; MARKL, R.E. **Estimating startup resource utilization in a newly formed organization.** Interfaces, v.16, n. 5, p. 101-109, 1986.

SUBRAMANIAN, R.; SCHEFF Jr., R.P; QUILLINAN, J.D; WIPER, D.S.; MARSTEN, R.E. **Codstart: Fleet assignment at Delta Air Lines.** Interfaces, v. 24, n. 1, p. 104-120, 1994.

VÁSQUEZ-ALVAREZ, E. **Síntese Ótima de Processos de Purificação de Proteínas.** São Paulo, 2000. 144 p. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química. São Paulo, 2000.

VASQUEZ, M.; HAO, J.K. **A heuristic approach for antenna positioning in cellular networks.** Journal of Heuristics, v. 7, n. 5, p. 443-472, 2001.

YOSHIZAKI, H.T.Y.; MUSCAT, A.R.N.; BIAZZI, J.L. **Decentralizing ethanol distribution in Southeastern Brazil.** Interfaces, v. 26, n. 6, p. 24-34, 1996.

ZAPPE, C.; HOROWITZ, I.; WEBSTER, W. **Using linear programming to determine post-facto consistency in performance evaluations of major league baseball players.** Interfaces, v. 23, n. 6, p. 107-113, 1993.