



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CAMPUS ANGICOS
DEPARTAMENTO CIÊNCIAS EXATAS TECNOLÓGICAS E
HUMANAS - DCETH
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

RENATO BEZERRA REIS

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM PROBLEMA DE
MISTURA DE COMPONENTES E UM PROBLEMA DE FLUXO DE PRODUÇÃO
APLICADOS À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

ANGICOS-RN

2013

RENATO BEZERRA REIS

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM PROBLEMA DE
MISTURA DE COMPONENTES E UM PROBLEMA DE FLUXO DE PRODUÇÃO
APLICADOS À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural
do Semi-Árido – UFERSA, Campus Angicos para a
obtenção do título de Bacharel em Ciência e
Tecnologia.

Orientador: Prof^o Me. Matheus da Silva Menezes -
UFERSA

ANGICOS-RN

2013

Catálogo na Fonte

Biblioteca Universitária Campus Angicos (BCA-UFERSA)

R375e	<p>Reis, Renato Bezerra.</p> <p>Estudo de otimização e análise de sensibilidade de um problema de mistura de componentes e um problema de fluxo de produção aplicados à indústria de petróleo / Renato Bezerra Reis. – Angicos, RN : UFERSA, 2013.</p> <p>63 f. : il.</p> <p>Monografia (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido. Campus Angicos. Orientador: Prof.º M.Sc. Matheus da Silva Menezes.</p> <p>1. Otimização. 2. Petróleo. 3. Análise de sensibilidade. I. Título.</p> <p>RN/UFERSA/BCA</p>	CDD 515.1
-------	--	-----------

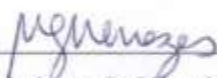
RENATO BEZERRA REIS

ESTUDO DE OTIMIZAÇÃO E ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE UM PROBLEMA DE
MISTURA DE COMPONENTES E UM PROBLEMA DE FLUXO DE PRODUÇÃO
APLICADOS À INDÚSTRIA DE PETRÓLEO

Monografia apresentada no Campus Angicos para a
obtenção do título de Bacharel em Ciência e
Tecnologia.

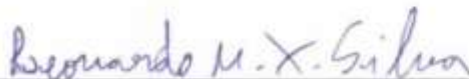
APROVADO EM: 12/04/2013

BANCA EXAMINADORA



Prof.º. Me. Matheus da Silva Menezes – UFERSA

Presidente



Prof.º. Me. Leonardo Magalhães Xavier Silva - UFERSA

Primeiro Membro



Prof.º. Dr. Daniel Sabino Amorim de Araújo – UFERSA

Segundo Membro

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente por suas bênçãos e proteção, dando-me sabedoria e força de vontade para mais essa conquista.

À minha família, especialmente à minha mãe Geiza Cachina Bezerra, meu irmão Rodrigo Bezerra Reis e minha avó Iracema Cachina Bezerra por todo apoio, preocupação, sacrifícios, paciência e palavras de consolo e parabenização.

À minha noiva Nayara Jhéssica Marques da Fonsêca pela compreensão, dedicação, ensinamentos, paciência, confiança, conforto, incentivo e por ter contribuído de forma significativa na realização deste trabalho.

A Neuridan Fonsêca, Fabíola Fonsêca e Lara Fonsêca pelos ensinamentos, admiração, carinho, conforto e conselhos. Agradeço todos os dias por fazer parte da família de vocês.

Ao meu orientador Matheus Menezes, pela dedicação, disponibilidade e contribuições na elaboração deste trabalho.

Aos professores da banca, Daniel Sabino e Leonardo Xavier pela aceitação do convite e pela importante contribuição com este trabalho.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA/Campus Angicos. A todos os professores, em especial a Márcio Furukava, Joselito Cavalcante, Núbia Alves, Marcilene Nóbrega, Matheus Menezes, Ana Girão, Fabrícia Nascimento, Leonardo Xavier e ao bibliotecário Mário Gaudêncio, que contribuíram direta ou indiretamente para a conclusão deste trabalho.

A todos do Sebrae, em especial à Fernando de Sá, Starlen Ferreira, Fabíola Martins, Sandra Muriele, Wellyonara Ysabelly, Mona Lisa, Ligianne Oliveira, Dilzete e a todos os estagiários e colaboradores, pela oportunidade, pelo apoio, ensinamentos, favores e compreensão.

A todos os meus amigos, em especial à Alice Kaliane, João Maria, Jefferson Alves, Reniere Valentim, Cláudia Alves, Tiago Andrade e Bruna Aline, que estão sempre me apoiando e dando forças para não desistir, obrigado a todos.

“A mente que se abre para uma nova idéia
jamais volta a seu tamanho original”

Albert Einstein

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Rochas geradoras e reservatórios.....	17
Figura 2 - Tipos de armadilhas	18
Figura 3 - Recordes mundiais de produção marítima (até 2003)	25
Figura 4 - Pré-sal	26
Figura 5 - Segmentos básicos da indústria do petróleo	27
Figura 6 - Tipos de entradas e saídas da Unidade de Processamento.....	29
Figura 7 - Esquema de refino	29
Figura 8 - Distribuição do parque de refino no Brasil.....	31
Figura 9 - Processo de resolução de um problema	34
Figura 10 - Tipos de conjunto	36
Figura 11 - Fluxo de óleos passando pelos centros de processamento.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituição dos produtos derivados dos hidrocarbonetos	18
Tabela 2 - Frações típicas que são obtidas do petróleo	19
Tabela 3 - Tipos de petróleo e derivados extraídos	21
Tabela 4 - Distribuições da produção nacional de petróleo e gás natural por operador.....	30
Tabela 5 - Dados referentes ao computador utilizado para resolução dos problemas.....	41
Tabela 6 - Dados referentes ao sistema operacional utilizado nos problemas	41
Tabela 7 - Quantidade disponível de petróleo	42
Tabela 8 - Percentuais para limites de qualidade das gasolinas	42
Tabela 9 - Custos e capacidades de produção	44
Tabela 10 - Custos/Preços dos produtos.....	45
Tabela 11 - Valor ótimo encontrado da função objetivo do problema da mistura de petróleo	49
Tabela 12 - Folgas e preço dual do problema da mistura de petróleo	50
Tabela 13 - Variáveis da função objetivo do problema da mistura de petróleo	52
Tabela 14 - Restrições do problema da mistura de petróleo.....	52
Tabela 15 - Valor ótimo encontrado da função objetivo do problema do fluxo de petróleo na refinaria.....	55
Tabela 16 - Folgas e preço dual do problema do fluxo de petróleo na refinaria.....	56
Tabela 17 - Variáveis da função objetivo do problema do fluxo de petróleo na refinaria	57
Tabela 18 - Restrições do problema do fluxo de petróleo na refinaria.....	57

LISTAS DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP – Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

°C – Celsius

CEPETRO – Centro de Estudo de Petróleo

CNP – Conselho Nacional do Petróleo

CPRM – Serviço Geológico do Brasil

GLP – Gás Liquefeito de Petróleo

LP – Programação Linear

NOS – Nitrogênio, Enxofre e Oxigênio

OPEP – Organização dos Países Exportadores de Petróleo

PPL – Problemas de Programação Linear

QAV – Querosene de Aviação

SIG – Sistemas de Informações Gerenciais

UNITBR – Universidade Integrada do Brasil

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS.....	12
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
1.2 JUSTIFICATIVA	13
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	15
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PETRÓLEO.....	16
2.1.1 Petróleo e sua Origem.....	16
2.1.2 O Petróleo e seus Constituintes	18
2.1.3 Classificação do Petróleo.....	19
2.1.4 Breve História do Petróleo	21
2.1.5 A Indústria do Petróleo.....	27
2.1.6 Produção <i>Upstream</i>	28
2.1.7 Produção <i>Downstream</i>	28
2.1.8 Tipos de Gasolina	32
2.2 TEORIA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR	33
2.2.1 Modelagem do Problema.....	33
2.2.2 Problema de Programação Linear.....	34
2.2.3 Simplex.....	36
2.2.4 Teoria da Dualidade e Análise de Sensibilidade em Programação Linear.....	37
3 MATERIAL E MÉTODOS	41
3.1 MATERIAL.....	41
3.2 PROBLEMAS	42
3.2.1 O Problema da Mistura de Petróleo.....	42
3.2.2 O Problema do Fluxo de Petróleo na Refinaria.....	44
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 O PROBLEMA DA MISTURA DE PETRÓLEO	48
4.2 O PROBLEMA DO FLUXO DE PETRÓLEO NA REFINARIA	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
GLOSSÁRIO	64

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estudar técnicas de otimização e analisar um problema de mistura de componentes e um problema de fluxo de produção aplicados à indústria de petróleo. Em particular escolheu-se estes dois problemas, sendo o primeiro referente à produção de gasolina com diferentes composições de petróleo e o segundo relativo ao fluxo ótimo na refinaria; para isto faz-se uma modelagem matemática e efetua-se a solução dos problemas através de um sistema computacional especialista, o *software* comercial *LINDO 6.1*. Em seguida faz-se um estudo de dados obtidos, efetuando-se uma análise de sensibilidade. Para tanto realizou-se uma revisão na literatura clássica, assim como em teses e dissertações. Ao final desse processo, concluiu-se que a utilização dessas técnicas e ferramentas podem trazer diversos benefícios ao tomador de decisão, transformando dados brutos em informações relevantes, buscando efetuar um aproveitamento ótimo dos recursos disponíveis.

Palavras-chave: Otimização. Petróleo. Análise de sensibilidade.

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Sociedade Brasileira de Pesquisa Operacional, esta é uma ciência aplicada voltada para a resolução de problemas reais. Tendo como foco a tomada de decisões, aplica conceitos e métodos de várias áreas científicas na concepção, planejamento ou operação de sistemas. A Pesquisa Operacional é usada para avaliar linhas de ação alternativas e encontrar as soluções que melhor servem aos objetivos dos indivíduos ou organizações.

De acordo com Lachtermacher (2003), a Pesquisa Operacional tem como um de seus objetivos, apoiar o processo de tomada de decisão para que estas sejam independentes do decisor e assegurar que o processo de tomada de decisão seja claro e transparente.

Goldbarg (2005) ressalta que a programação matemática é fortemente direcionada ao apoio da tomada de decisão no gerenciamento de sistemas de grande porte, utilizando-se de meios automáticos de dados para examinar inúmeras configurações viáveis do problema proposto, e dentro de determinados critérios, oferecer a melhor solução.

As atividades de exploração e beneficiamento do petróleo são bastante complexas e envolvem várias áreas de conhecimento, com grande aplicabilidade prática. Nesse contexto, vários problemas de otimização surgem para modelar problemas e encontrar resultados onde em um determinado contexto, a solução sugerida seja a que melhor otimize a utilização dos recursos disponíveis obedecendo as limitações de produção.

1.1 OBJETIVOS

Dessa forma, fica evidente a importância de estudar modelos e algoritmos que permitam descrever e otimizar alguns dos processos operacionais da indústria de exploração e produção de petróleo. Com isso, o presente trabalho será desenvolvido de forma a alcançar os seguintes objetivos:

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar técnicas de otimização e analisar um problema de mistura de componentes e um problema de fluxo de produção aplicados à indústria de petróleo.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Efetuar uma breve contextualização do processo de exploração e beneficiamento do petróleo;
- b) Contextualizar os problemas com a modelagem matemática e a programação linear;

- c) Efetuar a modelagem de dois problemas relacionados à exploração de petróleo, sendo o primeiro referente à produção de gasolina com diferentes composições e o segundo relativo a fluxo na refinaria, constantes em literatura especializada;
- d) Efetuar a solução do problema com os dados estimados, através de um sistema computacional especialista (Gnu Linear Programming Toolkit/Gnu Math Programming Language (GLPK/GMPL)) ou LINDO;
- e) Analisar os dados e resultados obtidos, efetuando também uma análise de sensibilidade.

1.2 JUSTIFICATIVA

Diante dos problemas reais encontrados no setor petrolífero, esses melhor discriminados no corpo deste trabalho, e o surgimento de novas demandas, despertou-se o interesse de buscar soluções pertinentes, que correlacionem os recursos disponíveis e as necessidades de produção em vários ramos dessa indústria.

Assim, os estudos que embasam este trabalho e os resultados almejados são de grande valia no âmbito da indústria do petróleo uma vez que buscam otimização dos recursos disponíveis e excelência em sua produção, diminuindo as perdas de matéria prima e aproveitando ao máximo os recursos disponíveis, ficando evidente a importância de estudar modelos e algoritmos que permitam descrever e otimizar alguns dos processos operacionais da indústria de exploração e produção de petróleo.

Dessa forma, além do interesse teórico inerente ao conteúdo a ser analisado no presente estudo, temos ainda uma grande aplicação prática do mesmo na indústria petrolífera, que por sua vez desenvolve importante papel no setor econômico em escala mundial.

De acordo com Goldbarg (2005), existem inúmeros problemas aplicados à indústria de petróleo, entre os quais podemos citar:

- Problemas de Mistura de Petróleo;
- Problema de Fluxo de Petróleo na Refinaria;
- Problema do Pistoneio Móvel;
- Problema de Esquema de Refino;
- Problema de Distribuição de Gás Natural através de Tubulações;
- Problema de Localização de Poços de Petróleo;
- Problema na Distribuição de Derivados de Petróleo;
- Problema de Roteamento de Petroleiros;

- Problema de Exploração de Campo Submarino de Petróleo;
- Problema de Localização de Manifolds em Campos Submarinos.

Ainda existem inúmeros outros problemas que não foram citados aqui, mas que fazem parte do contexto abordado. Destes supracitados, optamos por estudar dois que foram pré-selecionados dos citados acima, sendo o primeiro problema referente a otimizar a mistura de diferentes tipos de petróleo para produção de diferentes tipos de gasolina, enquanto o segundo problema aborda o fluxo ótimo de petróleo na refinaria, de forma a minimizar os custos de produção.

De acordo com Taha (2008) quando analisamos problemas complexos e modelos típicos de programação linear, o único modo viável de resolver tais problemas é através de softwares, também conhecidos como *Solvers*, onde temos como exemplos o *GLPK (GNU Programming Language)* e o *LINDO*, dentre outros. Utilizar um *solver* para tal tarefa é importante, pois estes problemas podem envolver milhares de variáveis e restrições, inviabilizando a solução manual. O *solver* fornece os limites e folgas das variáveis e restrições envolvidas no problema, assim como oferecer grande flexibilidade na modelagem e execução de modelos de Programação Linear grandes e complexos.

Além de encontrar a solução ótima para as situações analisadas nos problemas acima mencionados, é importante promover uma análise de sensibilidade nos resultados obtidos. Segundo Goldberg (2005), a análise de sensibilidade é basicamente uma técnica utilizada para avaliar os impactos que o programa sofre quando existem modificações nas condições de modelagem. Análise de sensibilidade é, basicamente, o estudo de um modelo de programação matemática submetido à mudança em suas condições iniciais. As mudanças poderão abranger:

- Mudança no vetor de custos.
- Mudança no vetor de termos independentes.
- Mudança nos coeficientes das variáveis.
- Acréscimo de restrições.
- Acréscimo de novas variações.

De acordo com o exposto acima, o presente trabalho deverá contemplar a modelagem, resolução através de um solver e análise de sensibilidade dos resultados, contemplando assim todas as etapas de resolução de um problema de programação linear, tornando-se uma ferramenta importante no auxílio à tomada de decisão.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Desta forma a alcançar os objetivos propostos, o presente trabalho contempla a seguinte organização metodológica. No segundo capítulo será apresentada a fundamentação teórica, sendo uma seção dedicada especialmente à contextualização dos aspectos relevantes da indústria petrolífera e, a outra seção à descrição da teoria de programação linear. A ideia é criar o embasamento teórico necessário para os demais capítulos.

No terceiro capítulo será apresentado o material e métodos, que traz todo o material utilizado para a resolução dos problemas, bem como a modelagem dos problemas. Com destaque nos dois problemas escolhidos, sendo um sobre problema da mistura de petróleo e o outro sobre problema do fluxo de petróleo na refinaria.

O quarto capítulo é apresentado os resultados e discussões, onde constarão os problemas resolvidos, utilizando de forma ótima seus recursos disponíveis, seguida de suas devidas análises.

No quinto capítulo serão apresentadas as considerações finais deste trabalho e feitas recomendações de técnicas de otimização, tanto para indústrias petrolíferas, quanto para futuras pesquisas na área.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO PETRÓLEO

2.1.1 Petróleo e sua Origem

Segundo Speight (1999), o petróleo é uma mistura complexa de hidrocarbonetos com pequenas quantidades de compostos orgânicos de nitrogênio, enxofre e oxigênio, bem como pequenas concentrações de sais inorgânicos e de compostos orgânicos contendo elementos metálicos como vanádio, níquel, cobre e ferro.

De acordo com CEPETRO (2012)¹, o termo petróleo é utilizado para mencionar tanto o óleo como o gás e defini-lo, em seu estado líquido, como uma substância oleosa, inflamável, menos densa que a água, com cheiro característico e cor variando entre o negro e o castanho claro.

A origem do petróleo deu-se a partir da sedimentação da matéria orgânica depositada no fundo de antigos mares e lagos, originando os microorganismos e algas que por sua vez originam o fitoplâncton sem sofrer processos de oxidação. Ao longo dos anos a interação desses fatores em condições termoquímicas apropriada, deu início à cadeia de processos que levou à formação do petróleo. A matéria orgânica proveniente de vegetais encontrados na superfície também pode dar origem ao petróleo, porém sua preservação torna-se mais complexa e lenta em função do meio oxidante onde estão inseridos (CARDOSO, 2004).

O tipo de petróleo gerado, óleo ou gás, é determinado pela composição da matéria orgânica original e pela intensidade do processo térmico atuante sobre ela. A matéria orgânica proveniente do fitoplâncton, quando submetida a condições térmicas adequadas, pode gerar hidrocarboneto líquido. O processo atuante sobre a matéria orgânica vegetal lenhosa poderá ter como consequência a geração de hidrocarbonetos gasosos (THOMAS, 2001, p.14).

A ocorrência de acumulações de petróleo demanda arranjos específicos de rochas sedimentares no subsolo com determinadas características. De maneira geral é necessária à existência de rochas geradoras ricas em matéria-prima que, por sua vez, se transforma em petróleo, além de rochas-reservatório. Estas possuem espaços vazios no seu interior (porosidade) capazes de armazenar o petróleo, (Figura 1). Essas rochas são envolvidas em armadilhas chamadas *traps*, compartimentos isolados no subsolo onde não tem condições de escapar (CARDOSO, 2008 e PRESS et al. 2008).

¹ Disponível em: < <http://www.bibliotecavirtual.sp.gov.br/pdf/temasdiversos-petroleo.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2013.

Figura 1 - Rochas geradoras e reservatórios



Fonte: Adaptado de CPRM (2011)

Convém ressaltar que a ausência de algum desses elementos inviabiliza a existência de uma acumulação petrolífera. E, a existência de uma única bacia sedimentar não garante a presença de jazidas de petróleo.

Para Milani et al. (2000), as rochas geradoras são formadas, principalmente, pelo acúmulo de fragmentos de outros minerais e detritos orgânicos, quando encontrados em ambientes de pouca permeabilidade, que inibe a ação da água circulante e diminui a quantidade de oxigênio existente, criando condições necessárias para a formação do petróleo.

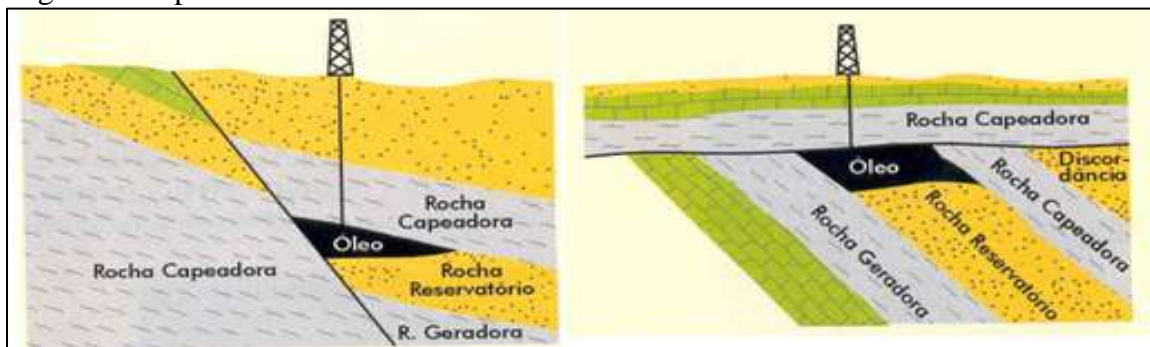
Para haver o processo de formação do petróleo é necessário que, após a geração ocorra à migração do petróleo e que no percurso desta migração exista alguma armadilha geológica que permita a acumulação do óleo. Esta migração ainda é um assunto polêmico entre os geólogos, no entanto, o que se percebe é que o petróleo é expulso da rocha onde foi gerado pelo microfraturamento nas rochas geradoras ou devido às altas pressões de compactação existentes.

Assim, o petróleo migra da rocha geradora para outra rocha mais porosa e permeável chamada rocha reservatório, e continua seu fluxo no interior da mesma, até ser contida por uma armadilha (trapa) ou uma estrutura geológica compreendida dentro de uma rocha selante (impermeável), que permita que o óleo ali se confine. Não havendo a presença da rocha selante ou da trapa, o petróleo não se acumularia devido às fraturas e as altas pressões, permitindo a expulsão dos fluidos para zonas de pressões mais baixas (MILANI et al., 2000).

De acordo com Thomas (2001), as armadilhas são classificadas em estruturais, estratigráficas e mistas ou combinadas (Figura 2). A armadilha estrutural ocorre em regiões em que as crostas estão sujeitas à compressão horizontal, esta é a forma mais comum de acumulação de petróleo e a que possui maior volume, sendo de fácil identificação tanto por geólogos quanto por geofísicos e, geralmente, são encontradas no Oriente Médio e na União Soviética. A armadilha estratigráfica ocorre em regiões em que as crostas estão sujeitas a compressão vertical, encontradas na Bacia do Ceará, Bacia Potiguar, Bacia do Espírito Santo

e na Bacia de Campos. As armadilhas mistas ou combinadas ocorrem em regiões em que as crostas estão sujeitas tanto por compressão estrutural quanto por compressão estratigráfica, encontradas na Bacia Potiguar, nos campos de Baixa do Algodão, Mossoró, Alto da Pedra e Canto Amaro, assim como na Bacia do Espírito Santo e no reservatório de Barra Nova.

Figura 2 - Tipos de armadilhas



Fonte: CPRM (2011)

2.1.2 O Petróleo e seus Constituintes

De acordo com a Gonçalves (2009), o petróleo é constituído por uma mistura de compostos químicos orgânicos, tais como hidrocarbonetos parafínicos, isoparafínicos, naftênicos e aromáticos. Outros constituintes de menor percentual são elementos como nitrogênio, enxofre, oxigênio (chamados de compostos *NSO*) e metais, principalmente, níquel e vanádio. Tais componentes, além de água, sais e sedimentos são considerados nocivos aos produtos, equipamentos e ao meio ambiente, sendo por isso considerados impurezas, devendo ser removidos em processos de tratamento específicos.

A presença destes contaminantes diminuirá a qualidade do petróleo. A Tabela 1 mostra alguns prejuízos da constituição dos produtos derivados dos hidrocarbonetos.

Tabela 1 - Constituição dos produtos derivados dos hidrocarbonetos

CONTAMINANTE	ELEMENTO QUÍMICO PRESENTE:	PREJUÍZO
Compostos Orgânicos Sulfurados	Enxofre (S)	Corrosão, Toxicidade, Poluição.
Compostos Orgânicos Nitrogenados	Nitrogênio (N)	Retenção de água emulsionada, Contaminação de catalisadores, Alteração da coloração de produtos finais.
Compostos Orgânicos Oxigenados	Oxigênio (O)	Acidez, Corrosividade, formação de gomas, odor.
Compostos Orgânicos Metálicos	Metais (Ni e V)	Agressão a materiais, Contaminação de catalisadores.

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2009)

Numa mistura de hidrocarbonetos, quanto maior a porcentagem de moléculas pequenas maior será a volatilidade da mistura.

O petróleo possui uma variedade muito grande de compostos químicos que, geralmente, são separados em frações de acordo com sua faixa de ebulição. A Tabela 2 mostra as frações típicas que são obtidas do petróleo.

Tabela 2 - Frações típicas que são obtidas do petróleo

Fração	Temperatura de Ebulição (°C)	Composição aproximada	Usos
Gás Residual	-	C1 – C2	Gás combustível
Gás liquefeito de petróleo (GLP)	Até 40	C3 – C4	Gás combustível engarrafado, uso doméstico e industrial.
Gasolina	40 – 175	C5 – C10	Combustível de automóveis, solvente.
Querosene	175 – 235	C11 – C12	Iluminação, combustível de aviões a jato.
Gasóleo leve	235 – 305	C13 – C17	Diesel, fornos.
Gasóleo pesado	305 – 400	C18 – C25	Combustível, matéria-prima para lubrificantes.
Lubrificantes	400 – 510	C26 – C38	Óleos lubrificantes.
Resíduo	Acima de 510	C38+	Asfalto, piche, impermeabilizantes.

Fonte: THOMAS (2001).

2.1.3 Classificação do Petróleo

De acordo com Correa (2003), os óleos são classificados pelo American Petroleum Institute (API), em vários graus, sendo os que apresentarem maior graduação são os melhores, isto é, são óleos mais leves. Como exemplo, um óleo de 17° API é muito pesado e um de 30° API é mais leve.

$$^{\circ}API = \left(\frac{145.1}{SG_{15,6^{\circ}C}} \right) - 131.5$$

Onde,

$SG_{15,6^{\circ}C}$, significa a gravidade específica a 15,6°C.

Ainda para Correa (2003), alguns fatores podem afetar o °API dos óleos, tais como a idade geológica, a profundidade do reservatório, o tectonismo, a salinidade e o teor de

enxofre. As rochas antigas e mais profundas possuem maior graduação, cerca de 40°API. A graduação das rochas é diretamente proporcional à intensidade das atividades tectônicas, ou seja, em regiões com muitas tensões nas camadas geológicas, encontram-se as mais altas graduações. De tal modo, nas regiões onde existem muitas tensões nas camadas geológicas. Os reservatórios de origem marinha, normalmente, apresentam maior graduação que nos reservatórios de água salobra ou fresca. Quanto ao teor de enxofre, encontra-se as mais altas porcentagens em óleos de baixa graduação.

Segundo Thomas (2001), a classificação do petróleo é feita de acordo com seus constituintes e é de interesse tanto dos geoquímicos (caracterizam o óleo para relacioná-lo à rocha mãe e medir o grau de graduação) como dos refinadores (saberem as diversas frações que podem ser obtidas, sua composição e propriedades físicas).

A classe Parafínica possui 75% ou mais de parafinas. Nesta classe são encontrados os óleos leves, com alto ponto de fluidez e com densidade inferior a 0,85°API. Este tipo de óleo é mais produzido no Nordeste, pois é um estado brasileiro classificado como parafínica. Este tipo de petróleo produz subprodutos, tais como gasolina de baixo índice de octanagem, querosene de alta qualidade, óleo diesel com boas características de combustão, óleos lubrificantes de alto índice de viscosidade com elevada estabilidade química e alto ponto de fluidez e resíduos de refinação com elevada percentagem de parafina.

A classe Parafínico-Naftênica possui entre 50-70% de parafinas, menor que 20% de naftênicos. Este tipo de óleo apresentam densidade e viscosidade maiores do que os parafínicos, porém sendo moderados. Estes são produzidos em sua maioria na Bacia de Campos, Rio de Janeiro.

Ainda para Thomas (2001), a classe Naftênica possui mais que 70% de naftênicos. Apresentam baixo teor de enxofre que originam da alteração bioquímica de óleos parafínicos e parafínicos-naftênicos. Estes tipos de óleos são encontrados na América do Sul, Rússia e Mar do Norte. Este tipo de petróleo produz subprodutos como gasolina de alto índice de octanagem, óleos lubrificantes de baixo resíduo de carbono e resíduos asfálticos na refinação.

Classe Aromático-Intermediária possui mais que 50% de hidrocarbonetos aromáticos. Apresentam densidade maior que 0,85°API e, em sua maioria, são óleos pesados. Estes podem ser encontrados no Oriente Médio (Arábia Saudita, Catar, Kuwait, Iraque, Síria e Turquia), África Ocidental, Venezuela, Califórnia e Mediterrâneo (Sicília, Espanha e Grécia).

Classe Aromático-Naftênica possui mais que 35% de naftênicos . Este tipo de óleo sofreu processo inicial de biodegração, onde foram removidas as parafinas. Estes são

derivados dos óleos parafínicos e parafínico-naftênicos e, geralmente, são encontrados na África Ocidental.

Classe Aromático-Asfáltica possui mais que 35% de asfaltenos e resinas. Estes originam-se de processos de biodegração avançada em que ocorre o agrupamento de monocicloalcenos e oxidação, podendo também enquadrar-se alguns óleos verdadeiramente aromáticos não degradados. Este tipo de óleo são pesados e viscosos, que se resultam da alteração dos óleos aromáticos-intermediários e, geralmente, são encontrados no Canadá Ocidental, na Venezuela e no sul da França.

Deste modo, os óleos parafínicos são excelentes para a produção de querosene de aviação (QAV), diesel, lubrificante e parafinas. Os óleos naftênicos produzem frações significativas de gasolina, nafta petroquímica, QAV e lubrificantes, enquanto que os óleos aromáticos são mais indicados para a produção de gasolina, solventes e asfalto (UNITBR, 2011). A Tabela 3 mostra o tipo de petróleo, o produto extraído e algumas características.

Tabela 3 - Tipos de petróleo e derivados extraídos

FAMÍLIA	PRODUTO	CARACTERÍSTICA
Parafínicos	QAV	Combustão limpa
	Diesel	Facilidade ignição
	Lubrificantes	Constância da viscosidade com temperatura
	Parafinas	Facilidade na cristalização
Naftênicos	Gasolina	Solução de compromisso entre a qualidade e a quantidade do derivado.
	Nafta petroquímica	
	QAV	
	Lubrificantes	
Aromáticos	Gasolina	Ótima resistência à detonação
	Solventes	Solubilização
	Asfaltos	Agregados moleculares
	Coque	Elevado

Fonte: UNITBR (2011)

2.1.4 Breve História do Petróleo

2.1.4.1 No Mundo

O petróleo foi um dos primeiros recursos naturais usados por nossos ancestrais, sua participação remete a tempos bíblicos. Existem relatos que muitos povos utilizavam o óleo para o betume na calefação de embarcações pelos fenícios, na pavimentação de estradas e embalsamento de mortos pelos egípcios, para fins bélicos pelos gregos e romanos, para

decoreção e impermeabilização pelos índios pré-colombianos, e como óleo medicinal ou para massagens pelos incas, maias e outras civilizações (VERÇOSA, 1994).

Registros apontam que, em torno de 1847, um comerciante de Pittsburgh, na Pensilvânia, EUA, começou a engarrafar e vender petróleo de vazamentos naturais, para ser utilizado como lubrificante. Após cinco anos, em 1852, um químico canadense descobriu que o aquecimento e a destilação do petróleo produzia querosene, um líquido que podia ser utilizado em lâmpadas. Logo, essa descoberta condenou as velas e as lâmpadas de óleo de baleia, esses fatos marcaram o início da era do petróleo.

Em 1859, em Titusville, Pensilvânia foi perfurado o primeiro poço de petróleo, com profundidade de apenas 21,2 metros, do qual se obteve 2 m³ por dia de óleo. O petróleo foi rapidamente descoberto em outros locais dos EUA, como West Virginia (1860), Colorado (1862), Texas (1866) e Califórnia (1875) (UNITBR, 2011).

A partir desse período, o petróleo passa a ser explorado por diversas companhias multinacionais, entre 1900 a 1950, formando grandes impérios e monopolizando todas as zonas produtoras de petróleo espalhadas pelo mundo, cuja concentração encontrava-se no Oriente Médio. Vale ressaltar que a supremacia americana como maior produtor mundial de petróleo se deu, em parte, à atuação do empresário John Rockefeller (fundador da Standard Oil, em 1870) que conduziu seus negócios tendo sempre em vista a expansão de suas atividades, aperfeiçoando produtos, investindo em tecnologia, construindo novas refinarias e abrindo novos mercados. No período situado entre 1920 e 1930, Rockefeller viu sua Standard Oil (mais tarde Exxon) liderar o grupo que ficou conhecido no mundo como “as sete irmãs”: Exxon, Chevron, Móbil, Texaco, Gulf, British Petroleum e Shell (CARVALHO, 2011).

Durante a Segunda Guerra Mundial a demanda por petróleo e derivados atingiu proporções gigantescas, pois havia necessidade de combustíveis para abastecer suas máquinas de guerra. No pós-guerra à procura se intensificou ainda mais e, à medida que um novo quadro geopolítico se desenhava, alguns fatos pertinentes à indústria do petróleo se desenvolviam.

Em 1950, o Oriente Médio teve um desenvolvimento notável em sua produção, e outros resultados importantes foram registrados no Norte da África, no Canadá e na Nigéria. Nessa época, os Estados Unidos, ainda, dominava metade da produção mundial, mas já se encontrava diretamente ameaçado pelos novos polos surgentes. Em decorrência inicia o maior incremento de novas tecnologias voltadas para atividades exploratórias de petróleo no mar (THOMAS, 2001).

A década de 60 foi marcada pelo consumo desenfreado do petróleo, em virtude do excesso na produção mundial e consequente diminuição dos preços do mercado e, a fundação da OPEP (Organização dos Países Exportadores de Petróleo), por iniciativa da Venezuela, Arábia Saudita, Kuwait, Iraque e Irã, representando 80% da exportação mundial de petróleo.

Em 1972, tais fatos contribuíram para a primeira crise do setor, quando o Clube de Cientistas de Roma alertou o mundo para um déficit, levando à estimativa de que o petróleo acabaria em 50 anos. Esta análise foi suficiente para que a OPEP reduzisse sua produção, embargasse as exportações e triplicasse os preços do barril de petróleo. Após sete anos, em 1979, outra crise mundial abalou o mercado, ficando conhecida como o segundo grande choque do petróleo, esta foi marcada por interesses políticos a fim de duplicar o preço do barril de petróleo. Assim, a década de 70 foi marcada por brutais elevações nos preços do petróleo (MALAFAIA, 2006 apud SIMÃO, 2001).

Nos anos 80 e 90, os avanços tecnológicos reduziram os custos de exploração e de produção, criando um novo ciclo econômico para a indústria petrolífera. Em 1996, as reservas mundiais provadas eram 60% maiores que em 1980, e os custos médios de prospecção e produção caíram cerca de 60% neste mesmo período (THOMAS, 2001).

2.1.4.2 No Brasil

Segundo PINTO (2011), a história do petróleo no Brasil começa em 1858, quando Marquês de Olinda assinou o decreto nº 2266 concedendo a José Barros Pimentel o direito de extrair mineral betuminoso para fabricação de querosene de iluminação, em terrenos situados nas margens do Rio Marau, na Província da Bahia.

Contudo, as primeiras notícias sobre pesquisas diretamente relacionadas ao petróleo ocorrem em Alagoas a partir de 1891, em função da existência de sedimentos argilosos betuminosos no litoral. O primeiro poço brasileiro com o objetivo de encontrar petróleo, porém, foi perfurado somente em 1897, por Eugênio Ferreira Camargo, no município de Bofete, no estado de São Paulo. Este poço atingiu a profundidade final de 488 metros e, segundo relatos da época, produziu 0,5 m³ de óleo (THOMAS, 2001, p.3).

Em 1919, foi criado o Serviço Geológico e Mineralógico do Brasil, que perfurou sem sucesso, 63 poços nos estados do Pará, Alagoas, Bahia, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Em 1938, com a criação do Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), inicia-se a perfuração do poço DNPM-163, em Lobato (BA). O poço foi perfurado com uma sonda rotativa e encontrou petróleo a uma profundidade de 210 metros no dia 21 de Janeiro de 1939. Apesar ter sido antieconômico, os resultados do poço foram de fundamental

importância para o desenvolvimento das atividades petrolíferas no país (GOBERSTEIN, 2007).

Em 1939, no governo de Getúlio Vargas foi instalado o Conselho Nacional do Petróleo (CNP), com a primeira Lei do Petróleo do país, para estruturar e regularizar as atividades envolvidas, desde o processo de exploração de jazidas, importação, exportação, transporte, distribuição e comércio de petróleo e derivados. Este decreto tornou o recurso patrimônio da União. No mesmo período, ocorre à descoberta da primeira acumulação comercial de petróleo do país, o Campo de Candeias (BA) (VALOIS, 2005 apud MALAFAIA, 2006).

Em meados de 1953, Getúlio Vargas em seu segundo mandato, assina a Lei nº 2004, de 3 de outubro de 1953, que instituiu a Petróleo Brasileiro S/A (Petrobras) como monopólio estatal de pesquisa e lavra, refino e transporte do petróleo e seus derivados. A partir de então, a Petrobras avança na descoberta de novas reservas, investindo em ampliação do parque de refino, visando reduzir custos com a importação de derivados. A empresa descobriu petróleo nos estados do Amazonas (AM), Pará (PA), Maranhão (MA), Ceará (CE), Rio Grande do Norte (RN), Alagoas (AL), Sergipe (SE), Bahia (BA), Espírito Santo (ES), Rio de Janeiro (RJ), Paraná (PR), São Paulo (SP) e Santa Catarina (SC).

Após a fundação da PETROBRAS, cada década tem apresentado um marco para a indústria do petróleo no Brasil. A década de 50 foi marcada pelas descobertas dos Campos em Tabuleiro dos Martins (AL) e Taquipe (BA). A década de 60 foi descoberta os campos de Carmópolis (SE) e Miranga (BA), e ainda, um marco foi à primeira descoberta no mar em Guaramicema (SE).

Na década de 70, o marco foi à descoberta da Província petrolífera da Bacia de Campos (RJ) e a Plataforma continental do RN (Ubarana). Na década de 80, foram as descobertas de petróleo em Mossoró (RN), considerada a segunda maior área produtora de petróleo do país, o Campos gigantes de Marlim e Albacora, em águas profundas da Bacia de Campos (RJ), e no Rio Urucu (AM). Destacam-se os significativos avanços na exploração em águas profundas da bacia de Campos, confirmando-se como uma das maiores bacias produtoras do mundo (PETROBRAS, 2013)²

Com o passar do tempo, o monopólio da Petrobras passa a sofrer pressões dos grandes capitais externos, que se fazem valer dos princípios de livre comércio de uma economia cada

²Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/>>. Acesso em: 05 fev. 2013.

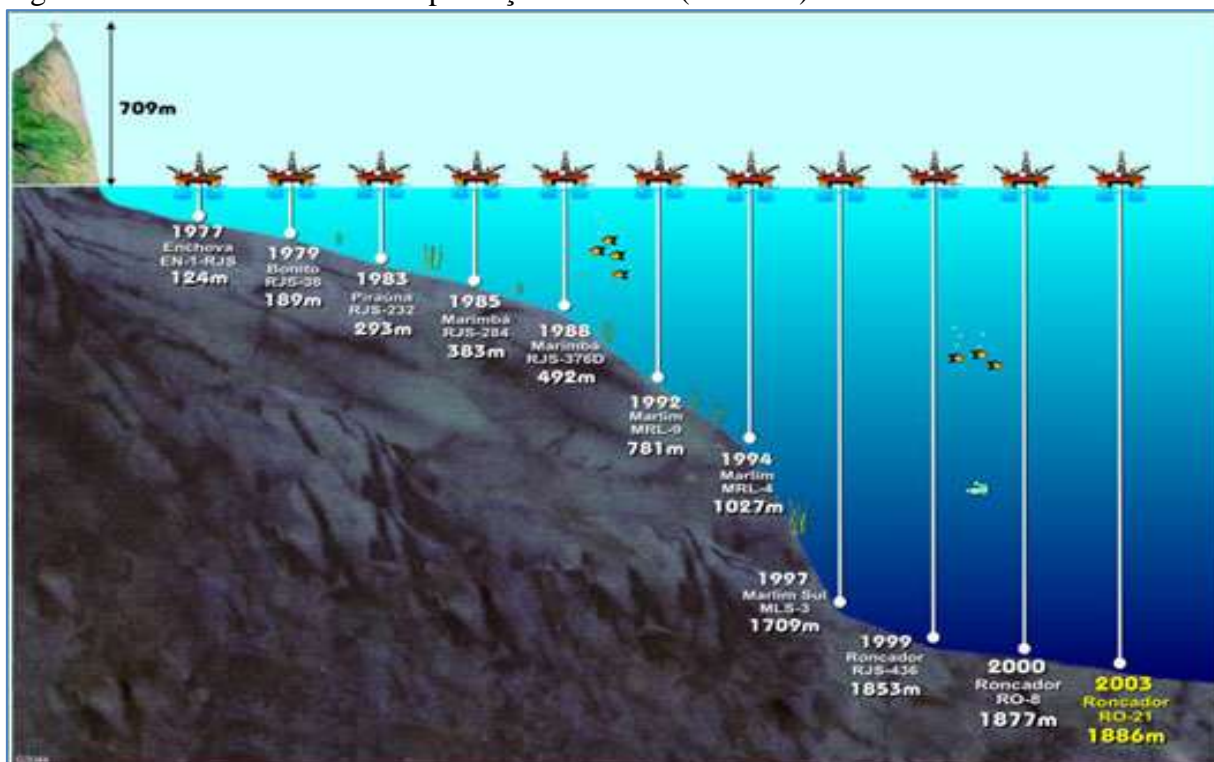
vez mais globalizada. Dessa forma os governantes da época optam por abrir o mercado de exploração das reservas do petróleo.

A Lei nº 9.478/1997, que dispõe sobre a política energética nacional, as atividades relativas ao monopólio do petróleo, cria o Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e a Agência Nacional de Petróleo (ANP), órgãos responsáveis pelos cálculos e cobranças de royalties, fiscalização de atividades relativas ao abastecimento nacional de combustíveis, atividades relativas ao transporte de gás natural, assim como às de tratamento, processamento estocagem, liquefação, regaseificação e comercialização do produto, assim inicia uma nova fase na indústria petrolífera (ANP, 2012)³.

Em meados de 2002, a Petrobras detém o recorde mundial de perfuração exploratória no mar, com um poço em lâmina d'água de 2.777 metros. Ela exporta a tecnologia de exploração nesses ambientes para vários países (FONSECA e GUIMARÃES, 2003).

A Petrobras tem cerca de 65% da área de seus blocos exploratórios offshore em profundidades de água de mais de 400 m. Consequentemente, nos últimos anos, a empresa tem expandido suas atividades de perfuração e exploração em águas cada vez mais profundas. A Figura 3 ilustra os sucessivos recordes mundiais de produção marítima de petróleo.

Figura 3 - Recordes mundiais de produção marítima (até 2003)



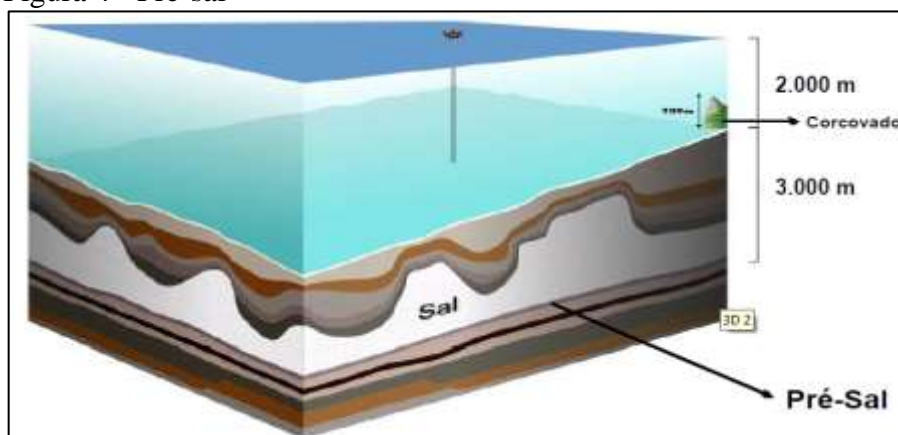
Fonte: DIAS (2006)⁴

³Disponível em: < <http://anp.gov.br/> >. Acesso em: 23 mar. 2013.

⁴Disponível em: < <http://migre.me/dO98p> >. Acesso em 17 fev. 2013.

O pré-sal é referente ao conjunto de rochas localizadas em águas ultraprofundas de grande parte do litoral brasileiro, com potencial para a geração e acúmulo de petróleo. Convencionou-se chamar de pré-sal porque, ao longo dos anos, essas rochas foram sendo depositadas antes da camada de sal formando intervalos de rochas que se estende por baixo de uma extensa camada de sal, atingindo espessuras de até 2.000m em determinadas áreas da costa. A distância entre a superfície do mar e os reservatórios de petróleo abaixo da camada de sal pode chegar a mais de 7 mil metros de profundidade, visto seguir na Figura 4 (PETROBRAS, 2009)⁵.

Figura 4 - Pré-sal



Fonte: ANP (2009)⁶

A Petrobras se tornou responsável pelas maiores descobertas de petróleo no Brasil, localizada entre os estados de Santa Catarina e Espírito Santo, na camada pré-sal, onde se encontram grandes volumes de óleo leve, isto é, óleo com densidade de 28,5° API, baixa acidez e baixo teor de enxofre, que são características de petróleo de alta qualidade e maior valor de mercado.

Os desafios do pré-sal trouxeram grandes oportunidades de mercado para o desenvolvimento de uma nova geração de tecnologias de produção de óleo e gás em alto-mar. De acordo com a ANP (2009), a importância estratégico-econômica do pré-sal é de fornecer segurança energética para o país e blindagem quanto a eventuais crises energéticas mundiais, aumento da importância econômica e geopolítica do Brasil, fortalecimento da economia nacional, criação de novos empregos brasileiros, além de expandir os recursos para a saúde, educação, habitação, inovação e pesquisa científica e tecnológica e infraestrutura.

⁵ Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/petroleo/presal/> > Acesso em: 23 fev. 2013.

⁶ Disponível em: < http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/pre_sal/marcoregulatorio.pdf >. Acesso em 19 fev. 2013.

Entretanto, as fases de exploração e produção de petróleo, apresentam riscos e impactos ambientais. Sendo um dos maiores riscos a possibilidade de vazamentos de petróleo, pois a infraestrutura para contenção desses vazamentos ainda é deficitária, apesar dos esforços realizados pela Petrobras em parceria com as outras grandes empresas.

2.1.5 A Indústria do Petróleo

Segundo Gomes (2002), a localização, produção, transporte, processamento e distribuição dos hidrocarbonetos existentes nos poros e canais de uma rocha reservatório, que pertence a um determinado campo petrolífero, estabelecem os cinco segmentos básicos da indústria do petróleo, (Figura 5).

O primeiro segmento é a Exploração, onde se reconstrói a história geológica de uma área através da observação de rochas e formação rochosas. O segundo é a Exploração, nesta fase engloba técnicas de desenvolvimento e produção de reservas comprovadas. O terceiro é o transporte, pelo fato dos campos petrolíferos se localizarem distantes uns dos outros, é necessário o transporte da produção através de embarcações, caminhões, vagões, ou tubulações (oleodutos e gasodutos). O quarto é o refino, pois este é responsável pelo processamento da mistura de hidrocarbonetos provenientes da rocha reservatório, para a obtenção dos componentes que serão utilizados nas mais diversas aplicações (derivados). E o quinto é a distribuição, responsável pela comercialização dos produtos finais com as distribuidoras que se encarregarão de oferecê-los ao consumidor final.

Figura 5 - Segmentos básicos da indústria do petróleo



Fonte: Adaptado de GOMES (2002)

2.1.6 Produção *Upstream*

De acordo com Gonçalves (2009), a produção *upstream* envolve o desenvolvimento das acumulações de óleo e gás descobertas durante a fase de exploração de um campo petrolífero, bem como a área de exploração. Esta pode ser dividida em quatro áreas básicas de atuação, a saber: Engenharia de reservatórios, Perfuração, Completação e Produção.

A engenharia de reservatórios determina as propriedades petrofísica das rochas reservatórios e das propriedades dos fluidos da formação produtora de óleo e gás, estima as reservas, simula e prever o comportamento de óleo e gás e cria métodos de recuperação.

A perfuração consiste nas atividades relacionadas ao projeto de perfuração do poço que faz comunicação com a superfície. O projeto do poço determina as várias fases de perfuração, envolvendo a seleção técnica apropriada, do tipo de sonda, da unidade de perfuração, dos vários equipamentos e dos fluidos de perfuração.

A completção trata da preparação do poço para a produção, envolvendo técnicas de isolamento das zonas produtoras e testes de vazão e pressão do poço, conhecendo o potencial produtor do reservatório e aumentando a produtividade do poço.

A produção envolve o projeto, monitoração e garantia do fluxo de óleo/gás, do reservatório até a superfície, na planta de superfície, e o envio para os sistemas externos de transporte, ou armazenamento.

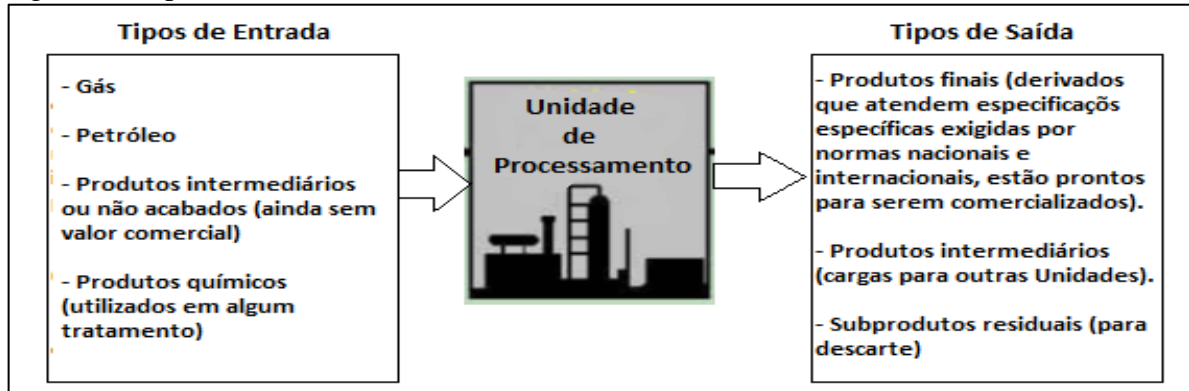
2.1.7 Produção *Downstream*

Segundo Goberstein (2007), a produção *downstream* está associada ao processo de refino do petróleo juntamente com a sua logística de distribuição. Assim, depois de extraído e tratado no campo de produção, o petróleo segue para a refinaria, para ser transformado na série de derivados (vistos anteriormente), que vão atender as necessidades de algum mercado.

Os derivados de petróleo não são gerados de uma só vez em um único local na refinaria. Na verdade, diversas frações de petróleo são obtidas em diversas unidades e armazenadas separadamente. Podendo uma fração de petróleo saída de uma unidade de processamento, ser utilizada como alimentação em outra unidade.

Alguns produtos finais já são produzidos na saída da primeira Unidade, enquanto outros só após o processamento de várias Unidades, (Figura 6). Assim, toda Unidade realiza algum processamento sobre uma ou mais entradas, gerando uma ou mais saídas.

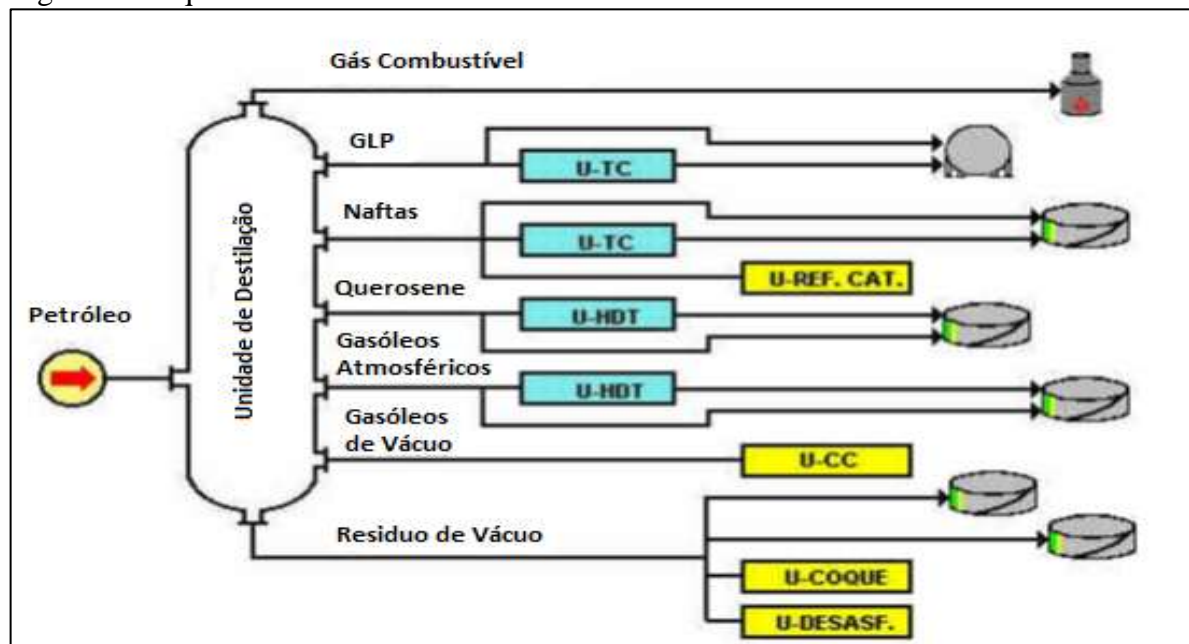
Figura 6 - Tipos de entradas e saídas da Unidade de Processamento



Fonte: Adaptado de GOMES (2002)

Deste modo, cada refinaria é projetada e construída de acordo com o tipo de petróleo a ser processado e as necessidades de um mercado. Para isto, deve-se haver um Esquema de Refino (Figura 7), onde irá limitar e definir o tipo e a qualidade dos produtos da refinaria.

Figura 7 - Esquema de refino



Fonte: Adaptado de GOMES (2002)

Por se tratar de um produto de origem natural, o petróleo que é fornecido a uma refinaria pode sofrer variações na sua composição tanto em decorrência da origem do fornecedor, como em decorrência de mudanças na composição do óleo extraído de um dado reservatório. Portanto, é importante que as refinarias possuam certo grau de flexibilidade, isto é, uma capacidade de reprogramação dinâmica na operação do seu esquema de refino para se adaptar a novos tipos de óleo, necessidade mercado e demandas ambientais.

A produção de petróleo e gás natural no Brasil para 2011, foi de aproximadamente 2.214 Mbb/d (mil barris por dia) e 71 MMm³/d (milhões de m³ por dia), respectivamente, totalizando em torno de 2.663 Mboe/d (mil barris de óleo equivalente por dia), visto na Tabela 4. Esses passam a ser os novos recordes de produção de petróleo e gás natural no Brasil, superando respectivamente, as produções de novembro de 2011 e dezembro de 2010 (ANP, 2011).

Tabela 4 - Distribuições da produção nacional de petróleo e gás natural por operador

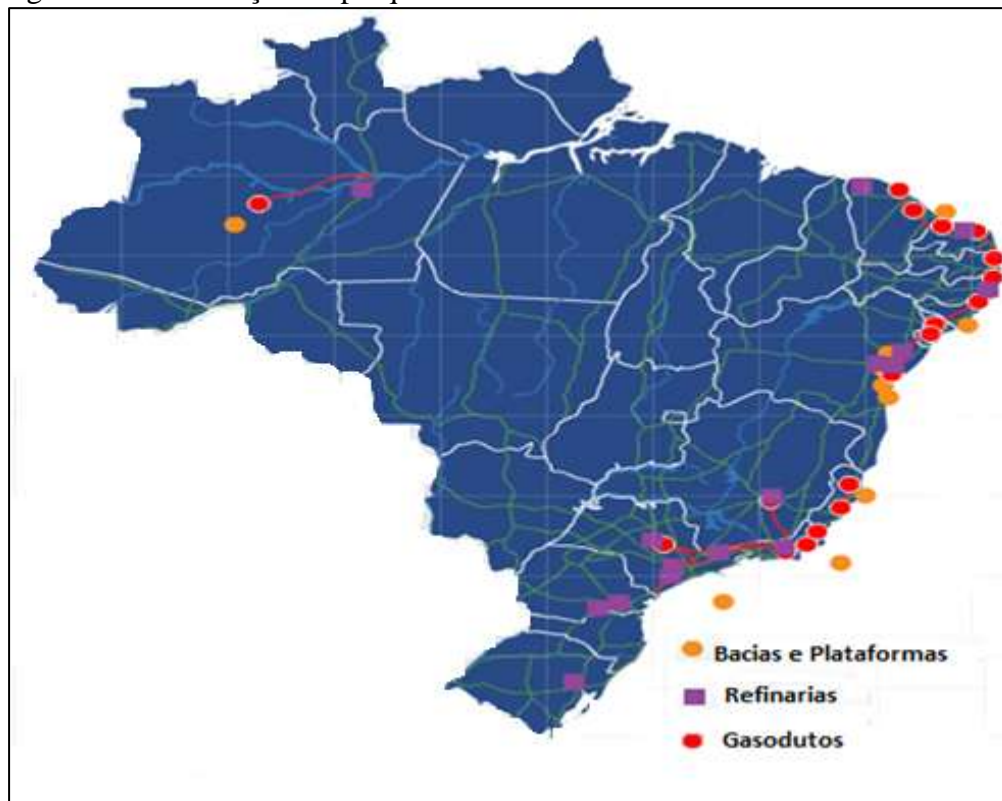
Nº	Operador	Petróleo (bbl/d)	Gás Natural (Mm ³ /d)	Produção Total (boe/d)
1	Petrobras	1.992.308	69.255,89	2.427.928
2	Shell Brasil	74.752	1.091,36	81.617
3	Chevron Frade	62.300	787,63	67.254
4	Statoil Brasil	62.996	112,92	63.707
5	BP Energy	18.365	41,39	18.626
6	Sonangol Starfish	915	8,88	971
7	Petrosynergy	647	14,32	737
8	Gran Tierra	460	8,19	512
9	Partex Brasil	350	0,11	350
10	W. Petróleo	179	0,83	184
11	Petrogal Brasil	178	0,57	182
12	Panergy	0	27,24	171
13	Recôncavo E&P	113	0,39	115
14	UP Petróleo Brasil	70	1,17	78
15	Alvorada	70	0,77	75
16	UTC Engenharia	52	3,52	75
17	Severo Villares	39	1,14	46
18	UTC Óleo e Gás	37	0,89	43
19	Silver Marlin	26	0,84	32
20	Central Resources	30	0,07	31
21	Vipetro	16	0,06	16
22	Cheim	8	0,27	10
23	Egesa	7	0,01	7
24	Nord	6	0,004	6
25	Genesis 2000	2	0,003	2
Total geral		2.213.929	71.358	2.662.774

Fonte: ANP/SDP/SIGEP (2011)⁷

⁷ Disponível em: < www.anp.gov.br/?dw=59164 >. Acesso em: 23 mar. 2013.

A Figura 8 mostra a distribuição do parque de refino, onde se localiza as bacias e plataformas petrolíferas, refinarias e gasodutos de petróleo no Brasil.

Figura 8 - Distribuição do parque de refino no Brasil



Fonte: Adaptado de PETROBRAS (2013)⁸

Para Goberstein (2007), a classificação dos processos existentes em uma refinaria é dividida em quatro grandes grupos, a saber: Processos de Separação, Processos de Conversão, Processos de Tratamento e Processos Auxiliares.

Os Processos de Separação são de natureza física por ação de energia (modificando a temperatura e/ou pressão), ou de massa (relacionando solubilidade a solventes). Tem por objetivo processar uma fração prévia no sentido de retirar um grupo específico de componentes. Assim a natureza das moléculas e os produtos resultantes não são alterados, se misturados reconstituírem a carga original, exceto no caso de contaminações ou perdas. Na PETROBRAS encontramos os seguintes processos de separação: Destilação Atmosférica, Destilação à Vácuo, Extração de Aromáticos, Desasfaltação a Propano, entre outros.

Os Processos de Conversão tem por objetivo alterar a composição química de uma fração, visando melhorar sua qualidade, valorizando-a, ou transformando-as em frações de baixo valor comercial em outras de maior valor. Isto é feito por ação conjunta de temperatura,

⁸ Disponível em: < <http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/principais-operacoes/> >. Acesso em: 23 mar. 2013

pressão e, geralmente, catalisadores. Assim temos dois subgrupos que são os processos térmicos e os processos catalíticos, podendo ser encontrados no Brasil o Craqueamento Térmico, Viscorredução, Craqueamento Retardado, Craqueamento Catalítico, entre outros.

Os Processos de Tratamento tem por finalidade eliminar as impurezas que se encontram nas frações e estabilizar quimicamente o produto acabado. Dentre as impurezas, encontram-se os compostos de enxofre e nitrogênio que submetem as frações propriedades indesejáveis como corrosividade, acidez, odor desagradável, formação de compostos poluentes, alteração de cor, etc. A quantidade de impurezas cresce proporcionalmente na medida em que os cortes vão se tornando mais pesados, dificultando muito sua remoção. Este processo pode ser classificado em duas categorias, a saber: Tratamento Cáustico e Hidroprocessamento.

Os Processos Auxiliares são destinados a fornecer insumos a operação dos outros processos anteriormente mencionados, ou tratar rejeitos desses mesmos processos. Incluem no grupo de Geração de Hidrogênio, a Recuperação de Enxofre e as Utilidades (vapor, água, energia, ar comprimido, distribuição de gás e óleo combustível, tratamento de efluentes e tocha ou flare) (GOBERSTEIN, 2007).

2.1.8 Tipos de Gasolina

Para Cruz (2003), existem quatro tipos de gasolina onde são definidos e especificados pelo Departamento Nacional de Combustíveis (DNC), para serem utilizados em automóveis, embarcações aquáticas, motos, aviões, entre outras, sendo estes do Tipo A, Tipo A-Premium, Tipo C e Tipo C-Premium.

A gasolina automotiva do Tipo A é produzida pelas refinarias e entregue diretamente às companhias distribuidoras, esta constitui-se basicamente de uma mistura de naftas em proporção prevista na respectiva especificação. Este produto é à base da gasolina disponível nos postos revendedores.

A gasolina do Tipo A-Premium é uma gasolina que apresenta uma formulação especial, esta é obtida a partir da mistura de naftas de elevada octanagem (nafta craqueada, nafta alquilada, nafta reformada) e que fornecem ao produto resistência à detonação. A gasolina tipo A comum que é disponibilizada para os consumidores finais nos postos de revenda, constitui a base da gasolina C-Premium.

A gasolina do Tipo C é a comum, com octanagem no mínimo igual a 80 (MON) que se encontra disponível no mercado sendo comercializada nos postos de revendedores e

utilizada em automóveis, etc. O teor de álcool na gasolina final corresponde à faixa de 21 a 25 % em volume, conforme prevê a legislação atual.

A gasolina do Tipo C-PREMIUM é elaborada pela adição de 21 a 25% de álcool anidro à gasolina Tipo A-Premium. O objetivo principal de seu desenvolvimento foi atender aos veículos nacionais e importados de altas taxas de compressão e alto desempenho conforme a recomendação dos fabricantes. A elevada resistência à detonação da gasolina-Premium, é expressa pelo índice antidetonante (IAD). As principais características que diferenciam a gasolina Tipo C-Premium da gasolina C-Comum são: Maior índice antidetonante (C-Premium - 91 no mínimo; C-Comum - 87 em média); menor teor de enxofre: (C-Premium - 0,10% no máximo; comum 0,20% no máximo)

Ainda para Cruz (2003), o método *Blending* é o processo de mistura e combinação de frações de hidrocarbonetos, aditivos e outros componentes para produzir produtos finais com propriedades específicas.

Assim, devido as diferentes composições dos componentes de gasolina, para obtenção da gasolina final, é necessário proceder sua mistura, isto é, o *Blending*. O processo físico do *Blending* de componentes é simples, porém a escolha dos componentes a usar, bem como a percentagem de cada um na mistura é mais complexa. A operação é feita por bombagem simultânea de todos os componentes em que cada propriedade, de cada componente, é uma variável e o seu efeito na mistura final é considerável. Portanto, é fundamental conhecer as características de cada componente antes de proceder ao seu *Blending* (GONÇALVES, 2008 apud PASADAKIS, 2006).

2.2 TEORIA DE PROGRAMAÇÃO LINEAR

2.2.1 Modelagem do Problema

Para Lachtermacher (2002), a resolução de um problema apresenta etapas consecutivas que podem ser repetidas dependendo da situação (Figura 9), a saber:

a) Converter Dados em Informações Significativas

Transformar dados brutos (números e fatos) através de seu armazenamento de forma organizada em dados. Os Sistemas de Informações Gerenciais (SIG) serão responsáveis pela transformação destes dados em Informações Gerenciais que podem ser utilizadas no processo de tomada de decisão através dos Sistemas de Apoio à Decisão. Mais recentemente estas decisões podem ser acumuladas em bases de conhecimento através de Sistemas Especialistas.

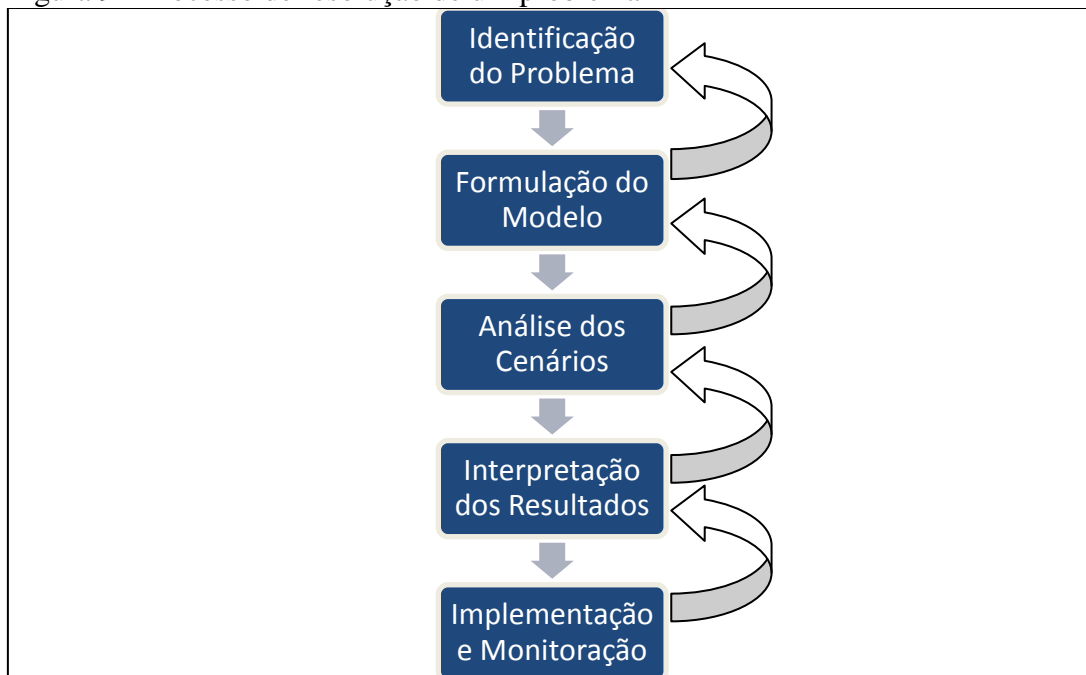
b) Apoiar o Processo de Tomada de Decisão de Formas Transferíveis e Independentes

Através dos Sistemas de Apoio à Decisão dar suporte as decisões para que estas sejam independentes do decisor e assegurar que o processo de tomada de decisão seja claro e transparente.

c) Criar Sistemas Computacionais Úteis para o Usuário Não Técnicos

Facilitar, através de sistemas de fácil utilização, os processos de tomada de decisão operacional, tácito e estratégico.

Figura 9 - Processo de resolução de um problema



Fonte: LACHTERMACHER (2002)

2.2.2 Problema de Programação Linear

Para Lachtermacher (2009), um problema de programação linear (PPL) é um problema de programação matemática em que as funções-objetivo e as restrições são lineares, isto é:

$$\text{Otimizar } Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n)$$

Sujeito a:

$$\left. \begin{array}{l} g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ \vdots \\ g_m(x_1, x_2, \dots, x_n) \end{array} \right\} \begin{array}{l} \geq \\ = \\ \leq \end{array} \left\{ \begin{array}{l} b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_m \end{array} \right.$$

onde:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

$$g_i(x_1, x_2, \dots, x_n) = a_{i1}x_1 + a_{i2}x_2 + \dots + a_{in}x_n$$

com $i = 1, \dots, m$

n é o número de variáveis do problema

m é o número de restrições do problema

Este problema pode ser representado na forma reduzida

$$\text{Otimizar } z = \sum_{j=1}^n c_j x_j$$

Sujeito a:

$$\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \begin{pmatrix} \geq \\ = \\ \leq \end{pmatrix} b_i$$

$$x_j \geq 0$$

Uma solução para este tipo de problema é qualquer especificação de valores para as variáveis de decisão, independente de se tratar de uma escolha desejável ou permissível.

Já uma solução é dita viável no caso em que todas as restrições são satisfeitas; e é dita solução ótima se tem o valor mais favorável entre todas as soluções viáveis.

2.2.2.1 Operações

Segundo Goldberg (2005), um (PPL) pode, sem perda de generalidade, ser reescrito utilizando algumas operações elementares.

- Operação 1: Mudança no critério de otimização

$$\begin{cases} \text{MAX } f(x) = \text{MIN } -f(x) \\ \text{MIN } f(x) = \text{MAX } -f(x) \end{cases}$$

- Operação 2: Transformação de uma variável livre ($x_j \in \mathfrak{R}$) em uma variável não negativa

$$\{x_n = x_n^1 - x_n^2, \text{ com } x_n^1, x_n^2 \geq 0$$

- Operação 3: Transformação de desigualdades em igualdades, com a utilização de variáveis de folga. Temos dois casos a considerar:

Se a restrição é \leq então soma uma variável de folga capaz de “completar” a desigualdade

$$\{x_1 + x_2 + \dots + x_n \leq b = x_1 + x_2 + \dots + x_n + x_{n+1} = b$$

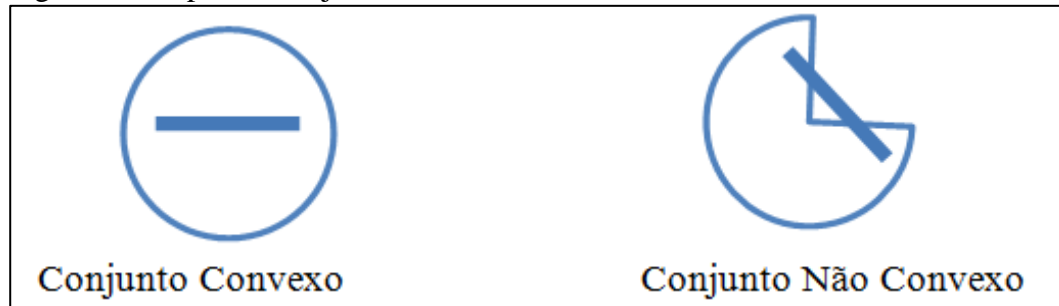
Se a restrição é \geq , então

$$\{x_1 + x_2 + \dots + x_n \geq b = x_1 + x_2 + \dots + x_n - x_{n+1} = b$$

2.2.2.2 Teoremas de Programação Linear

De acordo com Lachtermacher (2002), um conjunto convexo é um conjunto em que dados dois pontos quaisquer internos ao conjunto, é possível uni-los através de um segmento de reta também interno ao conjunto, visto a seguir na Figura 10. O espaço de soluções viáveis de um PPL é um polígono convexo.

Figura 10 - Tipos de conjunto



Fonte: Adaptado de LACHTERMACHER (2002)

Os teoremas a seguir dão embasamento ao método *Simplex* que será visto mais adiante.

Teorema 1: O conjunto de todas as soluções viáveis de um modelo de programação linear é um conjunto convexo.

Teorema 2: Toda solução compatível básica (solução óbvia) do sistema de equações lineares (dicionário) de um (LP) é um ponto extremo do conjunto de soluções viáveis

Teorema 3: Se uma função-objetivo possui um único ponto ótimo finito, então este é um ponto extremo do conjunto convexo de soluções viáveis.

Teorema 4: Se a função-objetivo tiver valor ótimo em mais de um ponto, então serão pelo menos dois extremos do conjunto convexo e para qualquer combinação linear (convexa) entre estes pontos, ou seja, a aresta do polígono formado pelo espaço de soluções.

2.2.3 Simplex

Para Lachtermacher (2009), o algoritmo *Simplex* descreve uma sequência de passos para a solução de sistemas de equações lineares sujeito a uma função objetivo. Basicamente, ele dispõe sobre três situações, a saber:

- a) O método de inversão da matriz básica $m \times m$, deduzida a partir de A, uma matriz de restrições $m \times n$.

- b) As condições de troca de variáveis dentro da matriz básica, para que exista garantia de melhoria da solução ao longo do algoritmo.
- c) As regras de parada do algoritmo e a interpretação dessa situação final.

2.2.4 Teoria da Dualidade e Análise de Sensibilidade em Programação Linear

De maneira genérica e sem perda de generalidade, podemos definir o problema *Primal* (P) da seguinte maneira:

$$MAXZ = C_1x_1 + C_2x_2 + \dots + C_nx_n \quad (1)$$

S. a.

$$\begin{cases} a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n}x_n \leq b_1 \\ a_{21}x_1 + a_{22}x_2 + \dots + a_{2n}x_n \leq b_2 \\ \vdots \\ a_{m1}x_1 + a_{m2}x_2 + \dots + a_{mn}x_n \leq b_m \\ x_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, n \end{cases}$$

Segundo Goldberg (2005), o *Dual* (D) é um modelo que preserva as seguintes condições:

- Possuir função objetivo simétrico ao primal definido em (1), isto é, minimização;
- Possuem simetria na descrição das restrições, ou seja, se o *primal* possui restrições do tipo “ \leq ”, então o dual terá restrições do tipo “ \geq ”;
- Os termos independentes no *primal* surgem como os coeficientes da função objetivo no dual e vice-versa;
- O número de restrições do *primal* é o número de variáveis do dual e vice-versa;
- A matriz de restrições do *primal* é a transposta da matriz restrição do dual e vice-versa.

A partir destas considerações, podemos definir o *Dual* associando a cada restrição i do *Primal*, uma variável y_m . Assim, o dual é escrito da seguinte forma:

$$MIND = b_1y_1 + b_2y_2 + \dots + b_my_m$$

S. a.

$$\begin{cases} a_{11}y_1 + a_{12}y_2 + \dots + a_{m1}y_m \leq c_1 \\ a_{21}y_1 + a_{22}y_2 + \dots + a_{m2}y_m \leq c_2 \\ \vdots \\ a_{mn}y_1 + a_{mn}y_2 + \dots + a_{mn}y_m \leq c_m \end{cases}$$

Tais modelos podem ser escritos de forma mais compacta da seguinte maneira

$$\begin{aligned}
 \text{Primal: } \quad & \text{MAX } Z = \sum_{j=1}^n C_j X_j \\
 \text{S. a. } \quad & \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i = 1, \dots, m) \\
 & n_j \geq 0, \quad (j = 1, \dots, n) \\
 \text{Dual: } \quad & \text{MIN } D = \sum_{i=1}^m b_i y_i \\
 \text{S. a. } \quad & \sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \geq c_j \quad (j = 1, \dots, n) \\
 & y_i \geq 0 \quad (i = 1, \dots, m)
 \end{aligned}$$

2.2.4.1 Teoremas de Dualidade

Para Lachtermacher (2002), é grande a interrelação existente entre o par *Primal-Dual* como veremos nos teoremas a seguir:

1. O dual do dual é o primal

$$\text{Sendo (P) } \text{MAX } Z \sum_{j=1}^n C_j X_j \tag{2}$$

$$\text{S. a. } \left\{ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \leq b_i \quad (i = 1, \dots, m) \\ x_j \geq 0 \end{array} \right.$$

O *dual* associado seria

$$(D) = \text{MIN } D = \sum_{i=1}^m b_i y_i \tag{3}$$

$$\text{S. a. } \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^m a_{ji} y_i \geq c_j \quad (j = 1, \dots, n) \\ y_i \geq 0 \end{array} \right.$$

Ao calcularmos novamente o *dual*, obtemos exatamente o modelo (P)

2. Se a restrição k do *primal* é de igualdade, então a variável y_k do *dual* é sem restrição de sinal;
3. Se a variável k do *primal* é sem restrição de sinal, então a restrição k do *dual* é uma igualdade.

Já o Teorema das Folgas complementares relaciona as soluções ótimas do *primal* e do *dual*.

Se ambos os problemas tiverem soluções compatíveis finitas, então de acordo com (2) e (3) temos: $Z \leq D$ para qualquer solução compatível do *primal* e do *dual* (LACHTERMACHER apud HILLER; LIBERMAN, 1995).

Seja

$$Z^* = \sum_{j=1}^n c_j x_j^* \text{ e } D^* = \sum_{i=1}^m b_i y_i^*$$

Onde $x^* = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ é uma solução viável do *primal* e $y^* = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ é uma solução viável do *dual*.

Da restrição $\sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \geq c_j$, temos

$$Z = \sum_{j=1}^n c_j x_j \leq \sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m a_{ij} y_i \right) x_j$$

Mas

$$\sum_{i,j} a_{ij} y_i x_j = \sum y_i \left(\sum a_{ij} x_j \right) \leq \sum b_i y_i = D$$

Logo

$$Z \leq \sum_{i=1}^m y_i \left(\sum_{j=1}^n a_{ij} x_j \right) \leq D$$

Se ambos os problemas tiverem soluções compatíveis finitas, então existe uma solução ótima finita para cada problema tal que $Z^* = D^*$.

Pela definição, o valor de $Z^* \geq Z$ e $D^* \leq D$, ou seja, a função Z do *primal* toma valores cada vez maiores até atingir Z^* e a função D toma valores cada vez menores até atingir D^* .

2.2.4.2 Teorema das Folgas Complementares

De acordo com Goldbarg (2005), dado um par de programas duais, uma condição necessária e suficiente para que as soluções Z^* e D^* sejam ótimos é que se verifiquem as seguintes relações de complementaridade de folga:

$$\begin{cases} y(Ax - b) = 0 \\ (c - yA)x = 0 \end{cases}$$

A utilização de modelos matemáticos para a resolução de problemas, é uma forma de prever acontecimento e, desta forma, programar um modelo compatível ao fato esperado.

Como a solução ótima de ambos os modelos é compatível, podemos calcular tanto o *primal* quanto o *dual* (o que for mais simples).

2.2.4.3 Análise de Sensibilidade

Quando resolvemos um problema de programação linear, estamos indicando a forma ótima de se fazer determinado processo, seja minimizando custos ou tempos de produção, seja maximizando lucros.

Dessa forma, é extrema importância à definição dos parâmetros e coeficientes do problema, pois um erro de modelagem pode significar que a solução apresentada não representa uma solução ótima para o problema real, podendo levar a grandes prejuízos se for posta em prática.

Como a definição dos parâmetros é extremamente complexa, devemos analisar a consistência do resultado de um problema resolvido, através da análise de certos parâmetros e qual o grau de influência de cada um deles no resultado final.

Lachtermacher (2009) sugere que para uma análise de sensibilidade aplicada a um problema de otimização, deve-se procurar respostas a três perguntas principais, que são:

- 1) Qual o efeito de uma mudança num coeficiente da função objetivo?
- 2) Qual o efeito na mudança numa constante de uma restrição?
- 3) Qual o efeito de uma mudança no coeficiente de uma restrição?

Vários softwares trazem ferramentas que auxiliam esta análise.

- 1) Quando alteramos um coeficiente da função objetivo de um problema de programação linear, estamos alterando também o coeficiente angular da reta que define a mesma. Dependendo da mudança que seja feita, a solução ótima continuará a mesma ou não. Obviamente, se a alteração tornar seus valores mais desejáveis, estes nunca sairão da base. Mas, caso a alteração seja inversa, devemos saber qual a máxima alteração permissível para que a variável não altere a solução do problema.
- 2) A alteração do valor constante da restrição, pode ou não refletir uma mudança no ótimo do problema, pois acarreta uma modificação no espaço de soluções viáveis. De forma geral, devemos analisar se a restrição possui folga ou não, e se a modificação vai alterar esta folga.
- 3) Já o terceiro caso diz respeito à mudança do coeficiente na restrição, o que acaba por modificar a inclinação da reta que compõe a restrição. Geralmente é analisado “*Shadow Price*”, que é a alteração do ótimo mediante a alteração de uma unidade no coeficiente da restrição.

Em resumo, a análise de sensibilidade é de extrema importância para verificarmos o grau de confiabilidade do resultado obtido.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL

Nesse trabalho foram apresentados dois problemas relacionados à exploração de petróleo, sendo o primeiro referente à produção de três tipos de gasolina com diferentes tipos de composição de petróleo e o segundo relativo à otimização do fluxo de dois tipos de óleo em uma determinada refinaria. Estes problemas são encontrados em GOLDBARG (2005).

Nos problemas considerados, nossa contribuição seria dada no sentido de revisar o modelo de cada um deles, corrigindo eventuais distorções existentes. Além de rever a modelagem, adaptar o modelo para ser útil no *solver*, resolvê-los através de um *solver*, analisar as soluções e fazer uma análise de sensibilidade.

Para resolver os problemas de otimização teve-se o auxílio computacional, que possuem as configurações detalhadas citadas na tabela a seguir:

Tabela 5 - Dados referentes ao computador utilizado para resolução dos problemas

Características Gerais	
Fabricante	Positivo
Modelo	Sim + 7680
Processador	Intel (R) Core (TM) i5 2410M CPU @ 2.30GHz 2.30 GHz
Memória RAM	4GB DDR3
HD	500GB

Fonte: Manual do Fabricante (2009)

No computador foi utilizado o sistema operacional Windows 7 64 bits Ultimate de fabricação da Microsoft Corporation, características do sistema operacional com um número maior de detalhes, podem ser encontradas na tabela a seguir:

Tabela 6 - Dados referentes ao sistema operacional utilizado nos problemas

Características Gerais	
Fabricante	Microsoft Corporation
Modelo	Windows 7 Ultimate 64 Bits
Ano de Fabricação	2009

Fonte: Manual do Fabricante (2009)

O software utilizado para a resolução dos problemas foi o *LINDO Systems (Linear, Interactive, and Discrete Optimizer)*, que está disponível para downloads no site <http://www.lindo.com/>, onde se encontra todas as informações do *software*, manuais e características das versões. Para a implantação desse trabalho foi utilizado o *software LINDO* da versão 6.1, para Windows 64 bits.

Para otimizar o problema o *LINDO* recebe o modelo de programação linear em sua formulação matemática e utiliza o *Simplex* para efetuar os cálculos.

3.2 PROBLEMAS

3.2.1 O Problema da Mistura de Petróleo

Uma refinaria processa vários tipos de petróleo. Cada tipo de petróleo possui uma planilha de custos diferente, expressando condições de transporte e preços na origem. Por outro lado, cada tipo de petróleo representa uma configuração diferente de subprodutos para a gasolina. Na medida em que um certo tipo de petróleo é utilizado na produção da gasolina, é possível a programação das condições de octanagem e outros requisitos. Esses requisitos implicam na classificação do tipo de gasolina obtida.

Supondo que a refinaria trabalhe com uma linha de quatro tipos diferentes de petróleo e deseje produzir as gasolinas amarela, azul e superazul, programar a mistura dos tipos de petróleo atendendo às condições que se seguem nas tabelas a seguir:

Tabela 7 - Quantidade disponível de petróleo

Tipo de Petróleo	Quantidade Máxima Disponível (barril/dia)	Custos por Barril/dia (R\$)
1	3500	19
2	2200	24
3	4200	20
4	1800	27

Fonte: GOLDBARG (2005)

Os tipos de Gasolina, percentual de matéria prima e custo estão na tabela 5.

Tabela 8 - Percentuais para limites de qualidade das gasolinas

Tipo de Gasolina	Especificação	Preço de Venda (R\$ /Barril)
Superazul	Não mais que 30% de 1 Não menos que 40% de 2 Não mais que 50% de 3	35
Azul	Não mais que 30% de 1 Não menos que 10% de 2	28
Amarela	Não mais que 70% de 1	22

Fonte: GOLDBARG (2005)

Considere para definição do problema:

Variáveis de decisão do modelo

Onde x_{ij} = número de barris de petróleo do tipo j , ($j=1,2,3,4$), que serão destinados à produção da gasolina i , ($i=A$ - gasolina Amarela, Z - gasolina aZul, S - gasolina Superazul).

Função Objetivo

$$Z = \text{MAX} \{ f(x) = 22(x_{A1} + x_{A2} + x_{A3} + x_{A4}) + 28(x_{Z1} + x_{Z2} + x_{Z3} + x_{Z4}) + 35(x_{S1} + x_{S2} + x_{S3} + x_{S4}) - 19(x_{A1} + x_{Z1} + x_{S1}) - 24(x_{A2} + x_{Z2} + x_{S2}) - 20(x_{A3} + x_{Z3} + x_{S3}) - 27(x_{A4} + x_{Z4} + x_{S4}) \}$$

Igual à soma do lucro resultante da venda dos diversos tipos de gasolina, abatidos os custos dos diversos tipos de petróleo utilizados.

Restrições associadas à quantidade de petróleo disponível:

- Tipo 1
 $x_{A1} + x_{Z1} + x_{S1} \leq 3500$
- Tipo 2
 $x_{A2} + x_{Z2} + x_{S2} \leq 2200$
- Tipo 3
 $x_{A3} + x_{Z3} + x_{S3} \leq 4200$
- Tipo 4
 $x_{A4} + x_{Z4} + x_{S4} \leq 1800$

Restrições associadas às especificações da mistura:

- Para a gasolina Superazul
 $x_{S1} \leq 0,3(x_{S1} + x_{S2} + x_{S3} + x_{S4})$
 $x_{S2} \geq 0,4(x_{S1} + x_{S2} + x_{S3} + x_{S4})$
 $x_{S3} \geq 0,5(x_{S1} + x_{S2} + x_{S3} + x_{S4})$
- Para a gasolina aZul
 $x_{Z1} \leq 0,3(x_{Z1} + x_{Z2} + x_{Z3} + x_{Z4})$
 $x_{Z1} \geq 0,1(x_{Z1} + x_{Z2} + x_{Z3} + x_{Z4})$
- Para a gasolina Amarela
 $x_{A1} \leq 0,7(x_{A1} + x_{A2} + x_{A3} + x_{A4})$

Restrições de não negatividade

$$x_{A1} \geq 0, x_{A2} \geq 0, x_{A3} \geq 0, x_{A4} \geq 0$$

$$x_{Z1} \geq 0, x_{Z2} \geq 0, x_{Z3} \geq 0, x_{Z4} \geq 0$$

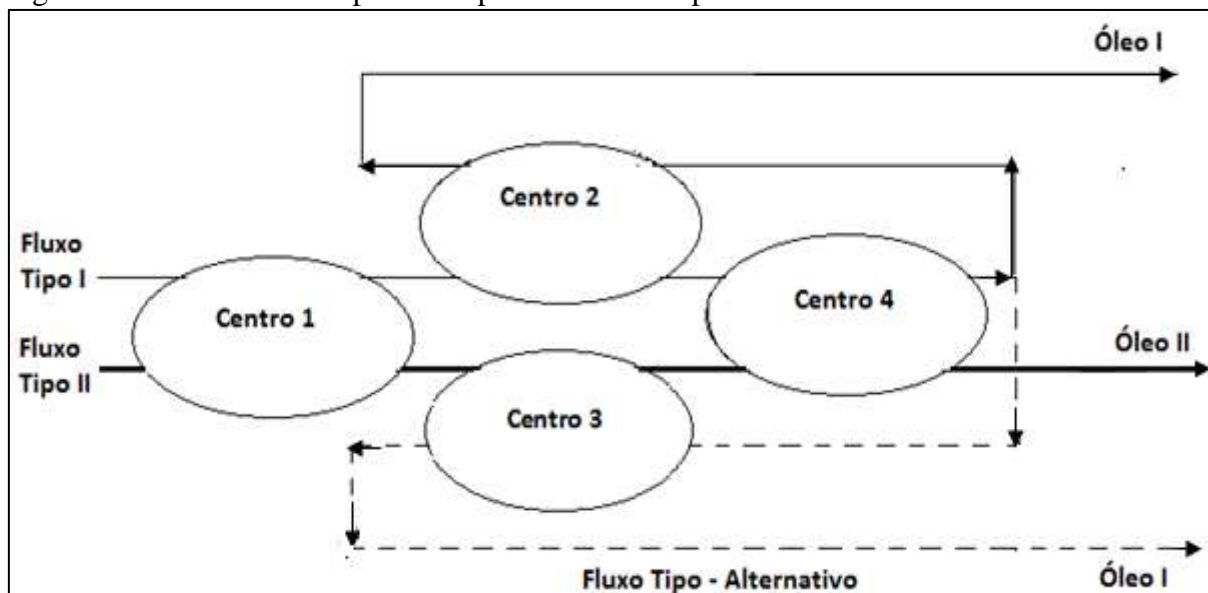
$$x_{S1} \geq 0, x_{S2} \geq 0, x_{S3} \geq 0, x_{S4} \geq 0$$

3.2.2 O Problema do Fluxo de Petróleo na Refinaria

Uma refinaria produz dois tipos de óleo, I e II, que passam por refino em quatro centros de processamento, conforme a Figura 10. As linhas cheias do gráfico indicam o fluxo normal de refino para os óleos do tipo I e II. Havendo capacidade ociosa, é possível processar o tipo de óleo I através do esquema alternativo representado pelas linhas tracejadas.

No esquema de produção, sabe-se que a distribuição custo \times capacidade de produção é:

Figura 11 - Fluxo de óleos passando pelos centros de processamento



Fonte: GOLDBARG (2005)

Tabela 9 - Custos e capacidades de produção

Produto	Centro	Capacidade l/h	%de Recuperação	Custo \$/h
I	1	300	90	150
	2	450	95	200
	4	250	85	180
	2	400	80	220
	3	350	75	250
II	1	500	90	300
	3	480	85	250
	4	400	80	240

Fonte: GOLDBARG (2005)

Por outro lado, as relações econômicas que regem a função lucro são:

Tabela 10 - Custos/Preços dos produtos

Produto	Custo da Matéria-prima (\$/l)	Preço de Venda (\$/l)	Venda Diária Máxima (l)
I	5	20	1.700
II	6	18	1.500

Fonte: GOLDBARG (2005)

Os centros 1 e 4 operam 16 horas por dia. Os centros 2 e 3 operam 12 horas por dia. A refinaria possui a capacidade de transportar somente 2.500 l/dia pois seu oleoduto está em manutenção. Formulando matematicamente o problema de otimizar a produção dos dois tipos de óleo, temos:

Variáveis de decisão do modelo

Onde $x_i \equiv$ número de litros de óleo do tipo i , ($i=I$, para o óleo do tipo I, II, para o óleo do tipo II) refinados diariamente. Nesse caso, vamos necessitar distinguir na variável de decisão o esquema de refino. Então, podemos desdobrar a variável x_i em uma soma de duas parcelas, a saber: a parcela do fluxo tipo I normal, x_i^N , e a parcela obtida via fluxo tipo I alternativo, x_i^A :

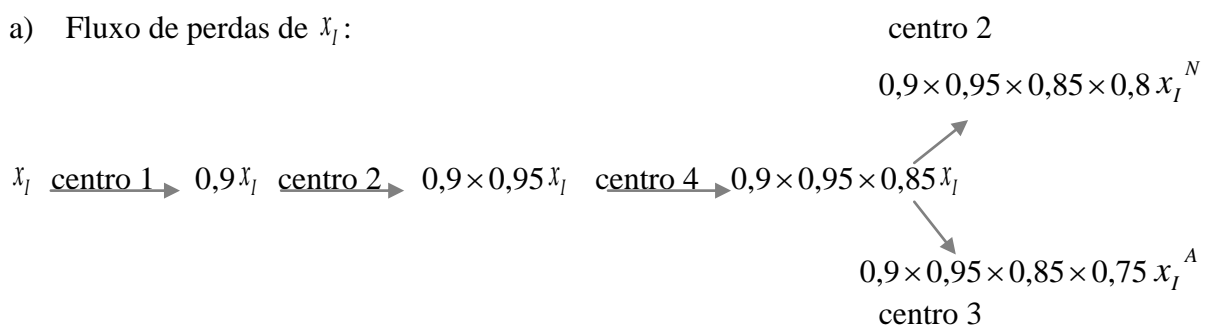
$$x_i = x_i^N + x_i^A$$

Formulação das restrições tecnológicas

Neste problema é mais interessante nos debruçarmos inicialmente sobre as restrições tecnológicas. A função objetivo dependerá dos coeficientes de aproveitamento de refino que serão calculados na ocasião da organização das restrições tecnológicas.

Inicialmente é indispensável perceber que na medida em que o petróleo vai sendo refinado em cada centro, existe uma perda percentual na matéria-prima. Essa perda é acumulada em cada circuito. A seguir representamos o fluxo de perda de x_I e x_{II} .

a) Fluxo de perdas de x_I :



b) Fluxo de perdas de x_{II} :

$$x_{II} \xrightarrow{\text{centro 1}} 0,9 x_{II} \xrightarrow{\text{centro 3}} 0,9 \times 0,85 x_{II} \xrightarrow{\text{centro 4}} 0,9 \times 0,85 \times 0,80 x_{II}$$

c) Restrições associadas à capacidade de processamento

Centro 1:

$$\frac{x_I^A}{300} + \frac{x_I^N}{300} + \frac{x_{II}}{500} \leq 16$$

Centro 2:

$$\frac{0,9x_I^N}{450} + \frac{0,9x_I^A}{450} + \frac{0,9 \times 0,95 \times 0,85x_I^N}{400} \leq 12$$

Centro 3:

$$\frac{0,9x_{II}}{480} + \frac{0,9 \times 0,95 \times 0,85x_I^A}{350} \leq 12$$

Centro 4:

$$\frac{0,9 \times 0,95x_I^N}{250} + \frac{0,9 \times 0,95x_I^A}{250} + \frac{0,9 \times 0,85x_{II}}{400} \leq 16$$

d) Restrições de transporte:

$$0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,8x_I^N + 0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,75x_I^A + 0,9 \times 0,85 \times 0,80x_{II} \leq 2.500$$

e) Restrições de venda:

- Óleo tipo I

$$0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,8x_I^N + 0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,75x_I^A \leq 1.700$$

- Óleo tipo II

$$0,9 \times 0,85 \times 0,80x_{II} \leq 1.500$$

f) Restrições de não negatividade

$$x_I \geq 0, x_I^N \geq 0, x_I^A \geq 0$$

g) Elaboração da função objetivo

Denominada por:

$$a_N = 0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,8$$

$$a_A = 0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,75$$

$$b = 0,9 \times 0,85 \times 0,80$$

$Z = \text{Maximizar}\{f(x) = \text{receita} - \text{despesa}\}, \text{onde}$

Receita:

$$20a_N x_I^N + 20a_A x_I^A + 18b x_{II}$$

Despesa:

- Matéria-prima

$$5x_I^N + 5x_I^A + 6x_{II}$$

- Custos operacionais

Centro 1:

$$\frac{150x_I^N}{300} + \frac{150x_I^A}{300} + \frac{300x_I^N}{500}$$

Centro 2:

$$\frac{200 \times 0,9 x_I^N}{450} + \frac{200 \times 0,9 x_I^A}{450} + \frac{220 \times 0,9 \times 0,95 \times 0,85 x_I^N}{400}$$

Centro 3:

$$\frac{250 \times 0,9 x_{II}}{480} + \frac{250 \times 0,9 \times 0,95 \times 0,85 x_I^A}{350}$$

Centro 4:

$$\frac{180 \times 0,9 \times 0,95 x_I^N}{250} + \frac{180 \times 0,9 \times 0,95 x_I^A}{250} + \frac{240 \times 0,9 \times 0,85 x_{II}}{400}$$

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 O PROBLEMA DA MISTURA DE PETRÓLEO

Este estudo consiste em avaliar a proposta da mistura de quatro tipos de matéria-prima (petróleo) na fabricação de três tipos de gasolinas (amarela, azul e superazul).

Avaliar qual será a melhor mistura que trará o maior lucro para a empresa usando o método simplex para otimização no processo de mistura.

Buscaremos uma melhor locação de recursos e assim, a partir dessa mistura maximizaremos o lucro.

Primeiramente, simplificando a Função Objetivo, temos:

$$\text{MAX } Z(x) = 3x_{A1} - 2x_{A2} + 2x_{A3} - 5x_{A4} + 9x_{Z1} + 4x_{Z2} + 8x_{Z3} + x_{Z4} + 16x_{S1} + 11x_{S2} + 15x_{S3} + 8x_{S4}$$

Que será igual à soma do lucro resultante da venda dos diversos tipos de gasolina, abatidos os custos dos diversos tipos de petróleo utilizados.

Teve-se um entendimento diferente nesta questão, que ao invés de ser soma do lucro será soma da receita, pois temos que :

$$L = R - C$$

Onde

$$L = \text{Lucro}$$

$$R = \text{Receita (Venda da Gasolina)}$$

$$C = \text{Custo (Barril de Petróleo)}$$

Logo, analisa-se da seguinte forma:

Função Objetivo

$$\text{MAX } Z(x) = 3x_{A1} - 2x_{A2} + 2x_{A3} - 5x_{A4} + 9x_{Z1} + 4x_{Z2} + 8x_{Z3} + x_{Z4} + 16x_{S1} + 11x_{S2} + 15x_{S3} + 8x_{S4}$$

S. a.

Restrições associadas à quantidade de petróleo disponível:

$$x_{A1} + x_{Z1} + x_{S1} \leq 3500$$

$$x_{A2} + x_{Z2} + x_{S2} \leq 2200$$

$$x_{A3} + x_{Z3} + x_{S3} \leq 4200$$

$$x_{A4} + x_{Z4} + x_{S4} \leq 1800$$

Restrições associadas às especificações da mistura:

Para a gasolina Superazul

$$x_{S1} \leq 0,3(x_{S1} + x_{S2} + x_{S3} + x_{S4})$$

$$x_{S2} \geq 0,4(x_{S1} + x_{S2} + x_{S3} + x_{S4})$$

$$x_{S3} \geq 0,5(x_{S1} + x_{S2} + x_{S3} + x_{S4})$$

Para a gasolina Azul

$$x_{Z1} \leq 0,3(x_{Z1} + x_{Z2} + x_{Z3} + x_{Z4})$$

$$x_{Z1} \geq 0,1(x_{Z1} + x_{Z2} + x_{Z3} + x_{Z4})$$

Para a gasolina Amarela

$$x_{A1} \leq 0,7(x_{A1} + x_{A2} + x_{A3} + x_{A4})$$

Restrições de não negatividade

$$x_{A1} \geq 0, x_{A2} \geq 0, x_{A3} \geq 0, x_{A4} \geq 0, x_{Z1} \geq 0, x_{Z2} \geq 0, x_{Z3} \geq 0, x_{Z4} \geq 0, x_{S1} \geq 0, x_{S2} \geq 0, x_{S3} \geq 0, x_{S4} \geq 0$$

Desta forma encontramos os seguintes resultados:

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 10

Tabela 11 - Valor ótimo encontrado da função objetivo do problema da mistura de petróleo

OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1) 114200.0		
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
XA1	0.000000	6.000000
XA2	0.000000	23.500000
XA3	0.000000	6.000000
XA4	0.000000	6.000000
XZ1	1850.000000	0.000000
XZ2	0.000000	17.500000
XZ3	4200.000000	0.000000
XZ4	150.000000	0.000000
XS1	1650.000000	0.000000
XS2	2200.000000	0.000000
XS3	0.000000	0.000000
XS4	1650.000000	0.000000

Fonte: Autoria própria (2013)

Assim obtemos zero (0) barril de todos os tipos de petróleo destinados à produção da gasolina amarela (XA).

Para a gasolina azul (XZ) obtemos 6.200 barris de petróleo, sendo 1.850 barris de petróleo do tipo 1 (XZ1); 0 barril de petróleo do tipo 2 (XZ2); 4.200 barris de petróleo do tipo 3 (XZ3) e 150 barris de petróleo do tipo 4 (XZ4) destinados à produção da gasolina azul.

Para a gasolina superazul (XS) obtemos 5.500 barris de petróleo, sendo 1.650 barris de petróleo do tipo 1 (XS1); 2.200 barris de petróleo do tipo 2 (XS2); 0 barril de petróleo do tipo 3 (XS3) e 1.650 barris de petróleo do tipo 4 (XS4) destinados à produção da gasolina superazul.

Observa-se que para a gasolina amarela ser atrativa temos que ter um preço de venda superior ao mencionado no problema (R\$ 22), aumentando as receitas com a venda desse produto.

Logo, a gasolina que se tornou mais atrativa foi a azul associada à quantidade de petróleo do tipo 3 (XZ3), proporcionando um lucro para a empresa de R\$ 4.200,00 reais. Em seguida da gasolina superazul associada à quantidade de petróleo do tipo 2 (XS2), apresentando um lucro de R\$ 2.200 reais, seguida da gasolina azul associada à quantidade de petróleo do tipo 1 (XZ1), trazendo um lucro de R\$ 1.850,00 reais, e assim por diante, conforme mostra na Tabela 11. Portanto, tivemos um lucro de R\$ 114.200,00 reais utilizando todos os recursos disponíveis e necessários, apresentando as soluções ótimas e viáveis, para a obtenção das determinadas gasolinas.

Tabela 12 - Folgas e preço dual do problema da mistura de petróleo

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	9.000000
3)	0.000000	21.500000
4)	0.000000	8.000000
5)	0.000000	1.000000
6)	0.000000	0.000000
7)	0.000000	17.500000
8)	2750.000000	0.000000
9)	10.000000	0.000000
10)	1230.000000	0.000000
11)	0.000000	0.000000
12)	0.000000	0.000000
13)	0.000000	0.000000
14)	0.000000	0.000000
15)	0.000000	0.000000
16)	1850.000000	0.000000
17)	0.000000	0.000000
18)	4200.000000	0.000000

19)	150.000000	0.000000
20)	1650.000000	0.000000
21)	2200.000000	0.000000
22)	0.000000	0.000000
23)	1650.000000	0.000000

Fonte: Autoria própria (2013)

NO. ITERATIONS = 10

Nas restrições (ROW) 2 a 7, sendo as restrição 2 a 5 destinados a produção da gasolina amarela (XA) e 6 e 7 destinados a produção da gasolina azul (XZ), não se encontrou folgas, isto é, todos os recursos disponíveis foram todos utilizados apresentando zero (0) folga.

Nas restrições 8, 9 e 10 apresentaram folgas de 2.750, 10, e 1.230, respectivamente. Sendo as restrições 8 e 9 destinados a produção da gasolina azul (XZ) e a 10 destinados a produção da gasolina superazul (XS). Isto é, o quanto poderia ter utilizado do recurso a mais ou a menos sem alterar o valor (lucro) encontrado na função objetivo.

Assim temos,

Para a gasolina azul:

$$0,5(5500) - 0 \geq 0 = 2750$$

$$0,3(1850 + 0 + 4200 + 150) - 1850 \geq 0 = 10$$

Para a gasolina superazul:

$$0,1(1850 + 0 + 4200 + 150) - 1850 \leq 0 = 1230$$

Nas demais restrições (ROW 12 a 23), são as restrições de não negatividade, por este motivo são encontrados os valores que encontramos na tabela anterior, portanto, não encontramos nenhum valor no Preço Dual (Dual Prices) .

O Preço Dual ou Preço Sombra representa quanto aumentaria ou diminuiria o lucro, caso adicionássemos ou retirássemos uma unidade do determinado item. A Tabela 12 mostra que, ao adicionar/retirar 1 unidade na quantidade de petróleo disponível do tipo 1 teremos um lucro de R\$ 9,00 reais ou uma queda no valor de R\$ 9,00 reais. Ao adicionar 1 unidade na quantidade de petróleo disponível do tipo 2 teremos um retorno significativo, isto é, um lucro de R\$ 21,50 reais, e ao diminuir 1 unidade teremos um prejuízo de R\$ 21,50 reais. Para a quantidade disponível de petróleo do tipo 3 e 4, teríamos um retorno de R\$ 8,00 reais e R\$ 1,00 real, respectivamente.

Tabela 13 - Variáveis da função objetivo do problema da mistura de petróleo

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED: OBJ COEFFICIENT RANGES			
VARIABLE	CURRENT COEF	ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
XA1	3.000000	6.000000	INFINITY
XA2	-2.000000	23.500000	INFINITY
XA3	2.000000	6.000000	INFINITY
XA4	-5.000000	6.000000	INFINITY
XZ1	9.000000	0.000000	6.000000
XZ2	4.000000	17.500000	INFINITY
XZ3	8.000000	INFINITY	0.000000
XZ4	1.000000	0.000000	0.000000
XS1	16.000000	INFINITY	0.000000
XS2	11.000000	INFINITY	17.500000
XS3	15.000000	0.000000	INFINITY
XS4	8.000000	0.000000	0.000000

Fonte: Autoria própria (2013)

A análise de sensibilidade nos permite saber o quanto podemos alterar as variáveis, sem mudar o valor final da solução ótima. Em outras palavras, a análise de sensibilidade nos permite saber o quanto podemos incrementar ou decrementar os coeficientes da função objetivo, sem que altere o resultado final.

A Tabela 13 mostra que, os valores tem um limite máximo e mínimo em que possam ser alterados, como acontece na quantidade de barril de petróleo do tipo 1 destinado a fabricação da gasolina azul (x_{A1}), este pode variar entre um acréscimo de 6 unidades e um decréscimo “infinito”, isto é, zero, que não implicará no resultado final. Assim podemos manipular os recursos sem gerar problemas futuros. Da mesma forma podemos visualizar o quanto poderíamos aumentar ou diminuir nas demais variáveis, conforme mostra a Tabela 13.

Tabela 14 - Restrições do problema da mistura de petróleo

RIGHTHAND SIDE RANGES			
ROW	CURRENT RHS	ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
2	3500.000000	14.285714	1366.666748
3	2200.000000	200.000000	33.333332
4	4200.000000	12300.000000	33.333332
5	1800.000000	12300.000000	33.333332

6	0.000000	10.000000	1230.000000
7	0.000000	85.714287	942.857117
8	0.000000	2750.000000	INFINITY
9	0.000000	10.000000	INFINITY
10	0.000000	INFINITY	1230.000000
11	0.000000	0.000000	INFINITY
12	0.000000	0.000000	INFINITY
13	0.000000	0.000000	INFINITY
14	0.000000	0.000000	INFINITY
15	0.000000	0.000000	INFINITY
16	0.000000	1850.000000	INFINITY
17	0.000000	0.000000	INFINITY
18	0.000000	4200.000000	INFINITY
19	0.000000	150.000000	INFINITY
20	0.000000	1650.000000	INFINITY
21	0.000000	2200.000000	INFINITY
22	0.000000	0.000000	INFINITY
23	0.000000	1650.000000	INFINITY

Fonte: Autoria própria (2013)

A Tabela 14 mostra que, podemos acrescentar nas restrições associadas à quantidade de petróleo disponível (ROW 2) uma quantia de até 14,285714 unidades e diminuir até 1.366,666748 unidades que não modificará o valor da solução ótima. Já para as restrições associadas às especificações da mistura (ROW 7) podemos incrementar 85.714287 unidades e decrementar 942.857117 unidades que também não mudará o valor encontrado na função objetivo. Para as demais restrições podemos visualizar no decorrer da Tabela 14.

Este solver nos mostrou de forma rápida e precisa a solução do problema da mistura de quatro tipos de petróleo para a fabricação de três tipos de gasolinas. Caso fossemos tomar decisões sem a utilização de um programa linear, certamente não saberíamos qual seria a solução ótima para esta empresa petrolífera. Logo, também não saberíamos que a gasolina amarela, mesmo utilizando até 70% do petróleo mais barato do tipo 1, não seria produzida, e o petróleo que tem um valor de venda intermediário seria o de maior viabilidade.

4.2 O PROBLEMA DO FLUXO DE PETRÓLEO NA REFINARIA

Este estudo consiste em otimizar a utilização dos recursos disponíveis (matéria-prima) obedecendo as limitações de produção (vendas, transporte e capacidade de processamento), bem como maximar seu lucro e minimizar seus custos.

Avaliar qual será o melhor fluxo, tipo I e II, que trará mais benefícios para a determinada refinaria.

Primeiramente, simplificamos as equações para melhor serem analisadas

$$a_N = 0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,8 = 0,5814$$

$$a_A = 0,9 \times 0,95 \times 0,85 \times 0,75 = 0,5450625$$

$$b = 0,9 \times 0,85 \times 0,80 = 0,612$$

Simplificando as equações do fluxo de perdas relacionadas aos custos (custo da matéria-prima) e preços dos produtos (preço de venda)

$$20(a_N + a_A) + 18b$$

$$20a_N x_I^N + 20a_A x_I^A + 18x_{II} - 5a_N x_I^N - 5a_A x_I^A - 6bx_{II}$$

Assim temos:

$$15a_N x_I^N + 15a_A x_I^A + 12bx_{II}$$

Multiplicando e simplificando, ainda mais, a equação, teremos:

$$8,72x_I^N + 8,17x_I^A + 7,344x_{II}$$

Em seguida, analisando e simplificando os fluxos passando pelos respectivos centros.

$$\text{Centro 1: } (0,5x_I^N + 0,5x_I^A + 0,6x_{II})$$

$$\text{Centro 2: } (0,4x_I^N + 0,4x_I^A + 0,40x_{II})$$

$$\text{Centro 3: } (0,52x_I^A + 0,46875x_{II})$$

$$\text{Centro 4: } (0,6156x_I^N + 0,6156x_I^A + 0,459x_{II})$$

Logo, teremos a seguinte Função Objetivo:

$$6,8044x_I^N + 6,1344x_I^A + 5,81625x_{II}$$

Restrições de venda

$$0,5814x_I^N + 0,5450625x_I^A \leq 1700$$

$$0,612x_{II} \leq 1500$$

Restrições de transporte

$$0,5814x_I^N + 0,5450625x_I^A + 0,612x_{II} \leq 2500$$

Restrições associadas à capacidade de processamento

$$0,0033x_I^N + 0,0033x_I^A + 0,002x_{II} \leq 16$$

$$0,002x_I^N + 0,0018x_I^N + 0,002x_I^A \leq 12 \quad \longrightarrow \quad 0,0038x_I^N + 0,002x_I^A \leq 12$$

$$0,0021x_I^A + 0,001875x_{II} \leq 12$$

$$0,00342x_I^N + 0,00342x_I^A + 0,002x_{II} \leq 16$$

O método utilizado será o simplex para otimização deste tipo de problema, no qual veremos a seguir:

Função objetivo:

$$MAX 6,8044x_I^N + 6,1344x_I^A + 5,81625x_{II}$$

S. a.

Restrições de venda:

$$0,5814x_I^N + 0,5450625x_I^A \leq 1700$$

$$0,612x_{II} \leq 1500$$

Restrições de transporte:

$$0,5814x_I^N + 0,5450625x_I^A + 0,612 \leq 2500$$

Restrições associadas a capacidade de processamento:

$$0,0033x_I^N + 0,0033x_I^A + 0,002x_{II} \leq 16$$

$$0,0038x_I^N + 0,002x_I^A \leq 12$$

$$0,0021x_I^A + 0,001875 \leq 12$$

$$0,00342x_I^N + 0,00342x_I^A + 0,002x_{II} \leq 16$$

Restrições de não negatividade:

$$x_I^N \geq 0, x_I^A \geq 0, x_{II} \geq 0$$

Logo, encontramos os seguintes resultados:

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 2

Tabela 15 - Valor ótimo encontrado da função objetivo do problema do fluxo de petróleo na refinaria

OBJECTIVE FUNCTION VALUE		
1) 27498.85		
VARIABLE	VALUE	REDUCED COST
XIN	2923.976807	0.000000
XIA	0.000000	0.244725
XII	1307.189575	0.000000

Fonte: Autoria própria (2013)

Podemos observar que o fluxo do tipo I alternativo não foi nada atrativo, obtendo 0 (zero) no seu valor correspondente. Já o fluxo do tipo I normal foi o mais atrativo, obtendo o valor de R\$ 2.923,97 reais (XIN), em seguida, do fluxo do tipo II obtendo o valor de R\$ 1.307,18 reais (XII).

Para o fluxo do tipo I alternativo (XIA) se tornar atrativo teríamos que ter um preço de venda superior ao mencionado no problema (R\$ 250) e/ou um percentil de recuperação maior que 75%.

Logo, o fluxo do tipo I normal se tornou mais atrativo por ter o percentil de recuperação maior que o fluxo do tipo I alternativo e, conseqüentemente, maior do que o fluxo do tipo II. Portanto, o lucro para esta determinada refinaria foi de R\$ 27.498,85 reais, utilizando de forma ótima (XIN) e viável (XII) os recursos disponíveis.

Tabela 16 - Folgas e preço dual do problema do fluxo de petróleo na refinaria

ROW	SLACK OR SURPLUS	DUAL PRICES
2)	0.000000	2.199798
3)	700.000000	0.000000
4)	0.000000	9.503676
5)	3.736498	0.000000
6)	0.888888	0.000000
7)	9.549020	0.000000
8)	3.385620	0.000000
9)	2923.976807	0.000000
10)	0.000000	0.000000
11)	1307.189575	0.000000

Fonte: Autoria própria (2013)

De acordo com a Tabela 16 temos que, as restrições 2 e 4, não houveram folgas, pois todos os recursos disponíveis foram utilizados. No entanto, as restrições 3, 5, 6, 7 e 8 apresentaram folgas de 700; 3,736498; 0,888888; 9,549020 e 3,385620, respectivamente. Isto indica que poderíamos ter utilizado dos recursos, já existentes, a mais ou a menos sem alterar o valor encontrado na solução objetivo.

Podemos observar no Preço Dual que aumentando 1 unidade na quantidade de venda diária máxima (ROW 2) teremos um retorno de R\$ 2,19 reais a mais ou a menos . E, aumentando 1 unidade na capacidade de transporte (ROW 4) teremos um lucro no valor de R\$ 9,50 reais.

Para as demais restrições temos as de não negatividade, encontrando os mesmos valores da Tabela anterior, e nenhum valor para o preço sombra (ROW 5 a 11), visto na tabela 16.

NO. ITERATIONS = 2

Tabela 17 - Variáveis da função objetivo do problema do fluxo de petróleo na refinaria

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED: OBJ COEFFICIENT RANGES			
VARIABLE	CURRENT COEF	ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
XIN	6.804400	INFINITY	0.261040
XIA	6.134400	0.244725	INFINITY
XII	5.816250	1.346277	5.816250

Fonte: Autoria própria (2013)

Fazendo uma análise de sensibilidade para este problema de refino, visto na Tabela 17, observa-se que podemos aumentar ou diminuir os coeficientes das variáveis x_I^N , x_I^A e x_{II} , infinito e 0,261040; infinito e 0,261040; 1,346277 e 5,816250, respectivamente, sem alterar o resultado final (R\$ 27.498,85).

Tabela 18 - Restrições do problema do fluxo de petróleo na refinaria

RIGHTHAND SIDE RANGES			
ROW	CURRENT RHS	ALLOWABLE INCREASE	ALLOWABLE DECREASE
2	1700.000000	135.999893	700.000000
3	1500.000000	INFINITY	700.000000
4	2500.000000	700.000000	800.000000
5	16.000000	INFINITY	3.736498
6	12.000000	INFINITY	0.888888
7	12.000000	INFINITY	9.549020
8	16.000000	INFINITY	3.385620
9	0.000000	2923.976807	INFINITY
10	0.000000	0.000000	INFINITY
11	0.000000	1307.189575	INFINITY

Fonte: Autoria própria (2013)

As restrições podem ser alteradas, respeitando um limite máximo e mínimo, assim como os coeficientes das variáveis. Desta forma, a Tabela 18 mostra o quanto podemos aumentar ou diminuir as restrições do lado direito da equação, para que não sofra alterações no resultado final.

Assim pode-se ter um acréscimo nas restrições de vendas (ROW 2) de 135,999893 unidades e um decréscimo de 700 unidades sem sofrer alguma alteração na função objetivo. Já nas restrições de transporte (ROW 4) podemos ter um aumento de 700 unidades e uma redução de 800 unidades. E nas restrições associadas à capacidade de processamento (ROW 5) podemos aumentar até ao máximo e diminuir até 3,736498 unidades que não sofrerá mudança no resultado final.

Portanto, com estas análises, pode-se manipular a quantidade de vendas diárias, a capacidade de transporte e os recursos disponíveis, sem trazer prejuízos para a refinaria, resultando em melhores benefícios em torno desse processo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo principal estudar alguns problemas de otimização aplicados à indústria do petróleo, com a finalidade de encontrar soluções ótimas, buscando alocar de forma ótima os recursos disponíveis.

Neste estudo apresentamos algumas recomendações técnicas de otimização aplicadas à indústria petrolífera, onde fica evidente a importância de estudar modelos e técnicas que permitam descrever e otimizar alguns dos processos operacionais que podem ser aplicados em diversas áreas, dentre elas a indústria de petróleo.

Em problemas de otimização, é de grande importância utilizar algum solver para encontrar a solução ótima dos problemas estudados, pois seus relatórios fornecem informações úteis para a análise de sensibilidade, além de ser uma ferramenta auxiliar na resolução do grande volume de cálculos associados aos problemas de otimização. Sendo assim, o solver utilizado *LINDO 6.1*. foi adequado às situações analisadas no presente trabalho, onde seus resultados foram de fundamental importância para a análise da situação e posterior processo de tomada de decisão.

Os problemas analisados envolvem a otimização dos recursos disponíveis utilizando os recursos necessários, de forma a minimizar os custos de produção.

O primeiro problema analisado foi referente à mistura de petróleo para gerar diferentes tipos de gasolina. Este problema é recorrente na indústria petrolífera, pois as marcas que comercializam combustível, sempre oferecem ao consumidor pelo menos duas opções de gasolina, sendo elas: comum e aditivada. Além disso, existem diversos tipos de petróleo, cada um com características específicas, que se adequam melhor a determinado tipo de combustível gerado. Logo, o modelo de otimização analisado pode ser aplicado a problemas reais na área em questão, o que mostra a sua grande aplicação prática. Combinar os elementos de forma ótima é uma maneira de aproveitar da melhor forma possível todos os recursos escassos disponíveis, e a análise de sensibilidade aponta os setores e/ou processos críticos no contexto em análise. Verificou-se no problema em questão que as especificações da mistura limita a produção, e que o aspecto mais vantajoso economicamente seria produzir mais de gasolina azul tipo 2 (XA2), pois possui o maior preço dual associado.

Já o segundo problema analisado diz respeito ao fluxo ótimo de refino de óleo, onde existem três linhas de produção possíveis, que produzem dois tipos de óleo diferente. Sabe-se que os fabricantes comercializam diversos tipos de óleo lubrificante, adequados a usos diversos, tais como utilização em automóveis, caminhões, aviação, até a máquinas industriais,

onde a classificação distingue esse produto de acordo com sua viscosidade e densidade. Dessa forma, este problema pode ter seu escopo adaptado a este problema em várias refinarias, de acordo com seu fluxo de produção e produtos produzidos. O fluxo de produção para cada tipo de óleo possui um custo específico que implica no custo final do produto, onde fluxos mais econômicos refletem em um produto com menor custo de produção, e conseqüentemente com um lucro associado mais vantajoso. Verificou-se no problema em questão que para atender a demanda de produção, apenas dois fluxos foram utilizados. Para ser utilizado, o fluxo ocioso necessitaria ter um custo total menor em R\$ 0,24. Esta linha de produção não é atrativa, e poderia ser utilizada em casos de aumento da demanda, porém, implicando em um produto com produção mais cara.

Como pode-se observar nos comentários acima, vários problemas estão associados a indústria de petróleo, que está em franca ascensão no contexto brasileiro, com a descoberta do Pré-Sal, e mundial, onde existem diversas plantas de exploração em plena atividade. Ressaltamos que o beneficiamento do petróleo produz diversos tipos de produtos, e o contexto de otimização pode ser adaptado e aplicado para problemas de otimização, onde teremos o aproveitamento ótimo dos recursos e a maximização ou minimização da variável utilizada, constituindo-se assim em uma vantagem gerencial e de mercado para as empresas que analisam seus processos dessa forma.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS-ANP. **Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural**: Superintendência de Desenvolvimento e Produção – SDP. Disponível em: <www.anp.gov.br/?dw=59164>. Acesso em: 23 mar. 2013.

_____. **Pré-Sal e Áreas Estratégicas**: Importância do Pré-Sal para o Brasil e Brasileiros. Novo Marco Regulatório. ANP: Brasil, 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/pre_sal/marcoregulatorio.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2013.

ARENALES, Selma; DAREZZSO, Arthur . **Cálculo Numérico**. São Paulo, Thompson, 2008.

BURDEN, Richard L.; FAIRES, Douglas. **Análise Numérica**. São Paulo: CENGAGE, 2008.

CAIXETA-FILHO, José Vicente. **Pesquisa Operacional**: Técnicas de otimização aplicadas a sistemas agroindustriais. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

CAMPOS FILHO, Frederico Ferreira. **Algoritmos Numéricos**. 2.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

CARDOSO, Luiz Cláudio dos Santos. **Logística do petróleo**: transporte e armazenamento. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

CARVALHO, Ludmila. **As 7 Irmãs do Petróleo**. Disponível em: <<http://petrogasnews.wordpress.com/2011/06/09/as-7-irmas-do-petroleo/>>. Acesso em: 29 mar. 2013.

CENTRO DE ESTUDOS DE PETRÓLEO-CEPETRO. **Petróleo**. São Paulo: UNICAMP, 2012. Disponível em: <<http://www.bibliotecavirtual.sp.gov.br/pdf/temasdiversos-petroleo.pdf>>. Acesso em: 07 jan. 2013.

CORREA, O.L.S. **Petróleo, noções sobre exploração, perfuração, produção e microbiologia**. Editora Interciência, 2003.

CRUZ, José Flávio Martins. **Caracterização de gasolinas por espectroscopia FT-RAMAN**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Curso de Química, Departamento de Química, PUC: Rio de Janeiro, 2003.

DIAS, Kadu. **Mundo das Marcas**: PETROBRAS, 2006. Disponível em: <<http://migre.me/dO98p>>. Acesso em: 17 fev. 2013.

FONSECA, Flávia de O. Moreira; GUIMARÃES, Rodolfo Bianchi. **Gerenciamento de Recursos Humanos na Indústria do Petróleo**. 2003. 73 f. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

GNU Linear Programming Kit Reference Manual for GLPK Version 4.45 (DRAFT, December 2010)

GOBERSTEIN, Marcelo. **Guia de Aplicação em Vapor**: Segmento de OPC. São Paulo: Spiraxsarco, 2007.

GOLDBARG, Marco Cesar; PACCA LUNA, Henrique. **Otimização combinatória e programação linear**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

GOMES, Alexandre Leiras. Refino de Petróleo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE QUÍMICA, 42., 2002, Rio de Janeiro. **Refino de Petróleo**. Rio de Janeiro: DPO/EQ/UFRJ, 2002. p. 1 - 128.

GONÇALVES, Márcia Patrícia Ferreira. **Determinação do número de octano por cromatografia gasosa**. 2008. 232 f. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008.

GONÇALVES, Raquel G.. **Introdução à Engenharia de Petróleo**: Engenharia de Petróleo. São Paulo: UNICAMP, 2009. p. 1-38.

LACHERMATCHER, Gerson. **Pesquisa Operacional na Tomada de Decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2002.

_____. **Pesquisa Operacional a Tomada de Decisões**: 4. ed. São Paulo: Pearson, 2009.

MALAFAIA, Elisa Monteiro. **O avanço das práticas de Responsabilidade Social Corporativa no Setor de Petróleo**: O caso da PETROBRAS. 2006. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciências em Planejamento Energético, UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.

MILANI, J.E.; BRANDÃO, J. A. S. L.; ZÁLAN P.V.; GAMBOA, L. A. P. **Petróleo na margem Continental Brasileira**: Geologia, exploração, resultados e perspectivas. Rev. Bras. Geof. vol.18 N.3 São Paulo, 2000.

MILLIOLI, Valéria Souza et al. **Biorremediação de solo impactado com óleo cru**: Avaliação da potencialidade da utilização surfactantes. CETEM/MCT: Rio de Janeiro, 2008.

PETROBRAS. **Atuação no Pré-sal**. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/energia-e-tecnologia/fontes-de-energia/petroleo/presal/>>. Acesso em: 23 fev. 2013.

_____. **Distribuição do parque de refino no Brasil.** Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/principais-operacoes/>>. Acesso em: 23 mar. 2013.

_____. **Nossa História.** Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/quem-somos/nossa-historia/>>. Acesso em: 05 fev. 2013.

PINTO, Rosemberg. **Pré-Sal e o Fundo Social.** PETROBRAS: Bahia, 2011.

PRESS, Frank et al. **Para entender a terra.** 4. ed. São Paulo: Bookman, 2008.

RUGGIERO, Márcia A. Gomes; LOPES, Vera Lúcia da Rocha . **Calculo Numérico:** Aspectos teóricos e computacionais. 2.ed. São Paulo: Makron Books, 1996.

SILVA, Francis M. G. et al. **A importância das Rochas Sedimentares para a formação do Petróleo.** 2012. 48 f. Técnico (Tecnólogo) - Curso de Petróleo e Gás, Faculdade Capixaba de Nova Venécia, Nova Venécia, 2012.

SPEIGHT, J. G. **The Chemistry and Technology of Petroleum.** Third edition, 1999.

TAHA, Hamdy A.. **Pesquisa Operacional.** 8 ed. edição São Paulo: Pearson Brasil, 2008.

THOMAS, José Eduardo. **Fundamentos de Engenharia de Petróleo.** Rio de Janeiro: Interciência, 2001.

UNIVERSIDADE INTEGRADA DO BRASIL- UNITBR. **Introdução a Exploração e Produção de Petróleo.** 1. ed. UNITBR: Brasil, 2011.

VERÇOSA, Enio José. **Materias de construção.** Porto Alegre, Sagra 2v. 1994.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL-CPRM. **Armadilhas geológicas ou Trapas.** Brasília-DF, 2011. Disponível em: <<http://www.cprm.gov.br/publique/media/trapa.jpg> 2011>. Acesso em 23 mar. 2013.

GLOSSÁRIO

ALLOWABLE DECREASE – Permitido decrementar

ALLOWABLE INCREASE – Permitido incrementar

CURRENT COEF – Coeficiente atual

CURRENT RHS – Restrição atual

DUAL PRICES – Preço dual

INFINITY - Infinito

LINDO Systems – *Linear, Interactive, and Discrete Optimizer*

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 10 – 10 Rodadas de *Simplex*

LP OPTIMUM FOUND AT STEP 2 – 2 Rodadas de *Simplex*

NO. ITERATIONS - Interações

OBJ COEFFICIENT RANGES – Faixas que podem ser alteradas da Função Objetivo

OBJECTIVE FUNCTION VALUE – Valor da Função Objetivo

RANGES IN WHICH THE BASIS IS UNCHANGED – Faixas em que a base mantém-se inalterada

REDUCED COST – Redução nas variáveis da função objetivo

RIGHTHAND SIDE RANGES – Constante da restrição

ROW - Linha

SLACK OR SURPLUS – Folgas

VALUE – Valor atrativo

VARIABLE – Variáveis analisadas