

# **Planejamento Operacional de Refinarias**

Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção  
Centro Tecnológico

## **Planejamento Operacional de Refinarias**

Cátia Bueno

Dissertação submetida à  
Universidade Federal de Santa Catarina  
para a obtenção do título de Mestre  
em Engenharia de Produção

Florianópolis  
Santa Catarina – Brasil  
Fevereiro de 2003

# Planejamento Operacional de Refinarias

Cátia Bueno

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de  
**MESTRE EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**  
e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 28 de fevereiro de 2003.

---

**Prof. Edson Pacheco Paladini, Dr.**

Coordenador do curso

Banca Examinadora:

---

**Prof. Maria Cristina Fogliatti de Sinay, Ph.D.**

Orientador

---

**Prof. Mirian Buss Gonçalves, Dr.**

---

**Prof. João Carlos Souza, Dr.**

À esperança.

Aos meus filhos Lucas, Leonardo e Ana:  
minhas três fontes de energia, inspiração e alegria.

Ao meu marido Leonardo:  
meu companheiro de todas as horas.

Aos meus pais.

## Agradecimentos

Ao meu marido Leonardo pelo seu constante estímulo e presença nas etapas mais difíceis;

À Professora Maria Cristina, pelas suas valiosas orientações durante todas as etapas deste trabalho;

A Paulo Hamacher, pelas sugestões e críticas;

Aos colegas e amigos Cesar Augusto de Almeida Lima, Fernando José Lopes Borges, Frederico Munck, Mário Sérgio da Silva Junior, Mauro Marques Braga, Paulo Cezar Bayer Candal e Wanda Santos Teixeira, pelo incentivo e colaboração;

Aos meus gerentes, que me permitiram conciliar a rotina com o estudo;

À PETROBRÁS, pela oportunidade concedida e pela riqueza de experiências que me ofereceu durante todos esses anos de trabalho;

Aos membros da banca examinadora, a Prof<sup>a</sup>. Mirian Buss Gonçalves e o Prof. João Carlos Souza, por suas contribuições e pela disposição imediata em participar.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>x</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>xiv</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>xv</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 Introdução.....	1
1.2 Objetivo.....	3
1.3 Importância e Justificativa do Estudo.....	4
1.4 Organização do trabalho.....	5
<b>2 O REFINO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO.....</b>	<b>7</b>
2.1 Introdução.....	7
2.2 Processos do Refino.....	8
2.2.1 Processos de Separação.....	9
2.2.1.1 Destilação.....	9
2.2.1.2 Desasfaltação.....	10
2.2.2 Processos de Conversão.....	11
2.2.2.1 Craqueamento Catalítico.....	11
2.2.2.2 Hidrocraqueamento Catalítico.....	12
2.2.2.3 Alcoilação Catalítica.....	13
2.2.2.4 Reforma Catalítica.....	13
2.2.2.5 Coqueamento Retardado.....	14
2.2.3 Processos de Tratamento e Mistura.....	15
2.2.3.1 Processos de Tratamento.....	15
Tratamento Cáustico.....	16

	Tratamento Cáustico Regenerativo.....	16
	Tratamento Bender.....	17
	Tratamento com Di-Etanol Amina (DEA).....	17
	Hidrotratamento Catalítico.....	17
2.2.3.2	Processos de Mistura.....	18
2.3	Qualidade e Especificação dos Produtos do Refino.....	18
2.3.1	Combustíveis.....	19
2.3.1.1	Gás Liquefeito de Petróleo.....	20
2.3.1.2	Gasolina.....	21
2.3.1.3	Querosene de Aviação.....	22
2.3.1.4	Diesel.....	24
2.3.1.5	Óleo Combustível.....	25
2.3.2	Petroquímicos.....	26
2.3.3	Solventes.....	27
2.3.4	Asfaltos e Coques.....	27
2.3.4.1	Asfalto.....	27
2.3.4.2	Coque.....	28
2.3.5	Lubrificantes Básicos e Parafinas.....	28
2.3.5.1	Lubrificantes Básicos.....	28
2.3.5.2	Parafinas.....	29
2.4	Conclusões.....	29
<b>3</b>	<b>O PLANEJAMENTO OPERACIONAL NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO.....</b>	<b>32</b>
3.1	A Rede Logística do Petróleo e Seu Planejamento.....	32
3.1.1	O Planejamento Operacional e a Utilização de Modelos.....	36
3.2	O Planejamento Operacional das Refinarias e a Programação Linear.....	40
3.2.1	Recursividade.....	44
3.3	Conclusões.....	45
<b>4</b>	<b>A MODELAGEM “WHAT IF” NO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE REFINARIAS - SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA.....</b>	<b>47</b>
4.1	Vantagens e Desvantagens do Uso da Simulação.....	47

4.2	Sistemas e os modelos de Simulação.....	48
4.3	A Simulação no Planejamento Operacional de Refinarias.....	52
4.4	Conclusões.....	54
<b>5</b>	<b>O PROCEDIMENTO PROPOSTO.....</b>	<b>55</b>
5.1	Introdução.....	55
5.2	Formulação Conceitual.....	55
5.3	Descrição da Modelagem.....	59
5.3.1	A Modelagem.....	59
5.3.1.1	Entidades.....	59
5.3.1.2	Variáveis.....	60
	Variáveis Simuladas.....	60
	Variáveis a Serem Otimizadas.....	60
	Variáveis “Conseqüência” .....	60
5.3.1.3	Atributos.....	61
	Coeficientes Tecnológicos.....	61
	Coeficientes Econômicos.....	63
	Recursos.....	63
5.3.1.4	Equações de Balanço.....	64
5.3.1.5	Restrições.....	69
5.3.1.6	Função-Objetivo.....	71
5.3.2	A Simulação Propriamente Dita.....	71
5.3.3	Interface Gráfica.....	72
5.4	Conclusões.....	73
<b>6</b>	<b>ESTUDO DE CASO: PLANEJAMENTO OPERACIONAL DA REFINARIA REPLAN DA PETROBRÁS.....</b>	<b>75</b>
6.1	Introdução.....	75
6.2	Etapas do Processo de Planejamento Operacional da Refinaria.....	78
6.3	Modelagem Replan.....	79
6.3.1	Definição das Entidades.....	79
6.3.1.1	Unidades de Processo.....	79
6.3.1.2	Petróleos.....	80

6.3.1.3	Campanhas.....	81
6.3.1.4	Produtos Intermediários.....	82
6.3.1.5	Produtos Finais.....	84
6.3.2	Definição das Variáveis.....	87
6.3.2.1	Variáveis Simuladas.....	87
6.3.2.2	Variáveis Otimizadas.....	87
6.3.2.3	Variáveis “Conseqüência”.....	87
6.3.3	Definição dos Atributos.....	88
6.3.4	Definição das Restrições.....	88
6.3.5	Definição da Função-Objetivo.....	90
6.4	Resultados Obtidos.....	91
6.4.1	Análise do Caso 1.....	95
6.4.2	Análise do Caso 2.....	97
6.4.3	Análise do Caso 3.....	100
6.5	Conclusões.....	102
<b>7</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>104</b>
7.1	Conclusões.....	104
7.2	Recomendações.....	106
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>107</b>
	<b>ANEXO I – VARIÁVEIS SIMULADAS DO MODELO.....</b>	<b>111</b>
	<b>ANEXO II – VARIÁVEIS OTIMIZADAS DO MODELO .....</b>	<b>112</b>
	<b>ANEXO III – VARIÁVEIS “CONSEQUÊNCIA” DO MODELO .....</b>	<b>114</b>
	<b>ANEXO IV – ATRIBUTOS DO MODELO .....</b>	<b>122</b>
	<b>ANEXO V – RELATÓRIO “PIMS”.....</b>	<b>125</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Esquema Básico de Refino de uma Refinaria.....	9
Figura 2.2 - Cadeia Logística da Indústria do Petróleo.....	30
Figura 3.1 - Fluxos Logísticos na Indústria do Petróleo.....	34
Figura 3.2 - Rede Logística da Indústria do Petróleo no Brasil.....	35
Figura 3.3 - Ciclo Integrado da Rede Logística na Indústria do Petróleo.....	38
Figura 3.4 - Ciclo Integrado da Petrobrás.....	40
Figura 4.1 - Formas de Estudo de um Sistema.....	49
Figura 4.2 - Processo de Construção de Modelos.....	51
Figura 4.3 - Integração do Modelo de Simulação com o Modelo Otimizante.....	53
Figura 5.1 - Representação das Operação de uma Refinaria.....	56
Figura 5.2 - Fluxograma dos Processos de uma Refinaria.....	57
Figura 5.3 - Painel de Controle.....	72
Figura 5.4 - Interface Gráfica do Modelo Proposto.....	74
Figura 6.1 - Vista Geral da Replan.....	75
Figura 6.2 - Integrantes da Cadeia de Suprimento da Replan.....	77
Figura 6.3 - Unidades de Destilação da Replan.....	80

Figura 6.4 - Fluxograma do Modelo Proposto.....	86
Figura 6.5 - Relatório do Modelo Proposto (Caso Base).....	93
Figura 6.6 - Custos Variáveis da Refinaria .....	94
Figura 6.7 - Comparação das Cargas da UFC do Caso Base com o Caso 1.....	96
Figura 6.8 - Comparação dos Perfis de Produção do Caso Base com o Caso 1.	96
Figura 6.9 - Comparação dos Teores de Nafta DD Adicionados à Gasolina.....	98
Figura 6.10 - Composição do Óleo Diesel no Caso Base e no Caso 2.....	99
Figura 6.11 - Comparação dos Perfis de Produção do Caso Base com o Caso 2.....	99
Figura 6.12 - Comparação das Cargas da UHD do Caso Base com o Caso 3...	100
Figura 6.13 - Comparação dos Perfis de Produção do Caso Base com o Caso 3.....	101

## LISTA DE SIGLAS

- AIMMS - Advanced Integrated Multidimensional Modeling Software.
- ASTM - American Society for Testing Materials.
- BDEMQ - Banco de Dados de Estoques, Movimentação e Qualidade da Petrobrás.
- DEA - Di-etil-amida.
- GLP - Gás liqüefeito de petróleo.
- LCO - Light Cycle Oil.
- PIMS - Process Industry Modeling Sistem.
- PL - Programação Linear.
- PLANAB - Planejamento do Abastecimento (modelo corporativo de programação linear que fornece as diretrizes básicas de operação da área de Abastecimento da Petrobrás).
- RAT - Resíduo atmosférico.
- RATCRAQ - Resíduo atmosférico que pode ser carga do Craqueamento Catalítico.
- QAV - Querosene de Aviação.

## LISTA DE TABELAS

Tabela 6.1 - Principais Unidades de Processo da Replan e suas Capacidades..	76
Tabela 6.2 - Produção Típica da Replan.....	76
Tabela 6.3 - Elenco da Replan.....	81
Tabela 6.4 - Mercado da Replan no Modelo.....	85
Tabela 6.5 - Comparação das Produções Obtidas nos Modelos.....	92
Tabela 6.6 - Comparação dos Resultados Econômicos Obtidos nos Modelos.....	91
Tabela 6.7 - Comparação dos Perfis de Produção da UFC do Caso Base com o Caso 1.....	96
Tabela 6.8 - Comparação dos Resultados Econômicos do Caso Base com Caso 1.....	97
Tabela 6.9 - Comparação dos Resultados Econômicos do Caso Base com Caso 2.....	100
Tabela 6.10 - Comparação dos Mercados e Produções do Caso Base com Caso 3.....	101
Tabela 6.11 - Comparação dos Resultados Econômicos do Caso Base com Caso 3.....	102

## RESUMO

Este trabalho tem como objetivo a proposição de procedimento para auxiliar no planejamento das atividades operacionais de uma refinaria de petróleo integrada à cadeia logística de uma empresa de petróleo.

Estudando-se os processos e os produtos envolvidos nas atividades operacionais de uma refinaria, verifica-se a importância do planejamento destas atividades dentro do planejamento de toda a cadeia logística da empresa .

Uma revisão bibliográfica técnica relacionada ao tema permite concluir que tanto o planejamento da cadeia (planejamento corporativo) quanto o planejamento operacional das refinarias isoladamente vem utilizando a programação linear para ajudar a determinar as atividades operacionais.

Após análise das características da programação linear, se conclui que pode haver benefícios no uso de uma ferramenta mais simples, com maior flexibilidade e que facilita a interpretação dos resultados no planejamento operacional das refinarias.

Esta ferramenta é um modelo tipo “what-if” – simulação determinística, que com o uso do Excel e Solver, apoiam na tomada de decisão.

Visando uma demonstração da aplicabilidade deste modelo, é desenvolvido um estudo de caso para a refinaria Replan da Petrobrás onde são analisados diversos cenários do ponto de vista operacional e econômico.

A simulação determinística permitiu usar equações não lineares e facilitou a análise da solução. O procedimento utilizado nesse trabalho para análises de causa/efeito não serviu para substituir mas apoiar a programação linear num sinergismo que permitiu aprofundar o conhecimento do sistema modelado.

## ABSTRACT

This paper aims at the proposition of procedures to facilitate the planning of operational activities carried out by oil refineries that are integrated to the logistics business of a petroleum company.

Examining the processes and products that are involved in the operational activities of a refinery, we are made aware of the importance of the planning of such activities within the planning of the company's overall logistics chain.

Both the planning of the chain (corporate planning) and the operational planning of refineries alone have been using linear programming for determining operational activities.

Analyzing the characteristics of linear programming, we come to the conclusion that it should be more effectual to use a simpler, more flexible tool, which is easier to interpret, for the operational planning of the refineries.

With the experience we acquired, we suggest using a "what-if" model, deterministic simulation, by means of Excel and Solver, to aid that planning.

In order to demonstrate the applicability of that model, we produced a detailed study for Petrobras Replan Refinery. We conducted analyses and interpretations concerning a few changes of scenario, from the operational and economic points of view.

The deterministic simulation allowed non-linear equations to be used as well as the solution analysis. The procedure used in this work for the what-if analysis was not used to substitute, but to support the linear programming in a synergism that enabled to deepen the knowledge of the modulated system.

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Introdução

A indústria do petróleo divide-se em dois ramos de atividades conhecidos como “upstream” e “downstream”. No primeiro estão situadas a exploração e a produção do petróleo enquanto no segundo o refino do petróleo, o seu transporte e de seus derivados<sup>1</sup>, a indústria petroquímica básica e a comercialização dos produtos.

Os preços dos petróleos e de seus derivados influenciam e, por sua vez, são influenciados pelas políticas energéticas e econômicas e pelos interesses geopolíticos dos países. Alterações nestes preços levam as companhias de petróleo a reavaliar suas participações nos ramos de atividades do “upstream” e do “downstream”.

As crises políticas nos países árabes ocorridas na década de 70, resultaram no aumento dos preços dos petróleos e de seus derivados e levaram os demais países a procurar outras fontes energéticas. Estes preços elevados aumentaram a lucratividade do “upstream” e reduziram a atratividade do “downstream”, repercutindo nas estratégias das indústrias do setor, levando a desinvestimentos em refinarias e a maiores investimentos na extração e produção de petróleo.

Já a queda de preço do petróleo na década de 80 e a estabilização deste durante a década de 90 levaram a investir novamente neste setor, mas a preocupação com os riscos de novas crises políticas e econômicas fez as companhias ampliarem suas atuações ao longo de toda a cadeia produtiva

---

<sup>1</sup> produtos gerados com o processamento do petróleo

considerando os dois ramos de atividades. Nestas décadas houve fusões e aquisições de pequenas empresas, as organizações cresceram e formaram-se os oligopólios que operam, atualmente, no mundo todo.

Com isto as grandes companhias de petróleo retiraram os pequenos refinadores do mercado, integrando as refinarias à cadeia logística. Assim, valorizaram seus petróleos reduzindo a influência da flutuação dos preços das matérias primas e dos produtos e obtiveram grandes vantagens da elasticidade do perfil de produção que permitiu atender melhor e mais barato às demandas do mercado. A integração das refinarias à cadeia logística exigiu um planejamento agregado, mais complexo, englobando todas as atividades envolvidas no processo.

No Brasil, a Petróleo Brasileiro S.A (Petrobrás), criada em 1953 pela lei 2004 como uma empresa integrada, tem o monopólio para exploração e produção de petróleo e gás, para o refino de petróleo, para o transporte marítimo e por dutos de petróleo e derivados.

Até 1980 no entanto, apenas 20% do petróleo processado era produzido pela empresa, o restante era importado. Na década de 80, seguindo os rumos das grandes companhias internacionais, a empresa passou a atuar mais no ramo do “upstream”, chegando na década de 2000 com 70% do processamento de petróleo nacional, reduzindo assim gastos com a importação de petróleo.

A partir de 1998, após a quebra do monopólio provocada pela emenda constitucional 9/95, a Petrobrás ainda se manteve integrada, atuando na pesquisa e na lavra das jazidas de petróleo e gás natural, na refinação, na importação e exportação de petróleo e derivados, no transporte de petróleo e derivados por dutos ou navios e na distribuição dos derivados ao mercado; as duas últimas atividades através das suas subsidiárias Petrobrás Transporte S.A e Petrobrás Distribuidora S.A.

## 1.2 Objetivo

A integração das atividades que compõem a cadeia logística de uma indústria de petróleo torna mais complexo o planejamento da mesma. Este é normalmente realizado num nível agregado, com o uso de modelos de pesquisa operacional, a fim de se encontrar soluções otimizadas para o empreendimento como um todo. Entretanto, quando este planejamento integrado é repassado as partes que constituem a empresa (principalmente as refinarias no caso de uma companhia de petróleo), ele gera incertezas sobre a solução a adotar já que novas restrições, que inviabilizem a adoção da solução integrada pelas partes, podem surgir.

Estas incertezas levam as partes constitutivas da cadeia integrada a utilizar outras ferramentas para encontrar as **suas soluções** com as **suas visões** do problema. A dualidade entre a visão agregada e sistêmica do corporativo e as visões particularizadas e efêmeras dos órgãos operacionais não é fácil de ser gerenciada e diferentes tentativas têm sido feitas para reverter, reduzir ou pelo menos permitir uma convivência entre os dois pontos de vista sem prejuízo dos resultados globais da empresa.

Assim, o objetivo desta dissertação é propor um procedimento capaz de adequar e detalhar as soluções otimizadas apresentadas pelo modelo corporativo para as operações das refinarias. Este procedimento, que usa a modelagem “What-if” e a técnica de simulação determinística com otimização, é uma contribuição à aproximação dos planejamentos integrado e particular.

Um estudo de caso com o planejamento operacional da refinaria Replan da Petrobrás será desenvolvido para mostrar a viabilidade, a flexibilidade e o potencial deste procedimento.

### **1.3 Importância e Justificativa do Estudo**

O crescimento da competitividade e da atuação em mercados distantes está levando a indústria de petróleo a incrementar a complexidade e os custos das suas atividades logísticas, aumentando conseqüentemente a importância destas atividades para as empresas do setor.

Estas atividades logísticas sofrem grandes variações provocadas pelos mercados, pelos competidores, pelas regulamentações governamentais, pelos fornecedores ou mesmo pelos processos tecnológicos.

É fundamental que estas mudanças de cenários sejam consideradas em todo processo de planejamento e para isso é necessário que este seja sistemático e dinâmico, e que haja integração das diversas visões de planejamento e programação das atividades logísticas ao longo de toda a cadeia.

Diversos trabalhos técnicos relativos à integração do planejamento com a programação tem sido desenvolvidos, destacando-se entre eles os apresentados na Conferência de Logística da Shell (36), a dissertação de mestrado “Uma Análise da Cadeia Logística de Suprimento da Indústria de Petróleo Utilizando a Técnica de Simulação – Uma Aplicação ao Sistema Bacia de Campos – Refinaria de Araucária” de Borges (11) e as diversas publicações feitas por Hartmann (17, 18, 19, 20 e 21), neste último caso, específicas para o planejamento e programação das atividades das refinarias. Entretanto trata-se de um tema que ainda carece de atenção, principalmente no setor de programação das atividades operacionais das refinarias dentro da cadeia logística. Esta programação é essencial pois é principalmente através das refinarias que se consegue a flexibilidade de adaptação da empresa no que concerne às alterações de quantidade, qualidade e tipo dos produtos fornecidos ao mercado.

## 1.4 Organização do trabalho

Esta dissertação está composta de 7 capítulos e 5 anexos.

No primeiro capítulo é exposto o problema a ser tratado, evidenciando a sua importância e descrevendo a seqüência e o conteúdo dos capítulos da dissertação.

No segundo capítulo descreve-se o funcionamento da indústria do petróleo dando-se atenção especial aos processos realizados nas refinarias e às suas produções. Finaliza-se o capítulo analisando a importância da refinaria operar de forma integrada à cadeia logística.

O capítulo 3 é dedicado à caracterização do processo de planejamento operacional na indústria do petróleo, destacando-se o planejamento das operações das refinarias. Neste capítulo são caracterizados os 3 níveis de planejamento assim como é apresentada uma revisão bibliográfica sobre a técnica de programação linear e suas aplicações no planejamento de refinarias.

O capítulo 4 é consagrado à técnica de simulação determinística, discutindo-se as vantagens e desvantagens da sua aplicação.

No quinto capítulo é desenvolvido um procedimento que representa os processos e produtos de uma refinaria com base nas descrições do capítulo 2.

No capítulo 6 é apresentado um estudo de caso, aplicando-se a modelagem sugerida no capítulo anterior no planejamento operacional de uma refinaria. Vários cenários são propostos com a finalidade de se avaliar suas conseqüências com o uso das ferramentas e gráficos do Excel e do Solver.

Finalmente o último capítulo apresenta as conclusões e recomendações deste trabalho de dissertação.

Seguem a ele, as referências bibliográficas, 4 anexos onde se encontra o detalhamento da modelagem aplicada no estudo de caso (as variáveis simuladas, as variáveis otimizadas, as variáveis “conseqüência” e os atributos) e um quinto anexo com um relatório do aplicativo utilizado atualmente pela Replan para definição das suas atividades operacionais.

## 2 O REFINO NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Neste capítulo apresenta-se uma breve introdução sobre a evolução do uso do petróleo pelo homem, descrevem-se as atividades desenvolvidas nas refinarias em termos de tipos de processos e os produtos gerados por eles.

### 2.1 Introdução

O petróleo não é uma substância pura, mas uma complexa mistura de compostos orgânicos e inorgânicos onde predominam os hidrocarbonetos.

A American Society for testing and Materials (ASTM) o define como “Uma mistura de ocorrência natural, consistindo predominantemente de hidrocarbonetos e compostos orgânicos sulfurados, nitrogenados e oxigenados, a qual é, ou pode ser, removida da terra no estado líquido. O petróleo bruto está, na maioria das vezes, acompanhado por quantidades variáveis de substâncias estranhas tais como água, matéria inorgânica e gases. A remoção destas substâncias estranhas não modifica as condições de mistura do petróleo cru. No entanto, se houver qualquer processo que altere apreciavelmente a composição do óleo, o produto resultante não poderá mais ser considerado petróleo.”

A utilização do petróleo remonta vários séculos, havendo referências na Bíblia de seu uso desde a Arca de Noé, que foi impermeabilizada com betume. Os povos bíblicos e chineses utilizavam este produto para cozimento de alimentos, iluminação e aquecimento. Mas foi somente a partir do século XIX que ele despertou interesse industrial, já que, por si só ele tem poucas aplicações práticas, servindo somente como óleo para queima.

Para que o petróleo tenha seu potencial energético plenamente aproveitado é importante que seja desmembrado nos denominados cortes ou frações. A

quantidade e qualidade dessas frações variam segundo a origem, o tempo e as condições físicas e químicas do ambiente de formação do petróleo.

Assim, todo petróleo cru deve ser processado e transformado de forma a obter-se a maior quantidade possível de produtos valiosos e com redução daqueles de menor valor comercial. Este processamento, realizado nas refinarias, é chamado de **refino** e tem como objetivo conseguir a maior quantidade de derivado com a melhor qualidade possível ao menor custo operacional.

## 2.2 Processos do Refino

O refino do petróleo é realizado para a produção de combustíveis e matérias-primas petroquímicas e ou para a produção de lubrificantes básicos e parafinas.

Busca-se a produção em larga escala de frações destinadas à obtenção de gás liqüefeito de petróleo, gasolina, óleo diesel, querosene e óleo combustível, produtos de grande demanda, ou a maximização de frações de lubrificantes básicos e parafinas, produtos de valores agregados muito maiores que os primeiros e que conferem alta rentabilidade aos refinadores, embora com investimentos de muito maior porte e que envolvem processos complexos.

Devido a estas características há poucas refinarias no Brasil com estes processos, portanto neste trabalho será caracterizado apenas o refino voltado para a produção de combustíveis e de matéria prima petroquímica .

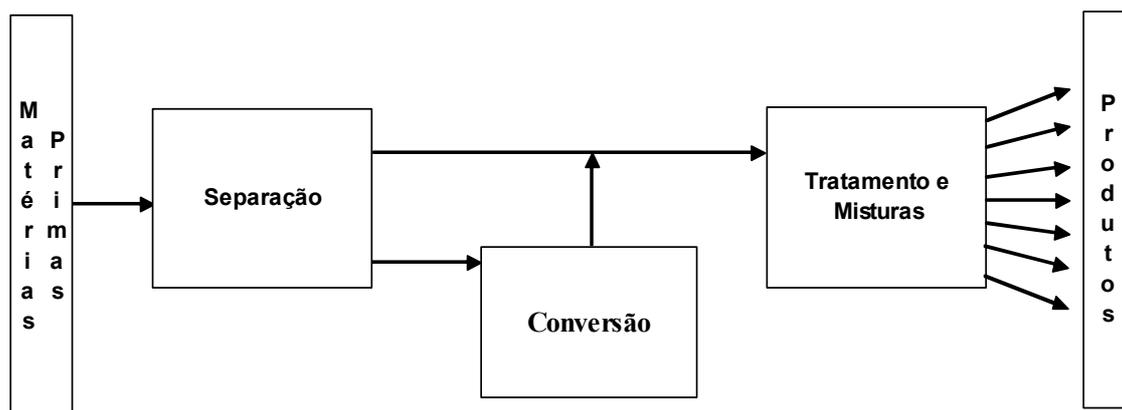
Os processos, para estas finalidades, podem ser divididos em três grandes grupos:

- de separação;
- de conversão e

- de tratamento e mistura.

Na figura 2.1 é apresentado esquematicamente o relacionamento destes processos:

Figura 2.1: Esquema de básico de refino de uma refinaria.



## 2.2.1 PROCESSOS DE SEPARAÇÃO

Os processos de separação, de natureza física, têm como objetivo separar o petróleo em suas frações básicas, mantendo a natureza das moléculas do óleo inalterada. Os agentes responsáveis por estas operações podem ser energia (modificações de temperatura e/ou pressão) na destilação e massa (diferenças de solubilidade a solventes) na desasfaltação a propano, conforme será explicado a seguir.

### 2.2.1.1 Destilação

A destilação é um processo físico de separação baseado na diferença de pontos de ebulição entre os componentes coexistentes numa mistura líquida. Os pontos de ebulição dos hidrocarbonetos aumentam com o crescimento dos seus pesos moleculares. Dessa forma, variando-se as condições de aquecimento do petróleo, é possível vaporizar compostos leves, intermediários

e pesados, que ao se condensarem, podem ser separados. É um processo extremamente versátil e muito usado no refino.

A destilação pode ser feita em diversas etapas a diferentes níveis de pressão, conforme o objetivo que se deseje. Pode-se ter a destilação atmosférica ou a vácuo, quando se trata de uma unidade de destilação de petróleo bruto. Neste caso, as frações básicas do refino são o gás combustível, o gás liquefeito, a nafta, o querosene, o óleo diesel, o gasóleo de vácuo e o resíduo de vácuo. Seus rendimentos são variados, em função do petróleo processado.

A unidade de destilação de petróleo existe sempre em toda refinaria, independente de qual seja o esquema de refino existente. É o principal processo, a partir do qual os outros são alimentados. Precisa de alto investimento e o tempo de retorno de capital é elevado quando comparado com os obtidos pelos outros processos do refino.

#### 2.2.1.2 Desasfaltação

Este processo tem por objetivo extrair, por ação de um solvente, um gasóleo de alta viscosidade contido no resíduo de vácuo. A produção deste gasóleo, impossível por meio da destilação, torna-se viável com a utilização de um solvente apropriado.

Como subproduto da extração, obtém-se o resíduo asfáltico, que, conforme o tipo de resíduo de vácuo processado e as condições operacionais pode ser enquadrado como asfalto ou como óleo combustível de alta viscosidade.

Não é um processo caro e, num contexto global do refino, ele traz flexibilidade e lucratividade a refinaria.

## 2.2.2 PROCESSOS DE CONVERSÃO

Ao contrário dos processos de separação, estes processos apresentam natureza química e visam transformar uma fração em outra (s), ou alterar a constituição molecular de uma dada fração, sem transformá-la em outra. Assim os produtos que saem destes processos, se misturados, não reconstituem a carga original pois ocorrem profundas alterações químicas.

As reações específicas de cada processo são conseguidas por ação conjugada da temperatura e da pressão, sendo bastante freqüente a presença de um agente promotor da reação, denominado catalisador. Conforme a presença ou ausência deste agente estes processos classificam-se em catalíticos e não catalíticos.

Os principais processos catalíticos são o craqueamento, o hidrocraqueamento, a alcoilação, a reforma e a isomerização. Dentre os não catalíticos o principal é o coqueamento retardado.

Os processos de conversão normalmente são de elevada rentabilidade, principalmente quando transformam frações de baixo valor comercial em outras de maiores valores.

### 2.2.2.1 Craqueamento Catalítico

O craqueamento catalítico é um processo de desintegração molecular. Sua carga é, principalmente, o gasóleo de vácuo, que submetido a altas temperaturas e pressões em presença de um catalisador, é decomposto em várias frações mais leves, produzindo gás combustível, gás liqüefeito, gasolina, óleo diesel de craqueamento e óleo combustível.

Ele surgiu um pouco antes da Segunda Guerra Mundial, tomando um notável impulso durante o conflito, devido à grande necessidade de gasolina. Com o fim da guerra, o craqueamento catalítico firmou-se, devido principalmente à sua

capacidade de produção de gasolina, em maior quantidade e qualidade e com custos de produção inferiores a dos outros processos existentes na época.

Sua produção de gasolina é da ordem de 50 a 65% em volume em relação à carga processada. O segundo produto que aparece em maior proporção é o gás liqüefeito (GLP), com rendimento de 25 a 40 % em volume em relação à carga. Em menores quantidades tem-se também o óleo diesel de craqueamento (LCO), o óleo combustível de craqueamento (óleo decantado ou clarificado), o gás combustível e o gás ácido ( $H_2S$ ).

O craqueamento catalítico é um processo de grande versatilidade e de elevada rentabilidade, embora requeira alto investimento para sua implantação. O tempo de retorno é bem menor que o da destilação.

#### 2.2.2.2 Hidrocraqueamento Catalítico

O hidrocraqueamento catalítico também é um processo de quebra de moléculas existentes numa carga de gasóleo de vácuo por ação conjunta do catalisador, altas temperaturas e pressões e de grandes volumes de hidrogênio. Ao mesmo tempo em que ocorrem as quebras acontecem também reações de hidrogenação do material produzido.

Este processo surgiu na década de cinqüenta, cresceu nos anos sessenta, atingindo seu apogeu no início dos anos setenta, pouco antes da crise do petróleo. Com o aumento do preço do óleo, de seus derivados e do preço do gás natural, principal matéria-prima para obtenção do hidrogênio, seu preço também se elevou, afetando sua rentabilidade. Assim, houve retração da implantação de novas unidades em todo mundo.

Sua grande vantagem é a versatilidade, já que pode operar com vários tipos de carga, desde nafta até resíduos, obtendo como resultado desde gasolina até gasóleo para craqueamento.

Outra vantagem é a qualidade das frações no que concerne às contaminações. Com as severas condições em que ocorrem as reações, praticamente todas as impurezas oriundas das frações do petróleo, como compostos de enxofre, nitrogênio, oxigênio e metais, são radicalmente reduzidas ou eliminadas.

A grande desvantagem deste processo consiste nas drásticas condições operacionais do mesmo. As pressões e temperaturas usadas são elevadíssimas, obrigando a se ter equipamentos caros e de grande porte. Há também a necessidade de implantar-se em paralelo uma grande unidade de geração de hidrogênio o que consome investimentos elevadíssimos.

### 2.2.2.3 Alcoilação Catalítica

A alcoilação consiste na junção de 2 moléculas leves para formação de uma terceira de maior peso molecular, reação esta catalisada por um agente de forte caráter ácido. Na indústria do petróleo este processo é usado para produção de gasolina a partir de componentes do gás liqüefeito de petróleo, utilizando como catalisador o ácido fluorídrico ou o ácido sulfúrico.

Além da gasolina (produto principal), são geradas pequenas quantidades de nafta pesada, de propano e de butano de alta pureza. A nafta pode ser utilizada na produção de gasolina. O propano e o butano podem ser incorporados ao gás liqüefeito de petróleo ou vendidos separadamente para usos especiais.

Não é um processo que requer grandes aportes de capital e pode ser largamente utilizado em países onde a demanda de gasolina é alta e há disponibilidade de gás liqüefeito de petróleo, matéria-prima essencial.

### 2.2.2.4 Reforma Catalítica

A reforma catalítica tem por objetivo principal transformar uma nafta de destilação em gasolina de excelente qualidade ou em produtos petroquímicos

como benzeno, tolueno e xileno. Produz também o gás liqüefeito de petróleo, o gás combustível, o gás ácido e uma corrente rica em hidrogênio. Essa última pode ser utilizada em unidades de hidrotreatamento catalítico que não necessitem de grandes vazões ou de elevada pureza de H<sub>2</sub>.

O catalisador utilizado é constituído de um suporte de alumina, onde está impregnado o elemento ativo, de natureza metálica, geralmente a platina associada a um ou dois outros elementos de transição. Embora a quantidade destes elementos nessa composição seja baixa, o custo do catalisador é extremamente alto devido ao preço destes metais.

A reforma catalítica surgiu também no início da Segunda Guerra Mundial, quando, ao lado do craqueamento catalítico, era a principal geradora de gasolina de boa qualidade.

O crescimento da indústria petroquímica, tendo a nafta como sua principal matéria-prima, elevou o preço desta fração, equiparando-a ao preço da gasolina. Isso afetou a rentabilidade do processo, que aumenta quando há produção de benzeno, tolueno e xileno.

#### 2.2.2.5 Coqueamento Retardado

O coqueamento retardado é, diferente dos outros processos descritos, um processo de craqueamento térmico, não catalítico.

Sua principal carga é o resíduo de vácuo, que, submetido a condições bastante severas, craqueia<sup>2</sup> moléculas de cadeia aberta e coqueia<sup>3</sup> moléculas

---

<sup>2</sup> decompõe termicamente hidrocarbonetos pesados em outros mais leves

<sup>3</sup> transforma em coque

aromáticas polinucleadas, resinas e asfaltenos, produzindo gases, nafta, diesel, gasóleo e coque de petróleo.

Ele surgiu logo após o fim da Segunda Guerra Mundial, com o objetivo de decompor resíduos para produzir uma quantidade maior de gasóleo para o craqueamento catalítico.

A crise do petróleo trouxe consigo uma crescente importância para o coqueamento, uma vez que é um processo que transforma uma fração bastante depreciada, como o resíduo de vácuo, em outras de muito maior valor comercial, como são o gás liquefeito de petróleo, a nafta, o óleo diesel e o gasóleo.

A possibilidade de transformar frações residuais em leves e médias conferiu ao processo outro “status”, em face principalmente da sua grande rentabilidade e flexibilidade operacional. Assim, o coqueamento, que caminhava para a inevitável obsolescência, teve sua importância revigorada.

Hoje é um processo sempre cogitado em qualquer estudo relativo a ampliações, modernizações ou implantações de novas refinarias.

O investimento necessário à implementação de uma unidade de coque é menor que os referentes aos processos de conversão catalíticos.

### 2.2.3 PROCESSOS DE TRATAMENTO E MISTURA

Os processos de tratamento e mistura tem por finalidade transformar as frações geradas nos processos de separação e conversão em produtos finais.

#### 2.2.3.1 Processos de Tratamento

Estes processos têm como função eliminar as impurezas presentes nas frações que possam comprometer a qualidade final dos produtos.

Dentre as impurezas removidas, os compostos de enxofre e de nitrogênio são os principais pois conferem às frações corrosividade, acidez, odor desagradável, formação de compostos poluentes, alteração de cor.

As quantidades e os tipos de impurezas presentes são bastante diferentes, variando também em função dos petróleos processados. Quanto mais pesados os cortes, maior a quantidade de impurezas e conseqüentemente a dificuldade para removê-las.

Os processos de tratamento podem ser classificados em duas categorias: convencionais (tratamento cáustico, tratamento cáustico regenerativo, tratamento Bender, tratamento DEA), aplicados às frações leves, de baixa severidade operacional e com baixo investimento para sua implantação e o hidroprocessamento (hidrotratamento catalítico), usado principalmente nas frações médias e pesadas, com necessidade de investimentos maiores.

#### Tratamento Cáustico

Consiste numa lavagem da fração com uma solução aquosa de Soda Cáustica ou Potassa Cáustica e com o objetivo de eliminar apenas compostos ácidos de Enxofre como o H<sub>2</sub>S e os mercaptanos de baixos pesos moleculares, presentes normalmente no gás liqüefeito de petróleo e na nafta de craqueamento.

A sua pequena aplicação e o seu elevado consumo de soda cáustica com correspondente elevado custo operacional tornou-o obsoleto.

#### Tratamento Cáustico Regenerativo

Consiste em lavagem cáustica também, porém com a vantagem da regeneração da soda cáustica consumida. Com isto várias unidades que operavam como tratamento cáustico sofreram adaptações e operam hoje como Tratamento Cáustico Regenerativo.

### Tratamento Bender

Foi desenvolvido para melhorar a qualidade do querosene de aviação. Não tem o objetivo de retirar compostos de enxofre mas transformar compostos sulfurados corrosivos em outras formas pouco agressivas. Nele conjugam-se lavagens cáusticas com ações de campos elétricos de alta voltagem

Por sua falta de eficiência quando o problema é proveniente dos compostos nitrogenados, este processo tende para a obsolescência.

### Tratamento com Di-Etanol Amina (DEA)

É específico para remoção de H<sub>2</sub>S de frações gasosas e do CO<sub>2</sub>. Sua grande vantagem consiste na regeneração da DEA com a produção de uma corrente gasosa rica em enxofre, que é aproveitada para a recuperação deste elemento nas Unidades de Recuperação de Enxofre.

### Hidrotratamento Catalítico

É um processo onde o agente responsável pela remoção das impurezas é o hidrogênio, atuando na presença de um catalisador com a finalidade de estabilizar ou eliminar compostos indesejáveis de certos cortes de petróleo. A estabilização é conseguida através da hidrogenação de compostos reativos como as mono-olefinas e diolefinas. Os elementos indesejáveis removidos são o enxofre, o nitrogênio, o oxigênio, halogênios e metais.

Ele pode ser empregado para todas as frações (gases, naftas, querosenes, gasóleos e resíduos de vácuo).

Atualmente o hidrotratamento catalítico está sendo muito utilizado principalmente para reduzir teores de enxofre dos derivados pois seus gases de queima são altamente poluentes e porque a produção de hidrogênio tornou-se mais econômica.

### 2.2.3.2 Processos de Mistura

A maioria dos produtos finais das refinarias é obtida com processos de mistura (“blendings”) que consistem simplesmente em mesclar produtos intermediários de forma a conseguir-se um produto com a qualidade requerida pelo mercado.

## 2.3 Qualidade e Especificação dos Produtos do Refino

A indústria mundial do petróleo, nos seus primórdios, controlava a qualidade de seus derivados pela escala de produção, a partir de poucas especificações sugeridas ou normalizadas por organismos controlados pelas próprias companhias de petróleo. Havia uma pequena variedade de produtos obtidos basicamente por destilação atmosférica.

Numa segunda etapa, o controle passou a ser feito pela necessidade da indústria consumidora, aumentando-se as especificações ditadas pela tecnologia dos equipamentos. Diversificaram-se os produtos que passaram a serem obtidos por processos de conversão de maior tecnologia com o objetivo de aumentar a produção de derivados leves de maior qualidade.

Atualmente o controle é exercido pela sociedade que se organizou através de códigos de consumidor e leis de proteção ambiental. Tornou-se necessário dispor de tecnologia que permitisse produzir derivados cuja utilização proporcionasse elevado desempenho conjugado com economia e com mínimo de agressão ao meio ambiente.

Os tipos e as características dos produtos derivados dependem do petróleo, matéria prima importante no atendimento das necessidades do mercado de derivados. A outra peça chave é a própria refinaria onde o petróleo é trabalhado de acordo com os processos nela existentes e seus possíveis esquemas de processamento.

Por meio da destilação, processo básico da refinação, obtém-se frações que serão misturadas a outras para compor o produto final (derivado). Chama-se “pool” ao conjunto de frações que fazem parte do derivado, as quais não necessariamente apresentam as mesmas propriedades, mas que devem produzir uma mistura com as características de qualidade desejadas no derivado do petróleo. À medida que se aprofunda a tecnologia dos processos químicos para produção de um derivado, maior é seu valor agregado.

Os derivados de petróleo compõem os seguintes grupos:

- Combustíveis,
- Petroquímicos,
- Solventes,
- Asfaltos e Coques e
- Lubrificantes Básicos e Parafinas.

### 2.3.1 COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis são os produtos de maior demanda e os de menor valor agregado da indústria do petróleo. Seus principais derivados são:

- Gás Liquefeito de Petróleo
- Gasolina
- Querosene de Aviação
- Óleo Diesel
- Óleo Combustível

### 2.3.1.1 Gás Liquefeito de Petróleo

O gás liquefeito de petróleo (GLP) pode ser separado das frações mais leves do petróleo ou das mais pesadas do gás natural, sendo composto essencialmente de hidrocarbonetos com três e quatro átomos de carbono.

À pressão atmosférica e temperatura ambiente é um produto gasoso. Nas condições de armazenamento e transporte encontra-se na fase líquida.

É altamente volátil, possui alto poder calorífico e boa octanagem, por isso pode ser queimado em motores de combustão interna, ciclo Otto, (boa octanagem e baixas emissões). Também é utilizado na petroquímica para a produção de borrachas e polímeros.

É largamente conhecido como “gás de cozinha”, devido à sua principal aplicação na cocção de alimentos, estimada em torno de 90% da demanda brasileira. É utilizado também como combustível industrial, principalmente para segmentos especiais como a indústria de vidros, cerâmica e a alimentícia. Algumas aplicações requerem produtos mais puros (ricos em propano ou em butano) como o corte e o tratamento térmico de metais.

A queima do GLP produz baixas emissões de CO, SOx e partículas, quando comparada a outras queimas (de gasolina, de óleo diesel ou de óleo combustível), implicando em menor poluição atmosférica e agressão ao meio ambiente.

O GLP pode ser produzido por diversos processos, sendo que o mais importante é o craqueamento catalítico. Outras formas de produção são as Plantas de Gás Natural, a Destilação Atmosférica, a Coqueificação, a Alcoilação e a Reforma.

### 2.3.1.2 Gasolina

A gasolina é um combustível constituído basicamente por hidrocarbonetos e, em menor quantidade, por produtos oxigenados. Estes hidrocarbonetos são formados por moléculas de menor cadeia carbônica (normalmente de 4 a 12 átomos de carbono). Sua faixa de destilação varia de 30 a 220°C.

Além dos hidrocarbonetos e dos oxigenados, a gasolina contém compostos de enxofre, de nitrogênio e metálicos, todos eles em baixas concentrações.

Ela é utilizada em motores de combustão interna de ignição por centelha, como automóveis, caminhonetes, motocicletas e pequenas embarcações e seus requisitos de qualidade são:

- entrar em combustão sem detonar, aumentando o rendimento do motor;
- vaporizar-se adequadamente, garantindo as necessidades de recebimento de combustível do motor desde a partida até a plena carga;
- não produzir resíduos de combustão nem oxidação para não haver formação de depósitos e entupimento do motor;
- não ser corrosiva ou poluente, evitando desgastes do motor e danos ambientais;
- produzir combustão limpa, com baixa emissão de partículas e poluentes;
- propiciar segurança no manuseio.

As propriedades necessárias para atendimento dos requisitos são:

- combustão: índice de octano, indicador da facilidade de queima sem detonação;

- volatilidade: indicativo da vaporização do produto, não deve haver excessos ou deficiências (a gasolina deve apresentar um conteúdo de frações leves, médias e pesadas).

Este produto é seguramente o derivado de petróleo para o qual foi desenvolvido o maior número de processos, objetivando aumento de produção e melhoria da qualidade. Sua produção pode ser feita a partir de produtos leves como butanos, iso-buteno e iso-pentano ou de frações mais pesadas como gasóleos e resíduos de vácuo. Dificilmente todos os processos são encontrados em uma mesma refinaria.

Por ter um grande mercado consumidor, ela provoca grande impacto ao meio ambiente, principalmente nas grandes cidades. Por isso, os refinadores, pressionados pelas exigências de qualidade e de meio ambiente, estão sempre desenvolvendo formas alternativas de produção e novas formulações de misturas. Assim, a sua formulação pode utilizar diversas correntes nobres oriundas do processamento do petróleo como nafta leve (obtido da destilação direta do petróleo), nafta craqueada (obtida da quebra de moléculas mais pesadas), nafta reformada (obtida de um processo que aumenta a quantidade de substâncias aromáticas) e nafta alquilada (de um processo que produz iso-parafinas de alta octanagem a partir de iso-butanos e olefinas).

### 2.3.1.3 Querosene de Aviação

Este é um combustível com faixa de destilação intermediária entre a gasolina e o óleo diesel, utilizado na aviação civil e militar.

O crescimento da aviação civil aumentou a demanda de querosene, trazendo impactos na indústria do petróleo.

A gasolina era adequada, mas foi abandonada, por sua elevada demanda para a indústria automotiva, sua baixa densidade (maiores volumes mesma capacidade energética) e o maior risco de incêndio. Usou-se, para a aviação,

inicialmente, o querosene iluminante pois é semelhante à gasolina, mas com menor risco de incêndio e com maior disponibilidade.

Com o desenvolvimento da aviação a jato tornou-se evidente a necessidade de um combustível com facilidade de escoamento a baixas temperaturas e de reacender em grandes altitudes, com combustão limpa e baixa energia radiante. Essas características elegeram um derivado médio do petróleo, intermediário entre a nafta e o gasóleo leve atmosférico ideal para jatos, que se denominou querosene de aviação (QAV).

Os aviões mais modernos otimizam sua operação, trabalhando a maiores temperaturas, buscando a redução de consumo de combustível. Isto tem aumentado as exigências de estabilidade térmica do QAV para evitar a produção de depósitos indesejáveis e conseqüentemente o entupimento de filtros. Outra característica importante do combustível é não agredir materiais utilizados na fabricação da aeronave, metais como alumínio, ferro, cobre, prata, magnésio ou borrachas utilizadas nas vedações.

Assim, as exigências de qualidade do QAV de turbinas aeronáuticas são:

- proporcionar autonomia de vôo;
- produzir chama cujos efeitos de radiação e fuligem não sejam danosos à câmara de combustão;
- ser facilmente atomizado;
- ser estável química e termicamente, produzindo chama limpa;
- escoar a baixas temperaturas;
- proporcionar partidas fáceis e seguras;
- reacender facilmente com mínimo de perda;

- não produzir resíduos, goma e depósitos em geral;
- ser não corrosivo aos materiais componentes do avião;
- não solubilizar em água;
- ser de manuseio seguro.

Os processos de produção necessários para garantir essas qualidades variam com o tipo de petróleo usado. As formas possíveis são:

- destilação atmosférica;
- destilação atmosférica e tratamento Bender;
- destilação atmosférica e hidrotratamento catalítico.

#### 2.3.1.4 Óleo Diesel

É um derivado do petróleo de faixa de destilação entre 22° e 380°C, utilizado em máquinas movidas por motores que funcionam segundo o ciclo Diesel, em motores marítimos e em aquecimento doméstico.

As primeiras máquinas Diesel foram usadas apenas em embarcações marítimas e em unidades de geração de energia fixas por serem muito pesadas e grandes. O interesse da indústria automotiva por tais máquinas, a partir de 1920, provocou o seu aperfeiçoamento, reduzindo seu peso e tamanho e aumentando sua velocidade. A qualidade do combustível precisou alterar-se para acompanhar essas melhorias. Os seus requisitos atuais são:

- ter boa ignição;
- proporcionar uma queima limpa e completa, com o mínimo de resíduos, depósitos e cinzas;

- ser não corrosivo e nem produzir gases tóxicos e corrosivos;
- ser facilmente atomizado para ter boa mistura com o ar;
- escoar a baixas temperaturas;
- não conter água nem sedimentos;
- proporcionar segurança e ser de fácil estocagem.

O óleo diesel é, no Brasil, o derivado combustível de maior demanda do petróleo, com valores considerados extremamente elevados internacionalmente. Este desequilíbrio no perfil de consumo deve-se ao modelo de transporte adotado (o rodoviário) e leva a demanda de óleo diesel para cerca de 40% do petróleo processado enquanto para a gasolina esse valor é de cerca de 18% (1). Esse quadro é exatamente o inverso do contexto mundial.

A produção de óleo diesel no Brasil é baseada principalmente no processo de destilação atmosférica. Complementa-se esta produção com correntes produzidas no craqueamento catalítico e no coqueamento retardado e processadas no hidrotreatamento catalítico.

### 2.3.1.5 Óleo Combustível

Este derivado é composto de uma mistura de óleos residuais, cujo principal componente é o resíduo da destilação a vácuo. A esta matéria-prima básica são agregados óleos residuais sem outra aplicação específica e destilados para atuarem como redutores de viscosidade.

Os óleos combustíveis são utilizados na geração de energia para fornos industriais e caldeiras. Sua demanda varia bastante de região para região e

com a época do ano, podendo atingir cerca de 12% em relação ao volume de petróleo processado.

Os principais requisitos de qualidade são:

- ser facilmente atomizado para proporcionar melhor mistura com o ar e conseqüentemente a combustão mais completa possível;
- não conter sedimentos inorgânicos ou orgânicos para não haver depósitos e obstrução de passagem nos queimadores;
- escoar perfeitamente a baixas temperaturas, sem cristalizar nas tubulações;
- oferecer segurança no manuseio e transporte, sem risco de explosões;
- proporcionar a máxima geração de energia térmica;
- ter mínima geração de combustão tóxicos ou corrosivos aos equipamentos.

### 2.3.2 PETROQUÍMICOS

Estes produtos, como benzeno, resíduo aromático e nafta petroquímica são utilizados como matéria-prima de outros produtos de grande uso no cotidiano. O benzeno, por exemplo, é usado na fabricação de monômero de estireno que, após polimerizado, resulta no poliestireno de largo uso na indústria de plástico. Já o resíduo aromático é destinado à fabricação do negro de fumo, largamente utilizado na fabricação de pneumáticos. A nafta petroquímica, maior representante dos petroquímicos, obtida no processo de destilação, é consumida nas centrais petroquímicas como matéria-prima para a fabricação de uma série de produtos entre os quais o propeno e o etileno, que, por sua vez, destinam-se à produção de polietileno e polipropileno.

### 2.3.3 SOLVENTES

A utilização de hidrocarbonetos derivados do petróleo como solventes na indústria moderna vem aumentando bastante nas últimas décadas.

A composição química dos solventes é muito variada, podendo ser divididos em alifáticos e aromáticos.

Os primeiros são obtidos através da destilação de naftas leves e pesadas, destacando-se a aguarrás (utilizado para "limpeza em geral") e os diluentes de tintas.

Os segundos são oriundos da reforma catalítica, sendo bastante utilizados na indústria de tintas e vernizes. Os principais representantes são o tolueno e o xileno.

### 2.3.4 ASFALTOS E COQUES

São produzidos a partir de resíduos pesados oriundos principalmente da destilação á vácuo.

#### 2.3.4.1 Asfalto

O asfalto é um dos materiais mais antigos empregados pelo homem. Antes mesmo que se sonhasse trafegar por uma moderna rodovia, ele já vinha sendo usado na Mesopotâmia - em 3.800a.C., tanto na construção de estradas quanto de capas de impermeabilização, em tanques e depósitos de água. Foi também usado para embalsamar corpos no Egito e para vedar barcos e construir estradas na Roma antiga. Mas foi após a exploração em larga escala de poços de petróleo e a aplicação de técnicas mais aprimoradas de refino que se passou a contar com produtos de alta qualidade para produção de ligantes asfálticos.

Hoje, a maior parte dos asfaltos produzidos é utilizada em serviços de pavimentação. Porém, também é utilizado como matéria-prima nas indústrias de mantas asfálticas aplicadas como impermeabilizantes na construção civil, adesivos para fitas de polietileno anticorrosivas, mastiques, etc.

Independente da sua utilização, seu principal componente é o resíduo de vácuo ou aquele obtido do processamento do resíduo de vácuo na desasfaltação.

#### 2.3.4.2 Coque

É um produto sólido e negro, constituído essencialmente de carbono (90 a 95%), obtido por coqueamento de resíduos pesados, e que queima sem deixar cinzas. É utilizado na metalurgia e na indústria de cerâmica, na fabricação de eletrodos de carvão para dínamos nos abrasivos de grafite e nos pigmentos para tintas. Quando sua qualidade não é adequada a nenhuma dessas aplicações, ele passa a ser combustível sólido.

#### 2.3.5 LUBRIFICANTES BÁSICOS E PARAFINAS

São constituídos essencialmente de hidrocarbonetos e sua composição está diretamente relacionada a composição do petróleo. Apenas alguns petróleos são produtores de óleos lubrificantes básicos e parafinas. Ambos produtos têm faixa de destilação imediatamente seguinte a do óleo diesel e do gasóleo. Os processos de obtenção são a destilação a vácuo e tratamentos dos resíduos da destilação a vácuo.

##### 2.3.5.1 Lubrificantes Básicos

Os óleos lubrificantes básicos são usados na formulação de óleos lubrificantes automotivos, industriais, óleos marítimos e ferroviários e na produção de graxas lubrificantes.

### 2.3.5.2 Parafinas

As parafinas estão presentes em vários produtos - até na goma de mascar. Elas são usadas na fabricação de velas (principal mercado consumidor e de forte sazonalidade) , madeiras (aglomerados), ceras polidoras, fósforos, filmes fotográficos, impermeabilização de embalagens, industrialização de papéis, indústria têxtil, arroz parbolizado, explosivos, pneus e borrachas, embalagens para alimentos, vaselinas industriais e medicinais (pomadas), moldes para prótese dentária, agricultura (na proteção de frutas e sementes), indústrias de cosméticos, etc.

São vários os tipos de parafinas comercializados e, dependendo de seu uso, podem ser adquiridos em tablete e a granel.

## 2.4 Conclusões

Na década de 60, a economia mundial estava em crescimento, os preços de petróleo e derivados eram estáveis e o custo de energia baixo. O petróleo era barato e o refino era uma atividade bastante lucrativa. As refinarias não variavam seus perfis de produção e suas operações. Os gargalos operacionais eram o suprimento de petróleo e a capacidade de processamento das refinarias.

Importantes mudanças ocorreram desde então, dentre as quais, destacam-se:

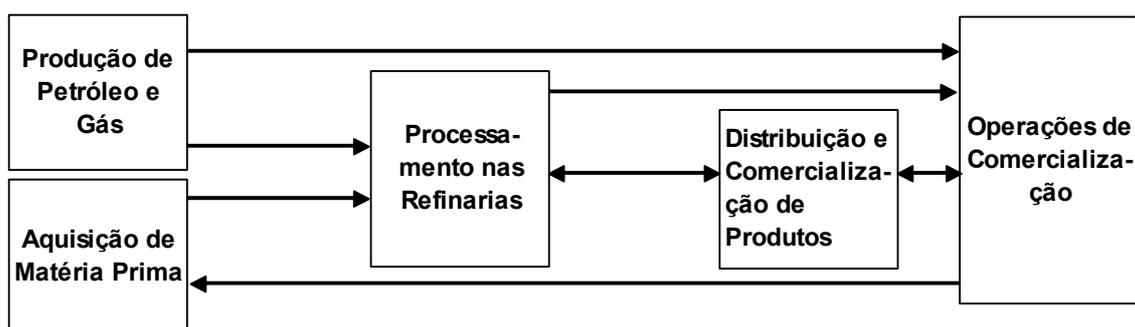
- Aumentos no preço do óleo em 1973 e 1979 que levaram consumidores e refinarias a tomarem medidas para melhorar a eficiência do consumo de energia, crescendo o interesse pela exploração de óleo e de outras fontes de energia, dando mais complexidade às operações nas refinarias.
- Mudanças no mercado de cru pois várias outras fontes de petróleo passaram a ser exploradas e comercializadas mundialmente.

- Mudanças no mercado de derivados por conta dos requisitos de qualidade dos produtos exigidos pelos consumidores.
- Preocupação ambiental que provocou a regulamentação rígida das operações de produção, transporte e manuseio .
- Dinâmica crescente de mercado.
- Incertezas maiores e prolongadas, se comparadas com as da década de 60, em relação aos preços de petróleo e derivados, taxas de câmbio, etc.

Todas estas mudanças fizeram com que a indústria do petróleo, como tantas outras, passasse a ser comandada pelos interesses do mercado.

Assim, refinarias antes preocupadas apenas em operar com cargas máximas, começaram a considerar outras variáveis como regulamentações de governo, necessidades específicas do mercado e posicionamento competitivo e principalmente a trabalhar de forma integrada para otimizar toda a cadeia logística da indústria do petróleo.

Figura 2.2: Cadeia Logística da Indústria do Petróleo



Na figura 2.2 mostra-se o lugar das refinarias na cadeia logística desta indústria.

Nesta figura observa-se que o processamento nas refinarias afeta a distribuição e comercialização do produto como em qualquer outra indústria.

Por outro lado o processamento das refinarias depende muito das operações de comercialização que determinam as aquisições e vendas de matéria prima, petróleo e gás e interferem no perfil de produção das refinarias pois este é orientado de acordo com importações e exportações de derivados.

As refinarias caracterizam-se então, como indústrias de grande flexibilidade onde uma matéria prima pode gerar diferentes produtos de acordo com os interesses do negócio.

Neste capítulo descreveram-se os processos de separação e conversão que desmembram e convertem o petróleo em produtos intermediários. Estes processos têm maleabilidade para operar de várias formas, cada uma com diferentes rendimentos de produtos intermediários. Existe maleabilidade também no destino destes intermediários que, conforme já foi visto, podem ser tratados ou misturados e transformarem-se em componentes de mais de um produto.

A partir do momento em que se coloca a refinaria integrada na cadeia logística, consegue-se tirar grandes vantagens da elasticidade do perfil de produção para melhor atender as demandas do mercado. Essa agilidade aumenta bastante a complexidade da tomada de decisões em relação às atividades a serem realizadas pelas refinarias e pelos outros integrantes dessa cadeia logística, ampliando a importância do processo de planejamento em toda a cadeia.

No capítulo a seguir serão apresentados aspectos do processo de planejamento, relacionando-os com as operações de uma refinaria.

### **3 O PLANEJAMENTO OPERACIONAL NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO**

Após ter sido mostrado no capítulo anterior o local ocupado pelas refinarias na cadeia logística integrada do petróleo e a complexidade dos processos nelas desenvolvidos, fica evidenciada a importância fundamental que adquire o planejamento das operações destas instalações. Este planejamento será objeto deste capítulo.

#### **3.1 A rede logística do petróleo e seu planejamento**

Quando se fala em rede logística do petróleo refere-se ao suprimento de matéria prima das plantas de produção de petróleo e gás para as refinarias e à distribuição dos produtos obtidos nessas refinarias para comercialização. Neste contexto, o papel da logística é produzir os fluxos de materiais certos, nos tempos certos, com o uso efetivo e eficiente das instalações.

Claramente, a determinação das quantidades, qualidades e prazos de fornecimento de matéria primas, a programação das operações diárias das refinarias e da distribuição dos produtos fazem parte do processo de planejamento das operações logísticas, e conseqüentemente, a aquisição de matéria prima, o processamento nas refinarias, a distribuição e comercialização dos produtos estão diretamente relacionadas com este planejamento conforme já foi comentado no capítulo 2 (figura 2.2).

A aquisição de matéria prima é decidida em função das previsões de mercado feitas pelo departamento comercial (qualidade e quantidade dos derivados), das capacidades de processamento disponíveis nas refinarias, terminais e modais de transporte e das ofertas de matéria prima (preço, qualidade e quantidade) . A partir destas definições é feita a programação de compra e de entrega de matéria prima às refinarias.

Determinados as matérias primas e os mercados das refinarias, estas detalham as cargas a serem processadas em cada uma das suas unidades, as quantidades e qualidades dos produtos finais e intermediários a serem produzidos e estocados, respeitando as suas restrições físicas, as restrições dos processos, as restrições das especificações dos produtos e as restrições ambientais.

De posse dessas informações, o departamento logístico programa a transferência e a distribuição das matérias primas e produtos entre as refinarias e os mercados. A figura 3.1 reproduz estes fluxos.

As matérias primas (petróleo e gás) normalmente são transportadas pelos modais dutoviário ou marítimo. Os produtos finais (derivados) são retirados das refinarias e encaminhados aos terminais e bases pelos modais dutoviário, ferroviário, rodoviário, marítimo e fluvial.

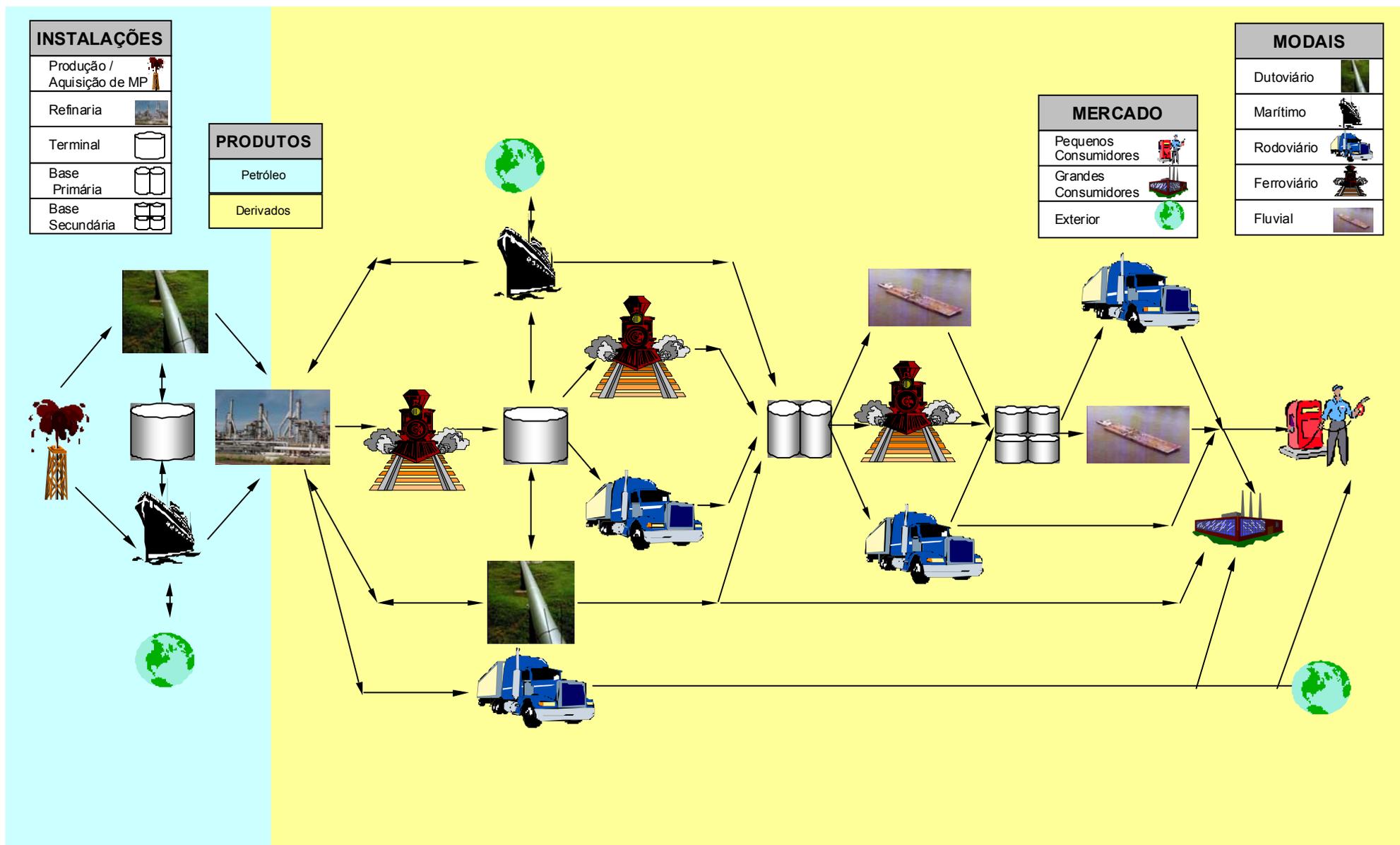
Os terminais têm a função de armazenar, tratar e transferir matérias primas e produtos para outros destinos. As bases primárias recebem os derivados das refinarias ou dos terminais, enviando-os às bases secundárias, que por sua vez distribuem os produtos aos consumidores.

A figura 3.2 mostra a complexidade da rede logística da indústria do petróleo no Brasil.

Esta rede é composta de 13 refinarias, 3 petroquímicas, 54 terminais, 73 bases primárias e secundárias, cerca de 15000 km de dutos, além de rodovias, ferrovias e hidrovias.

Destes componentes, fazem parte do Sistema Petrobrás 11 das 13 refinarias, os terminais e os dutos.

Figura 3.1: Fluxos Logísticos na Indústria do Petróleo





### 3.1.1 O PLANEJAMENTO OPERACIONAL E A UTILIZAÇÃO DE MODELOS

O planejamento operacional de uma empresa ou módulo industrial é responsabilidade dos níveis organizacionais encarregados das operações e tem como principal objetivo atingir suas metas de curto prazo.

Essas metas devem estar em concordância com as estabelecidas pelos dois níveis de planejamento que antecedem o planejamento operacional (Bowersox (12)), quais sejam:

- o planejamento estratégico onde se definem os objetivos e política da organização de forma ampla e no longo prazo (de 5 a 20 anos) e
- o planejamento tático onde se definem metas para os objetivos do nível anterior, que são detalhados com horizontes menores (de 1 a 5 anos), e incluem-se os recursos financeiros, de equipamentos e de mão de obra necessários.

No planejamento operacional são definidos as atividades e os meios necessários para suas execuções, num horizonte que pode ser desde poucos dias até muitos meses.

Para Ballou (4), o planejamento operacional de organizações produtivas deve determinar onde, como, quanto e quando produzir. Ele considera que, com a capacidade de produção limitada e geograficamente dispersa (como é o caso da indústria do petróleo), fornecer mercadorias certas no instante e local necessários para a manufatura é crítico, e portanto, a programação do fluxo de materiais é uma das principais decisões neste nível de planejamento.

Hartmann (19), quando descreve os diferentes níveis de planejamento faz questão de separar o planejamento operacional das operações da programação destas operações. Ele diferencia estes níveis de planejamento em função dos seus objetivos e das questões que cada um pretende

responder. Para ele, o planejamento estratégico tem como objetivo a definição do negócio e a principal questão é “o que fazer?”. No planejamento operacional é importante fazer o detalhamento econômico da empresa e a questão é “como fazer?”. Já na programação das atividades do planejamento operacional o objetivo é viabilizar essas atividades e a principal questão é “quando fazer?”.

Isto implica na necessidade de utilizar-se diferentes modelos e técnicas no apoio ao planejamento operacional e à programação das atividades operacionais, dado que as questões a serem respondidas são diferentes.

As técnicas usadas na solução destes modelos geralmente caem nas categorias de otimização e / ou simulação.

Um modelo de otimização consta de uma função-objetivo a ser maximizada ou minimizada, sujeita a restrições que caracterizam o problema e que restringem os possíveis valores que as variáveis envolvidas podem assumir. Existem diversas técnicas de solução que são utilizadas segundo o tipo de problema com que se está trabalhando. Essas técnicas são a programação linear (PL), a programação linear inteira, a programação não linear, a programação dinâmica e outras.

No caso de planejamento operacional na indústria do petróleo, tem-se observado que a literatura técnica sobre o assunto (Bodington (10), Hartmann (18, 19, 20) e Liebermann (22)) aponta para o emprego da programação linear.

Todos esses autores ressaltam a grande complexidade da indústria do petróleo em comparação com indústrias cuja linha de produção tem um produto principal e alguns subprodutos.

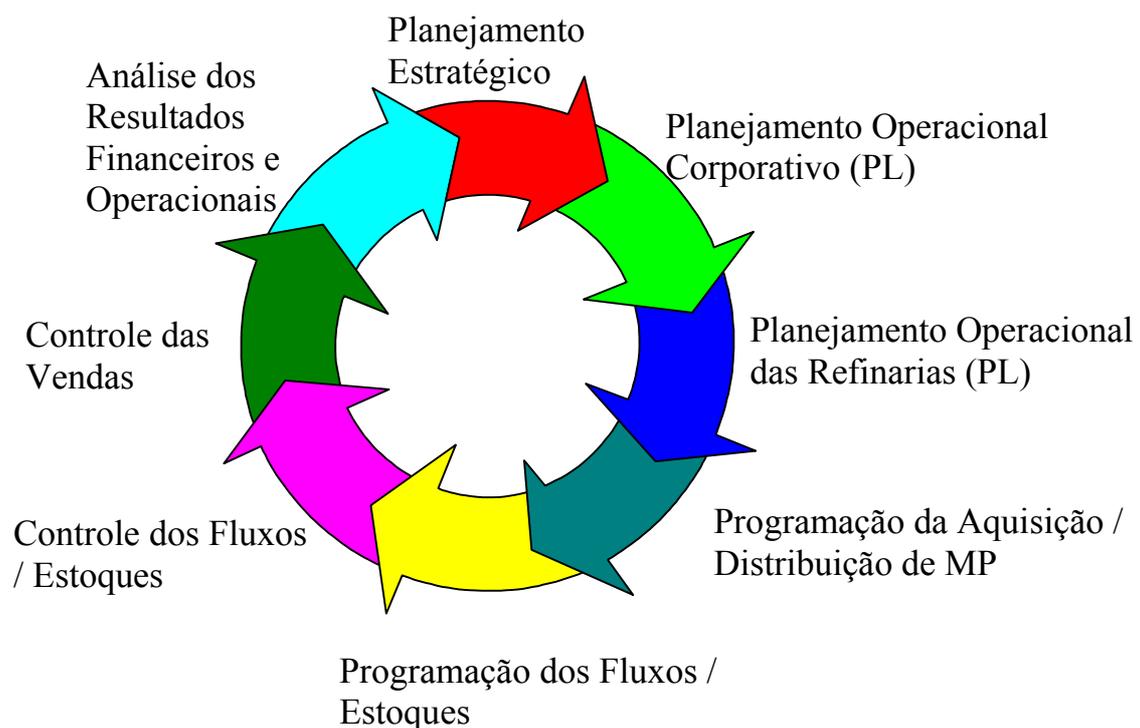
Ao descrever essa complexidade, Hartmann (18) associa os fluxos envolvidos na indústria do petróleo a uma teia cheia de nós, onde cada nó representa a necessidade de uma tomada de decisão frente a um grande número de possibilidades e recomenda a aplicação da PL, pois ela é indicada exatamente

quando se deseja escolher a melhor possibilidade entre várias e têm-se limitações de recursos.

Para o autor, o principal benefício da técnica não é a definição da melhor combinação de atividades operacionais do empreendimento, mas uma avaliação de como as restrições modeladas interferem na escolha da solução. Essa avaliação indica as áreas nas quais a gerência deve dirigir sua atenção e orienta na eliminação de gargalos para melhorar os resultados.

Klingman (24) e Bodington (10) preocupam-se com a integração entre as diversas atividades da indústria e seus diferentes níveis de planejamento (do estratégico até a programação das atividades) e enfatizam que essa integração precisa estar refletida nos diversos sistemas e modelos utilizados nessas instâncias, situando o planejamento operacional e a PL dentro de um ciclo que vai do planejamento estratégico da companhia até a análise dos resultados obtidos (figura 3.3).

Figura 3.3: Ciclo Integrado da Rede Logística na Indústria do Petróleo



A Petrobrás, referendando a literatura e a prática nesse tipo de indústria, também utiliza a PL como ferramenta básica para seu planejamento operacional.

Como uma empresa integrada, ela necessita de um planejamento operacional corporativo onde são estabelecidas as atividades operacionais a serem desenvolvidas por suas unidades operacionais (11 refinarias, 8 bases de distribuição, 15 terminais e uma malha dutoviária de aproximadamente 1000 km), de forma a garantir que os objetivos do planejamento tático e estratégico (ambos corporativos) sejam alcançados.

Para tal desenvolveu um programa, PLANAB com cerca de 5000 equações e 7000 variáveis, que representam as restrições consideradas relevantes relacionadas aos mercados de cada produto e de cada região, às capacidades de cada processo de cada refinaria e de cada terminal, às disponibilidades de matérias primas. A função-objetivo representa o custo global do abastecimento do país que deve ser minimizado.

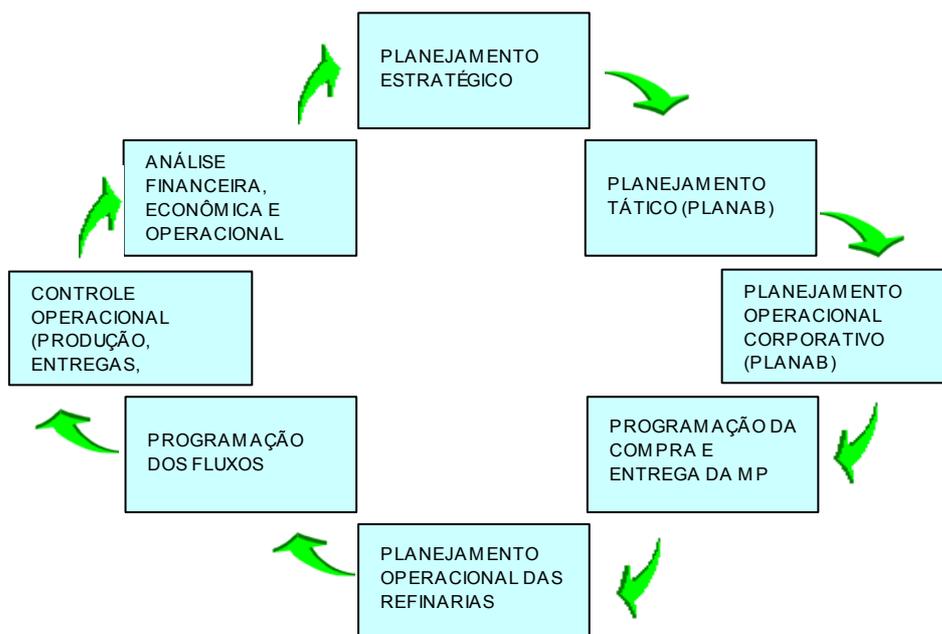
As informações necessárias para o planejamento operacional corporativo, fornecidas pelo modelo, são:

- Quantidades de matérias-primas e derivados a serem compradas por tipo;
- Custos de importação;
- Quantidades de derivados e petróleo a serem exportados por tipo;
- Receita de exportação;
- Utilização das unidades de processo (destilação, desasfaltação, craqueamento catalítico, coqueamento retardado, reforma catalítica, hidrotreatamento catalítico) por refinaria;

- Distribuição das matérias primas entre as refinarias;
- Distribuição dos mercados de derivados entre as refinarias;
- Tabela com valores marginais de petróleos.

As informações referentes às refinarias são utilizadas por elas para detalhar seus planejamentos operacionais, conforme será abordado no próximo item. A figura 3.4 mostra o relacionamento do planejamento operacional corporativo e do planejamento operacional das refinarias no ciclo integrado da Petrobrás.

Figura 3.4: Ciclo Integrado da Petrobrás



### 3.2 O Planejamento Operacional das Refinarias e a Programação Linear

No item anterior foi mostrada a complexidade da rede logística da indústria do petróleo e do seu planejamento operacional corporativo, principalmente quando

o número de unidades operacionais é grande e a companhia trabalha integrada.

Essa complexidade do sistema pode resultar na utilização de modelos corporativos muito grandes e confusos. Para reduzir o tamanho desses modelos e facilitar o entendimento das soluções são adotadas simplificações que auxiliam a tomada de decisões corporativas em tempo hábil. Essas simplificações, no entanto, podem deixar lacunas quanto a definição de algumas das atividades operacionais das unidades.

Assim, definido o planejamento operacional corporativo, cada refinaria confecciona o seu planejamento incluindo o detalhamento necessário. Este detalhamento pode implicar em um maior número de variáveis e restrições e na utilização de programação não linear ou outra técnica que seja conveniente às atividades do órgão.

Bodington (10) e Eppen (14) apresentam estudos de casos com grandes companhias de petróleo que confeccionam seu planejamento operacional corporativo com o uso da PL e o planejamento operacional das refinarias com o uso da programação não linear, principalmente em função da modelagem da qualidade de produtos intermediários e finais.

Hartmann faz ressalvas à utilização da PL quando o objetivo do usuário é obter um plano de produção que considere programação de atividades e estocagem de produtos já que:

- a técnica precisa que todas as atividades ocorram simultaneamente em um só período e que cada componente identificado esteja disponível para ser segregado ou processado separadamente, o que na maior parte das vezes não é possível nas refinarias;

- a inclusão de todas as qualidades dos produtos necessárias para fazer a programação dos fluxos aumenta o número destes fluxos exponencialmente;
- nem todas as qualidades de produtos podem ser modeladas linearmente.

Mas ele não descarta o uso da PL no planejamento operacional de refinarias. Ao contrário, ele a considera uma excelente ferramenta quando o interesse não é só obter um planejamento das atividades, mas também análises dos problemas acarretados pelas restrições e limitações de capacidade do sistema para eliminar ou diminuir gargalos e melhorar os resultados econômicos.

Muitas empresas de petróleo utilizam a programação linear no planejamento operacional de suas refinarias. Esta técnica auxilia no estabelecimento das atividades físicas da(s) refinaria(s) e calcula seus resultados (balanços de massa, qualidade de produtos, déficits, utilização de unidades). Durante a definição das operações ótimas, valores econômicos da(s) refinaria(s) são desenvolvidos pelo algoritmo que calcula continuamente valores marginais:

- de todos os fluxos da(s) refinaria(s);
- de custos para atingir a especificação de vários produtos;
- de lucro de matérias primas e produtos;
- dos adicionais de capacidade de processamento das unidades.

Estes valores marginais representam a variação da função-objetivo caso houvesse alterações nas restrições do modelo. Com isso, é possível graduar a importância de relaxar-se ou não cada uma das limitações impostas ao mesmo.

A Petrobrás também utiliza a PL no planejamento operacional de suas refinarias. As informações definidas no planejamento corporativo são

encaminhadas às refinarias que detalham e checam a viabilidade das operações planejadas. Para isso, as refinarias da Petrobrás vêm utilizando, desde 1997, um aplicativo chamado “Process Industry Modeling System” – “Pims”, que com a programação linear trata da ordem de 500 equações e 650 variáveis que representam o problema de uma refinaria qualquer.

A aplicação do programa “Pims” dá como respostas as seguintes informações:

- custos e receitas totais e o lucro (função-objetivo);
- quantidade, composição e qualidade de todos os produtos fornecidos;
- quantidade e composição da matéria prima processada por cada unidade de processo;
- utilização das unidades de processo;
- déficits e excedentes de produtos finais e intermediários;
- valores marginais das diversas restrições (de aquisição de matéria prima, de processamento nas unidades, de especificação e mercado dos produtos).

O principal papel dos planos de produção das refinarias na sistemática do planejamento da Petrobrás é fornecer a quantidade e a qualidade dos produtos a serem produzidos e estocados nas refinarias no período. A definição das matérias primas a serem processadas e dos mercados a serem atendidos, bem como análises das restrições do sistema, foram feitas no planejamento corporativo. Às refinarias cabe checar a viabilidade deste planejamento e, no caso de ocorrência de não conformidades (falta de matéria-prima, quebra de equipamentos, etc.), adequá-lo rapidamente a nova realidade.

É exatamente nesse tipo de utilização da PL no planejamento operacional que Hartmann recomenda cuidado. Esse maior interesse pelos fluxos físicos leva a negligenciar as informações econômicas (os valores marginais), mesmo quando elas mostram desvios absurdos. Essa falta de preocupação com os valores marginais vem da dificuldade de interpretá-los. Essa dificuldade, por sua vez, aumenta com a falta de transparência e com a complexidade da modelagem. Uma das causas da falta de transparência é a recursividade.

### 3.2.1 RECURSIVIDADE

No capítulo 2 foi visto que os produtos do refino são obtidos da mistura de diversas correntes em um tanque. As qualidades destes produtos variam com a qualidade destas correntes. Mas, conforme já foi explicado naquele capítulo, a qualidade destas correntes depende da composição dos petróleos que as geraram. Num modelo de planejamento operacional de refinaria, essa composição está entre as variáveis não conhecidas inicialmente. Por isso este problema não pode ser descrito exclusivamente por equações lineares.

Três diferentes formas de resolver essa dificuldade podem ser adotadas:

- desconsiderar a qualidade das correntes e não se segregar as mesmas, o que significa uma grande simplificação em relação à situação real;
- fazer a segregação de todas as correntes considerando a qualidade de cada uma delas. Essa alternativa leva a um aumento do número de variáveis e do número de parâmetros do modelo além de gerar uma solução muito diferente da realidade, pois tal segregação não é possível em refinarias.
- resolver a questão executando a PL seqüencialmente. A solução da primeira aplicação, contendo uma composição de petróleos definida, é usada como ponto de partida para a próxima, até chegar-se num critério de convergência. Isto é a recursividade.

As três formas são utilizadas pela Petrobrás no planejamento corporativo. O equacionamento do Planab contempla as duas primeiras formas e permite a aplicação da terceira pelo usuário.

Já o “Pims” não comporta a segregação de todas as correntes pois isso levaria a modelos muito maiores que os atualmente utilizados e comportados pela ferramenta. A não segregação pode ser utilizada, comprometendo-se, porém, os objetivos esperados na utilização do aplicativo.

O Manual do Usuário do “Pims” (9) revela que o aplicativo utiliza a recursão, internamente no programa, para resolver problemas de não linearidade em mistura de produtos, obtendo uma solução otimizada após o atendimento de critérios de convergência, acrescentando porém que esta recursão pode levar a convergência para um ótimo local em detrimento do ótimo global.

Os modelos “Pims” que servem de apoio aos planos das refinarias da Petrobrás usam a recursividade recomendada pelo fabricante do software, não oferecendo portanto a garantia que a solução obtida seja a solução ótima. Além disso, aumentam as dificuldades para interpretar as respostas fornecidas por esses modelos, principalmente os valores marginais. Na maioria dos casos, esses valores marginais são desconsiderados quando da elaboração dos planos de produção das refinarias. se eles forem inconsistentes vão transferir suas inconsistências para as atividades determinadas pelos modelos sem que as incoerências sejam identificadas.

### **3.3 Conclusões**

Os modelos “Pims” utilizados na Petrobrás enfatizam a obtenção de atividades físicas próximas do real e por isso apresentam recursividades na maioria das vezes que os produtos são misturados antes do seu processamento, estocagem ou retirada da refinaria.

Entretanto, o uso excessivo de recursividades dificulta a análise do modelo e conseqüentemente reduz a confiança do usuário no mesmo. Essa confiança diminui ainda mais quando há ocorrência de não conformidades e pouco tempo para estudar a nova otimização das variáveis de decisão.

O uso da PL em tais situações, quando o importante é avaliar rapidamente as conseqüências de mudanças e agir no sentido de atenuar os prejuízos, comum nas operações das refinarias do sistema Petrobrás, pode ser questionado. Ela não é a ferramenta adequada para se avaliar relações de causa / efeito na refinaria. Sempre que uma nova corrida é submetida com uma simples modificação em um rendimento, propriedade ou preço, o algoritmo pode trazer uma solução bem diferente, com mudanças em muitas variáveis para atingir um novo ótimo.

Também é importante enfatizar que, no caso da Petrobrás, cada refinaria tem muito pouca liberdade para tomada de decisões, dado que os parâmetros importantes são definidos no planejamento corporativo.

No próximo capítulo será analisado o potencial da modelagem “What-if” (simulação determinística) como ferramenta de apoio ao planejamento operacional de uma refinaria, incluindo a sua capacidade de interação com um sistema que apresenta modificações ao longo do tempo que devem ser tratadas de forma dinâmica, tendo em vista os importantes desvios que elas podem acarretar no planejamento prévio.

## **4 A MODELAGEM “WHAT-IF” NO PLANEJAMENTO OPERACIONAL DE REFINARIAS - SIMULAÇÃO DETERMINÍSTICA**

Da mesma forma que o capítulo anterior focou o uso da programação linear no planejamento operacional de refinarias, aqui a atenção se volta para a modelagem “What-if”.

A modelagem “What-if” não busca criar uma solução mas sim tornar mais claras as possíveis conseqüências de um conjunto de decisões, o que propicia o uso da simulação na sua formulação pois ela é uma ferramenta avaliadora de soluções e não geradora de soluções.

A técnica simulação teve origem na década de 50 para resolver problemas na área militar. Nas décadas seguintes do século XX sua utilização expandiu-se, auxiliada pelo grande desenvolvimento alcançado no âmbito da informática, tanto em nível de “hardware” quanto de “software”, para outras áreas como a de manufatura e a de serviços.

Banks (6) relata aplicações dessa técnica realizadas na produção e controle de estoques (planejamento, programação e controle dos fluxos de material) de diversas indústrias.

Borges (11), estudando a aplicação da simulação na logística, faz referência à sua utilização na análise dos fluxos de produtos através das instalações, respondendo questões sobre níveis de estoque, níveis de produção e programação dos fluxos de distribuição física.

### **4.1 Vantagens e Desvantagens do Uso da Simulação**

Algumas das vantagens do uso da simulação são:

- A realidade pode ser representada com total liberdade na construção dos modelos que compõem a simulação , não havendo necessidade de simplificações e / ou aproximações como no caso da programação linear;
- O processo de modelagem é dinâmico, podendo começar com modelos simples e ir evoluindo na medida que as peculiaridades do processo sob estudo vão sendo identificadas;
- A resposta às modificações é instantânea permitindo que o usuário perceba melhor a influência que variáveis e dados exercem uns sobre os outros;
- Permite a identificação de gargalos operacionais;
- Há facilidade de comunicação com o usuário;
- Podem ser obtidas soluções aproximadas rapidamente, úteis para a tomada de decisões quando o problema tem regras que mudam da “noite para o dia”.

Entre as desvantagens da técnica tem-se a dificuldade da programação e validação dos modelos e a interpretação dos resultados, todas elas não exclusivas da simulação propriamente dita, pois estão presentes em maior ou menor grau em todas as técnicas de apoio à tomada de decisão.

Uma desvantagem específica do uso da simulação é esta não gerar soluções ótimas mas apenas auxiliar na avaliação de soluções dos diversos cenários introduzidos.

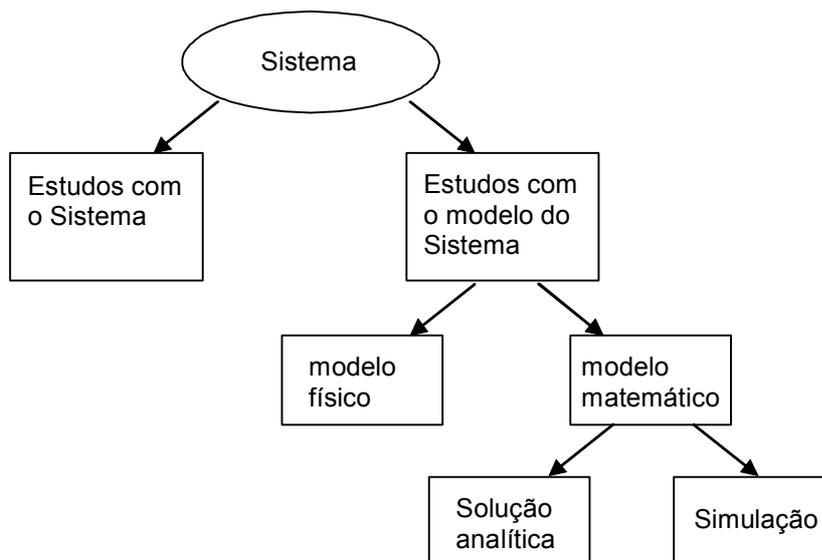
## **4.2 Sistemas e os modelos de Simulação**

Um sistema é uma coleção de entidades que agem e interagem entre si para atingir um objetivo comum. A definição de sistema, e conseqüentemente das entidades que o compõem, depende dos objetivos desejados no estudo. Então,

o sistema é descrito por um conjunto de variáveis relacionadas com os objetivos desejados e que formam o estado do sistema em um determinado momento.

Os sistemas podem ser discretos ou contínuos. São discretos quando as variáveis que o compõem mudam instantaneamente em certos tempos (número de tanques de petróleo recebendo matéria prima) e são contínuos quando elas mudam continuamente com o tempo (carga processada em uma unidade). Dificilmente um sistema é composto somente por um dos tipos, mas geralmente um deles predomina, o que permite a classificação do mesmo.

Figura 4.1: Formas de Estudo de um Sistema



Fonte: Kelton (23) Figura 1.1

Os estudos dos sistemas têm como objetivo entender seus relacionamentos e prever suas respostas a novas condições de contorno. A figura 4.1 mapeia as diferentes formas de estudo de um sistema.

Os estudos feitos diretamente no sistema reduzem bastante a preocupação com a validação dos resultados, mas dificilmente eles são possíveis física ou

economicamente. Assim, geralmente, há necessidade de construção de um modelo que o represente, que normalmente é matemático, quando se trata de análises gerenciais e de engenharia. Se o sistema for simples, o modelo matemático pode ser resolvido de forma analítica, utilizando relacionamentos e variáveis que permitem a obtenção de uma solução analítica. Com o aumento da complexidade, surge a necessidade de se realizar simulações onde são apresentadas questões ao modelo e avaliados seus efeitos nos resultados.

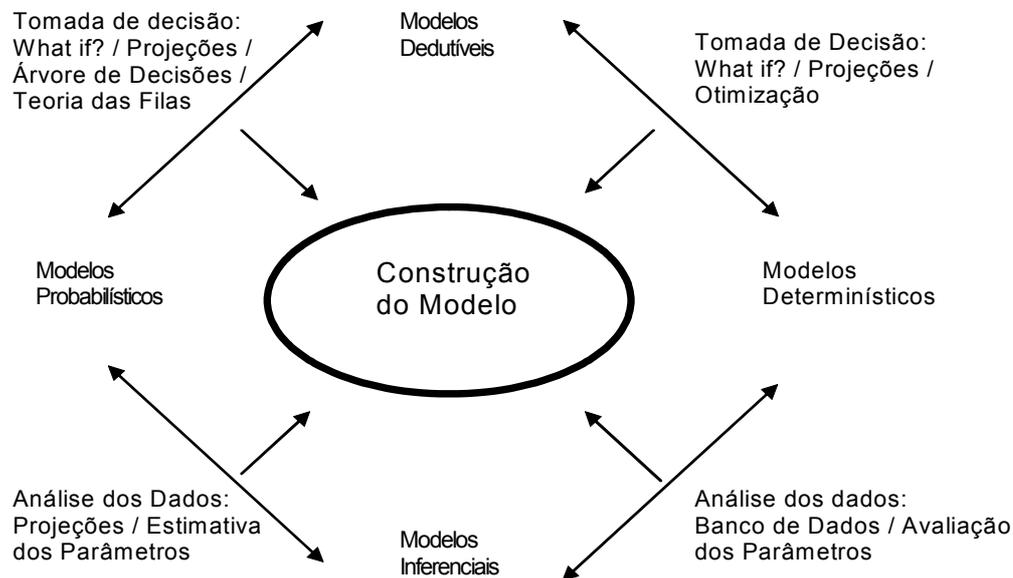
Como os sistemas, os modelos de simulação também podem ser classificados de diferentes maneiras. Assim, um modelo pode ser:

- determinístico ou estocástico – quando as variáveis que o compõem forem de um ou outro tipo;
- estático ou dinâmico – quando o modelo sofre alterações ao longo do tempo é dinâmico, caso contrário é estático;
- discreto ou contínuo – se suas variáveis variam de forma discreta ou contínua ao longo do tempo.

Eppen (14) apresenta 2 tipos de classificação dos modelos: determinísticos ou estocásticos e dedutíveis ou inferenciais. Os modelos dedutíveis são aqueles que valorizam o relacionamento matemático e tendem a serem pobres em dados, enquanto que os inferenciais são ricos em dados e valorizam a exatidão, a precisão e a disponibilidade destes dados. Ao apresentar essas 4 classificações o autor frisa que nenhuma situação enquadra-se totalmente em uma delas e que o processo de modelagem é interativo e pode alterar-se a medida que o modelo é utilizado e refinado, conforme mostra a figura 4.2.

Na elaboração de modelos de simulação são utilizados os seguintes elementos para a descrição do comportamento dos sistemas:

Figura 4.2: Processo de Construção de Modelos



Fonte: Eppen (14). Figura 1.7

- Variáveis – informações necessárias para definir o que acontece com um sistema num dado momento. Por exemplo: a quantidade processada de um produto em uma unidade de uma refinaria;
- Entidades – objetos que requerem uma definição. São os agentes dinâmicos da simulação que se movem pelo modelo afetando e sendo afetadas por outras entidades ou pelo próprio sistema;
- Atributos – ou parâmetros, são as características individuais de cada entidade, apresentando valores específicos para cada uma, o que permite diferenciá-las;
- Recursos – elementos capazes de restringir a movimentação das entidades do modelo. Os recursos são alocados às entidades e não o contrário. Eppen (14), ao definir os elementos necessários para construção de um modelo,

classifica os recursos como um tipo de atributo, consideração que também será utilizada neste trabalho.

### **4.3 A Simulação no Planejamento Operacional de Refinarias**

Ballou (4) recomenda a escolha da simulação em casos onde a descrição de detalhes do sistema seja um fator essencial, ou onde o problema possua variáveis estocásticas ou quando a solução otimizada obtida para o problema não seja possível de ser implementada.

Segundo Saliby (31), a simulação determinística está tendo maiores aplicações práticas pois ela está sendo mais utilizada em processos contínuos como a operação de refinarias.

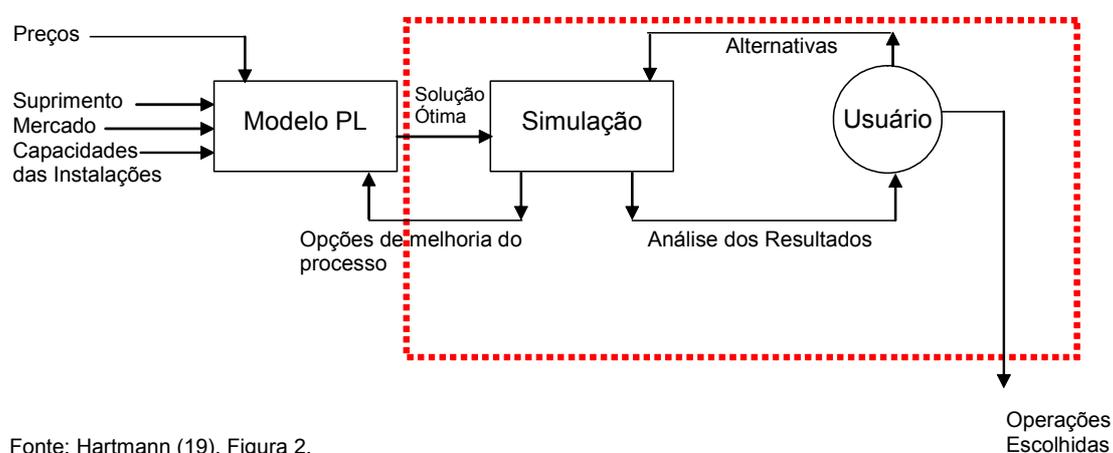
Teixeira (33) aplica a simulação determinística na modelagem de um plano de produção de refinaria e faz referência à sua flexibilidade e facilidade para obter aderência da modelagem à realidade. O objetivo do seu trabalho foi trabalhar a interface com o usuário. Ela comenta que, com a simulação, o usuário percebe melhor a influência que os dados e variáveis exercem uns nos outros e no resultado – “o enfoque do modelo de simulação é físico e não matemático (como no caso da PL), o que leva o usuário a ter uma visão mais clara do problema”. Ela não deixa de ressaltar que a solução obtida, neste caso, não é ótima.

Hartmann (18, 19), analisando as vantagens e desvantagens da simulação, sugere a sua utilização na modelagem do planejamento operacional de refinarias associada a um modelo otimizante (figura 4.3). Ele comenta que as maiores vantagens de construção do modelo com essa técnica são o fato de permitir a utilização de equações não lineares (importante para a caracterização das correntes e especificação dos produtos nas operações de mistura) e o fato de permitir a avaliação do resultado da segregação de correntes não contempladas no modelo em PL. Ele também faz referência à importância de análises tipo “what-if” para estudar os efeitos de cada variável

no resultado, criando alternativas à solução ótima, principalmente quando ocorrem não conformidades.

Tanto Hartmann quanto Teixeira reputam à simulação um aumento de agilidade e de clareza no processo de planejamento das operações de uma refinaria.

Figura 4.3: Interação do Modelo de Simulação com o Modelo Otimizante



Fonte: Hartmann (19). Figura 2.

Hartmann (19) apresenta um estudo de caso numa refinaria na África do Sul onde o uso de um modelo de PL, considerando segregação de muitas correntes, levou a decisões erradas dado que a refinaria tinha pouca flexibilidade para segregação. O autor defende o uso da simulação em conjunto com a PL (conforme figura 4.3) como saída para equacionar esse tipo de problema.

O modelo corporativo da Petrobrás apresenta situações simplificadas, onde são desconsideradas questões de qualidade e segregação de correntes e outras onde há excesso de segregações. Os modelos locais ("Pims") utilizam a recursividade para caracterizar as correntes não segregadas. Enquanto as alternativas para equacionar o problema da segregação, no modelo corporativo, não retratam a realidade, as dos modelos locais dificultam o

entendimento da solução para a tomada de decisão. O sinergismo defendido por Hartmann pode ser aplicado no processo de planejamento operacional da Petrobrás, acoplando-se a ele um modelo de simulação para planejar as operações locais da refinaria.

#### **4.4 Conclusões**

Neste capítulo abordou-se a utilização da modelagem “What-if” (simulação determinística) no planejamento das operações de refinarias, tendo em vista a técnica ter sido recomendado por alguns autores.

Do ponto de vista deste estudo, a diferença fundamental entre a programação linear e a simulação é o fato da primeira ser uma técnica para encontrar soluções e a segunda ser uma técnica que permite visualizar facilmente as conseqüências das decisões. Uma não precisa ser alternativa da outra, elas podem ser complementares como no caso do processo de planejamento operacional de uma empresa de petróleo.

No caso da Petrobrás, enquanto o planejamento corporativo utiliza a PL (encontra as soluções), o planejamento local da refinaria pode aplicar a simulação, viabilizando e detalhando as soluções fornecidas pela Corporação, avaliando com rapidez as conseqüências de novas tomadas de decisões (contingências).

No próximo capítulo será proposto um procedimento que usa a modelagem “What-if” no apoio ao planejamento operacional de uma refinaria.

## **5 O PROCEDIMENTO PROPOSTO**

### **5.1 Introdução**

Para ser efetiva, uma simulação deve satisfazer exigências concernentes ao conteúdo e algumas à aparência.

Em relação ao conteúdo devem ser consideradas todas as etapas do processo que está sendo representando – assim, no caso das refinarias, deve incluir características da comercialização, do suprimento, dos processamentos nas unidades de separação, conversão, tratamento e mistura e especificações dos produtos.

A quantidade de informações é pequena se comparada com o banco de dados do modelo em programação linear, pois este deve conter dados de todas as opções possíveis de serem consideradas (matérias primas, mercados , etc.), enquanto a simulação detém apenas determinados dados selecionados.

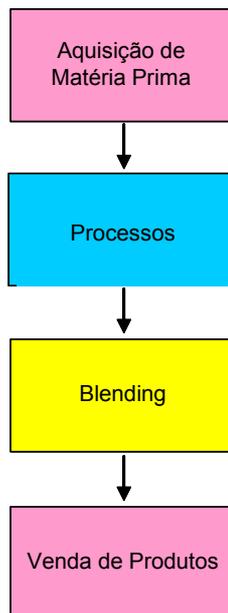
Em relação à aparência esta deve ser tal que as relações de causa efeito ao longo do processo sejam transparentes para que erros nos dados e na lógica de modelagem sejam facilmente detectados.

### **5.2 Formulação Conceitual**

O fluxograma da figura 5.1 a seguir representa, de forma macro, o problema a ser tratado pela simulação.

A aquisição de matéria prima e a venda de produtos são operações externas à refinaria (comercialização) e são pré-definidas pela corporação.

Figura 5.1: Representação das Operações de Uma Refinaria



As variáveis envolvidas nestas operações são, respectivamente, os volumes dos petróleos e dos produtos intermediários adquiridos pela refinaria e os dos produtos vendidos pela mesma.

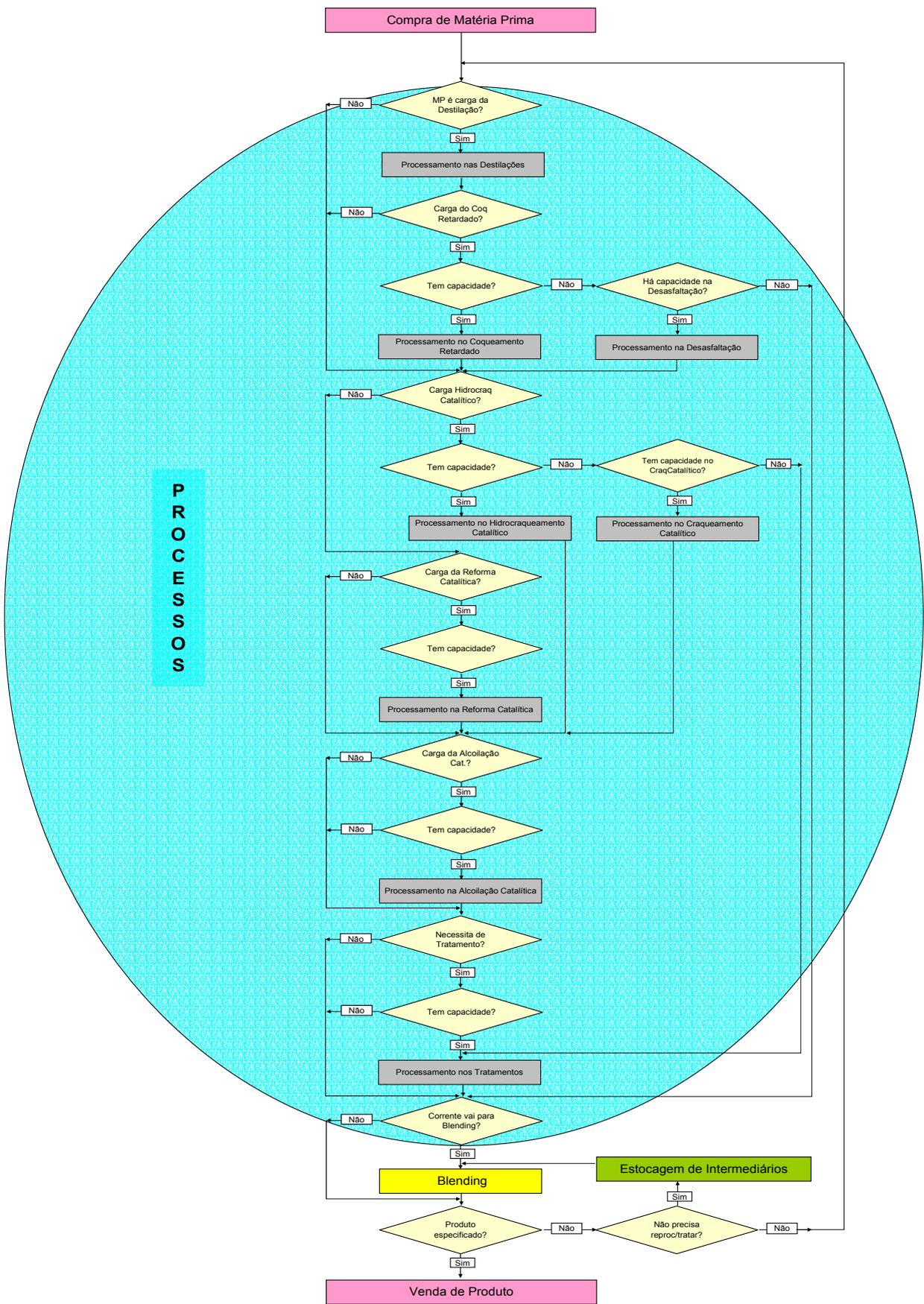
A variação da quantidade de matéria-prima adquirida é a principal variável independente a ser simulada pois acarreta modificações em todos os processos e produções.

A simulação apresenta restrições de volumes máximo e mínimo a serem adquiridos (matéria-prima) ou vendidos (produtos), que não devem conflitar com a expectativa da corporação quando da elaboração do planejamento operacional da refinaria.

Os processos e o “blending” são as operações que ocorrem na refinaria.

Na figura 5.2 mostram-se em detalhes os processos envolvidos em uma simulação de refinaria.

Figura 5.2: Fluxograma dos Processos de uma Refinaria



Estes processos ocorrem nas unidades de processamento que podem operar em diferentes tipos de campanhas (variação dos parâmetros operacionais).

As principais variáveis envolvidas nos processos são os volumes de matéria prima e produtos que entram e saem de cada uma das unidades de processo da refinaria. Essas quantidades de matéria-prima são determinadas pela refinaria em conformidade com definições corporativas e são fortemente dependentes do volume e tipo de petróleo comprado. Na modelagem elas são variáveis simuladas enquanto as produções são variáveis calculadas.

O processo destilação recebe nas suas unidades de processamento petróleos e entrega produtos intermediários que serão deslocados para outros processos ou para compor uma mistura para produção dos produtos finais.

Todos os outros processos têm como matéria-prima produtos intermediários que são transformados em outros produtos intermediários que por sua vez seguem para outros processos ou são convertidos em produtos finais.

Todas as cargas das unidades de processamento (petróleos e produtos intermediários) têm atributos que determinam as quantidades e qualidades dos produtos intermediários gerados por eles nestas unidades. Todas as unidades de processamento possuem restrições mínimas e máximas de carga.

As variáveis das operações de “blending” (misturas) são os volumes e as qualidades dos produtos intermediários que entram na composição de cada produto final fornecido ao mercado pela refinaria. Elas dependem muito das operações realizadas na etapa anterior e por isso podem ser bastante alteradas em função de modificações ocorridas nos processos.

Normalmente, as operações de mistura são determinadas ou detalhadas pela refinaria, que, conseqüentemente, tem liberdade para otimizá-las sem perder

de vista o atendimento dos mercados (especificações e quantidades) definidos pelo corporativo. Dentro da simulação tem um módulo de otimização onde as variáveis a serem otimizadas são os volumes dos produtos intermediários alocados aos produtos finais e as restrições são as especificações dos produtos finais a serem atendidos e os volumes mínimos e máximos de produtos finais a serem oferecidos ao mercado da refinaria.

### **5.3 Descrição da Modelagem**

A simulação foi construída utilizando o Excel com o Solver (otimizador). Ela é composta de 4 módulos integrados: um contendo a modelagem, outro a simulação propriamente dita, e dois com interfaces gráficas.

#### **5.3.1 A MODELAGEM**

O processo simulado é estático pois não há variação temporal das variáveis do problema e determinístico pois a mudança das variáveis não é aleatória mas determinística e definida pelos usuários.

Ele é composto, conforme todo modelo de simulação, por entidades, variáveis e atributos.

##### **5.3.1.1 Entidades**

As entidades deste modelo são:

- Unidade de processo (U)
- Tipo de operação ou campanha (C)
- Petróleo (O)
- Produto Intermediário (I)

- Produto Final (P)

### 5.3.1.2 Variáveis

As variáveis podem ser de um dos tipos seguintes: variáveis simuladas (determinísticas, dadas pelo usuário), variáveis a serem otimizadas (determinadas pelo modelo de otimização), e variáveis “conseqüência” (variáveis dependentes, calculadas a partir da definição das outras duas).

#### Variáveis Simuladas

- QDT (O,U,C): Volume de petróleo destilado (O) nas unidades de processo (U) na campanha (C).
- QPR (I,U,C): Volume do produto intermediário processado (I) na unidade de processo (U) (exceto destilação) na campanha (C).

#### Variáveis a Serem Otimizadas

- QBL (I,P): Volume do produto intermediário (I) transferido para o produto final (P);

#### Variáveis “Conseqüência”

- SPC (U): Massa específica da carga da unidade de processo (exceto destilação) (U);
- SUL (U): Teor de enxofre da carga da unidade de processo (exceto destilação) (U);
- PDT (I): Volume do produto intermediário (I) produzido na destilação;
- PPR (I): Volume do produto intermediário (I) produzido nas unidades de processo (exceto destilação);

- SPC (I): Massa específica do produto intermediário produzido (I);
- SUL (I): Teor de enxofre do produto intermediário produzido (I);
- IVI (I): Índice de Viscosidade do produto intermediário produzido (I);
- EST (I): Estoque do produto intermediário (I);
- PBL (P): Volume obtido por mistura do produto final (P);
- SPC (P): Massa específica do produto final obtido por mistura (P);
- SUL (P): Teor de enxofre do produto final obtido por mistura (P);
- IVI (P): Índice de Viscosidade do produto final obtido por mistura (P);
- OCT (P): Número de octanagem do produto final obtido por mistura (P).

### 5.3.1.3 Atributos

Foram subdivididos em 3 categorias: Coeficientes Tecnológicos, Coeficientes Econômicos e Recursos.

#### Coeficientes Tecnológicos

São as características relacionadas com os processos. Elas são:

- RDT (O,U,C,I): Rendimento volumétrico na destilação do produto intermediário (I) no petróleo (O) na unidade de processo (U) na campanha (C);
- SPC (O,U,C,I): Massa específica do produto intermediário (I) no petróleo (O) na unidade de processo (U) na campanha (C);

- SUL (O,U,C,I): Teor de enxofre do produto intermediário (I) no petróleo (O) na unidade de processo (U) na campanha (C);
- VIS (O,U,C,I): Viscosidade do produto intermediário (I) no petróleo (O) na unidade de processo (U) na campanha (C);
- RPR (I,U,I',C): Rendimento volumétrico do produto intermediário (I') obtido no processamento do produto intermediário (I) como carga da unidade de processo (U) na campanha (C);
- FSU (U,I,C): Fator de transferência do teor de enxofre da carga processada na unidade de processo (U) para o produto intermediário (I) produzido na campanha (C);
- SPC (U,I,C): Massa específica do produto intermediário (I) produzido na unidade de processo (U) na campanha (C);
- IVI (U,I,C): Índice de viscosidade do produto intermediário (I) produzido na unidade de processo (U) na campanha (C);
- OCT (I): Número de octanagem do produto intermediário (I);
- FOC (I): Fator de realce da octanagem do produto intermediário (I);
- SULmax (P): Especificação do teor de enxofre máximo no produto final (P);
- OCTmin (P): Especificação de número de octanagem mínima no produto final (P);
- IVImin (P): Especificação do índice de viscosidade mínimo no produto final (P);
- IVImax (P): Especificação do índice de viscosidade máximo no produto final (P).

### Coeficientes Econômicos

São atributos ligados á parte econômica da modelagem:

- PO\$ (O): Preço do petróleo (O);
- PP\$ (P): Preço do produto final (P);
- CD\$ (U): Custo operacional unitário das unidades de destilação;
- CP\$ (U): Custo operacional unitário das unidades de processamento (U) (exceto destilação).

### Recursos

São os atributos que restringem os valores assumidos pelas entidades.

- Volmin (O): Volume mínimo do petróleo (O) a ser processado;
- Volmax (O): Volume máximo do petróleo (O) a ser processado;
- CDTmin (U): Capacidade de destilação mínima das unidades de processo (U);
- CDTmax (U): Capacidade de destilação máxima das unidades de processo (U);
- CPRmin (U): Capacidade de processamento mínima da unidade de processo (U) (exceto destilação);
- CPRmax (U): Capacidade de processamento máxima da unidade de processo (U) (exceto destilação);

- MKCmin (P): Mercado mínimo do produto final (P) a ser atendido pela refinaria;
- MKCmax (P): Mercado máximo do produto final (P) a ser atendido pela refinaria.

#### 5.3.1.4 Equações de Balanço

Entende-se por equações de balanço aquelas representam o equilíbrio natural dos processos. Assim:

- O volume total destilado do petróleo (O) na unidade de processo (U) deve ser igual à soma dos volumes destilados do petróleo na unidade nas campanhas (C):

$$QDT(O,U) = \sum_C QDT(O,U,C)$$

- O volume total destilado na unidade de processo (U) deve ser igual à soma dos volumes dos petróleos (O) destilados na unidade:

$$QDT(U) = \sum_O QDT(O,U)$$

- O volume total destilado do petróleo (O) na refinaria deve ser igual à soma dos volumes destilados do petróleo nas unidades de processo (U):

$$QDT(O) = \sum_U QDT(O,U)$$

- O volume total destilado na refinaria deve ser igual à soma dos volumes totais dos petróleos (O) destilados:

$$QDT = \sum_O QDT(O)$$

- O volume total do produto intermediário (I) obtido na destilação deve ser igual à soma dos produtos dos volumes de petróleos destilados (O) nas unidades de processo (U) nas campanhas (C) pelos seus respectivos rendimentos volumétricos do produto intermediário:

$$PDT(I) = \sum_o \sum_u \sum_c QDT(O,U,C) * RDT(O,U,C,I)$$

- A massa específica do produto intermediário (I) obtido na destilação deve ser igual à média ponderada volumetricamente das massas específicas do produto intermediário produzido dos petróleos (O) nas unidades de processo (U) nas campanhas (C):

$$SPC(I) = (\sum_o \sum_u \sum_c QDT(O,U,C) * RDT(O,U,C,I) * SPC(O,U,C,I)) \div PDT(I)$$

- O teor de enxofre do produto intermediário (I) obtido na destilação deve ser igual à média ponderada em massa dos teores de enxofre do produto intermediário produzido dos petróleos (O) nas unidades de processo (U) nas campanhas (C):

$$SUL(I) = (\sum_o \sum_u \sum_c QDT(O,U,C) * RDT(O,U,C,I) * SPC(O,U,C,I) * SUL(O,U,C,I)) \div (PDT(I) * SPC(I))$$

- O índice de Viscosidade do produto intermediário (I) obtido na destilação deve ser igual à média ponderada volumetricamente do índice de viscosidade<sup>4</sup> do produto intermediário produzido dos petróleos (O) nas unidades de processo (U) nas campanhas (C):

---

<sup>4</sup> o índice de viscosidade é um artifício matemático para transformar a propriedade física viscosidade em uma propriedade aditiva volumetricamente. É dado por:  $IVI(x) = \ln(VIS(x) / \ln(VIS(x * 1000)))$

$$IVI(I) = (\sum_o \sum_u \sum_c QDT(O,U,C) * RDT(O,U,C,I) * IVI(O,U,C,I) ) \div PDT(I)$$

- O volume total processado nas unidades de processamento (U) (exceto destilação) deve ser igual à soma dos volumes dos produtos intermediários (I) processados na unidade nas campanhas (C):

$$QPR(U) = \sum_c \sum_I QPR(I,U,C)$$

- A massa específica da carga processada nas unidades de processamento (U) (exceto destilação) deve ser igual à média ponderada volumetricamente das massas específicas dos produtos intermediários processados na unidade nas campanhas (C):

$$SPC(U) = (\sum_I \sum_c QPR(I,U,C) * SPC(I) ) \div QPR(U)$$

- O teor de enxofre da carga processada nas unidades de processamento (U) (exceto destilação) deve ser igual à média ponderada em massa dos teores de enxofre dos produtos intermediários processados na unidade nas campanhas (C):

$$SUL(U) = (\sum_I \sum_c QPR(I,U,C) * SPC(I) * SUL(I) ) \div (QPR(U) * SPC(U) )$$

- O volume total do produto intermediário (I') obtido nas unidades de processamento (exceto destilação) deve ser igual à soma dos produtos dos volumes de produtos intermediários (I) processados nas unidades de processo (U) nas campanhas (C) pelos seus respectivos rendimentos volumétricos do produto intermediário produzido:

$$PRD(I') = \sum_I \sum_u \sum_c QPR(I,U,C) * RPR(I,U,I',C)$$

- A expansão ocorrida no produto intermediário (I) processado na unidade de processamento (U) (exceto destilação) deve ser igual ao somatório dos rendimentos volumétricos dos produtos intermediários (I') nesse produto :

$$EXP(U,I) = \sum_I RPR(I,U,I')$$

- O teor de enxofre do produto intermediário (I) produzido na unidade de processo (U) (exceto destilação) deve ser proporcional ao enxofre da carga processada nessas unidades:

$$SUL(U,I) = \sum_U FSU(U,I) * SUL(U)$$

onde FSU(U,I) é o fator de proporcionalidade para o produto intermediário I produzido na unidade U.

- O teor de enxofre do produto intermediário (I') produzido nas unidades de processo (exceto destilação) deve ser igual à média ponderada em massa dos teores de enxofre deste produto intermediário produzido nas unidades de processo (U):

$$SUL(I') = \sum_U SUL(U,I') * (\sum_I \sum_C QPR(I,U,C) * RPR(I,U,I',C) * SPC(U,I',C))$$

- O volume produzido por mistura do produto final (P) deve ser igual à soma das transferências ocorridas dos produtos intermediários (I) para o produto:

$$PBL(P) = \sum_I QBL(I,P)$$

- A massa específica do produto final (P) produzido por mistura deve ser igual à média ponderada volumetricamente das massas específicas dos produtos intermediários transferidos para ele:

$$SPC(P) = (\sum_I QBL(I,P) * SPC(I)) \div PBL(P)$$

- O teor de enxofre do produto final (P) produzido por mistura deve ser igual à média ponderada em massa dos teores de enxofre dos produtos intermediários transferidos para ele:

$$SUL(P) = (\sum_I QBL(I,P) * SPC(I) * SUL(I)) \div (PBL(P) * SPC(P))$$

- O índice de viscosidade do produto final (P) produzido por mistura deve ser igual à média ponderada volumetricamente do índice de viscosidade dos produtos intermediários transferidos para ele:

$$IVI(P) = (\sum_I QBL(I,P) * IVI(I)) \div PBL(P)$$

- O número de octanagem do produto final (P) produzido por mistura deve ser igual à média ponderada pelo fator de octanagem do número de octanagem dos produtos intermediários transferidos para ele:

$$OCT(P) = (\sum_I QBL(I,P) * OCT(I) * FOC(I)) \div (\sum_I QBL(I,P) * FOC(I))$$

- O estoque do produto intermediário (I) na refinaria deve ser igual à soma dos seus volumes produzidos nas unidades de processo menos os seus volumes processados nas unidades de processo e seus volumes transferidos para produtos finais:

$$EST(I) = PDT(I) + PPR(I) - \sum_U QPR(I,U) - \sum_P QBL(I,P)$$

- O custo operacional variável das unidades de destilação deve ser igual à soma dos produtos do volume total destilado nas unidades de processo (U) pelo custo operacional unitário das respectivas unidades:

$$CDT = \sum_U CD\$ (U) * QDT(U)$$

- O custo operacional variável das unidades de processo (exceto destilação) deve ser igual à soma dos produtos do volume total processado nas unidades de processo (U) (exceto destilação) pelo custo operacional unitário das respectivas unidades:

$$CPR = \sum_U CP\$ (U) * QPR (U)$$

- O custo da compra de petróleo deve ser igual à soma dos produtos do volume total destilado dos petróleos (O) pelos respectivos preços:

$$CCP = \sum_O PO\$ (O) * QDT (O)$$

- O custo variável total deve ser igual à soma dos dois custos operacionais variáveis e do custo da compra de petróleo:

$$CVT = CDT + CPR + CCP$$

- A receita da venda dos produtos finais deve ser igual à soma dos produtos do volume produzido dos produtos finais (P) pelos respectivos preços:

$$RVP = \sum_P PP\$ (P) * PBL (P)$$

### 5.3.1.5 Restrições

São imposições naturais do problema. Elas são:

- Todas as variáveis devem ser não negativas.
- O volume do petróleo (O) processado não pode ser maior que o máximo nem menor que o mínimo estabelecido:

$$VOL \min(O) \leq QDT(O) \leq VOL \max(O)$$

- A carga das unidades de destilação (U) não deve ultrapassar a capacidade máxima nem ser menor que a capacidade mínima destas unidades:

$$CDT_{\min}(U) \leq QDT(U) \leq CDT_{\max}(U)$$

- A carga das unidades de processo (U) (exceto destilação) não deve ultrapassar a capacidade máxima nem ser menor que a capacidade mínima destas unidades:

$$CPR_{\min}(U) \leq PR(U) \leq CPR_{\max}(U)$$

- O teor de enxofre do produto final (P) não deve ultrapassar a especificação de enxofre máximo do produto final (P):

$$SUL(P) \leq SUL_{\max}(P)$$

- O número de octanagem do produto final (P) não pode ser inferior à especificação do número de octanagem mínima do produto final (P):

$$OCT(P) \geq OCT_{\min}(P)$$

- O índice de viscosidade do produto final (P) não pode ser maior que o máximo nem menor que o mínimo estabelecido na especificação do índice de viscosidade do produto final (P):

$$IVI_{\min}(P) \leq IVI(P) \leq IVI_{\max}(P)$$

- O volume do produto final (P) produzido precisa ser menor que o mercado máximo do produto final (P) a ser atendido pela refinaria e maior que seu mercado mínimo:

$$MKC_{\min}(P) \leq PBL(P) \leq MKC_{\max}(P)$$

### 5.3.1.6 Função-Objetivo

A função-objetivo do problema considerado é o lucro total da refinaria que deverá ser maximizado.

Esse lucro pode ser representado pela diferença entre as receitas obtidas pela venda dos produtos aos mercados, (RVP), e os custos havidos com a produção dos mesmos, (CVT). Assim, busca-se:

$$\max (RVP - CVT)$$

### 5.3.2 A SIMULAÇÃO PROPRIAMENTE DITA

A partir da definição de valores para as variáveis simuladas (QDT (O,U,C) e QPR (I,U,C)) (cargas das unidades de processo), as quantidades e as qualidades dos produtos intermediários produzidos nestas unidades são calculadas e a otimização pode ser acionada. O modelo em PL irá considerar todas as quantidades e qualidades de produtos intermediários calculadas e obter a mistura deles que produza produtos finais que atendam o mercado da refinaria, tanto em volume quanto em especificações, gerando o máximo lucro possível para a refinaria.

A figura 5.3 mostra o painel de controle do modelo onde o usuário pode fazer modificações e acompanhar os cálculos e otimizações realizadas pelo modelo. As variáveis simuladas, (VS), estão em vermelho, as variáveis calculadas, (VC), em preto e as otimizadas, (VO), em verde. A alteração de qualquer uma das variáveis simuladas leva ao cálculo de novas produções, estoques e balanços e uma nova otimização deverá ser feita.

Figura 5.3: Painel de Controle

Petróleos e Produtos	Operações												Estoque	
	Compra	Unidades de Processos				Misturas (Blending)						Venda		
Petróleos	VC	VS												
	VC	VS												
	VC	VS												
	VC	VS												
Produtos Intermediários (Produção)	VC	VC	VC	VC	VC									VC
	VC	VC	VC	VC	VC									VC
	VC	VC	VC	VC	VC									VC
	VC	VC	VC	VC	VC									VC
	VC	VC	VC	VC	VC									VC
	VC	VC	VC	VC	VC									VC
	VC	VC	VC	VC	VC									VC
Produtos Intermediários (Carga)	VS	VS	VS	VS	VS	VO	VO	VO	VO	VO	VO			VC
	VS	VS	VS	VS	VS	VO	VO	VO	VO	VO	VO			VC
	VS	VS	VS	VS	VS	VO	VO	VO	VO	VO	VO			VC
	VS	VS	VS	VS	VS	VO	VO	VO	VO	VO	VO			VC
	VS	VS	VS	VS	VS	VO	VO	VO	VO	VO	VO			VC
	VS	VS	VS	VS	VS	VO	VO	VO	VO	VO	VO			VC
	VS	VS	VS	VS	VS	VO	VO	VO	VO	VO	VO			VC
Produtos Finais						VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC		
						VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC		
						VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC		
						VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC		
						VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC		
						VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC		
						VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC		
Balanco na Refinaria	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC	VC

### 5.3.3 INTERFACE GRÁFICA

A visualização dos resultados em gráficos facilita a tomada de decisões. Teixeira (33) comenta que alguns aplicativos, como o AIMMS da Paragon Decision Technology, permitem além da visualização dos resultados, a manipulação direta de dados e restrições, e conseqüentemente de resultados em gráficos. Outro exemplo são as planilhas Excel. Essas aplicações possibilitam o uso de gráficos na interface dos modelos.

Com relação aos tipos de gráficos, Teixeira lista os gráficos de linha, de barra e torta como os preferidos pela comunidade de negócios. A forma utilizada é função da natureza da informação.

O principal objetivo do gráfico de linha é enfatizar uma tendência, o fluxo de tempo e a taxa de mudança e não os valores efetivos.

O gráfico de barra não é apropriado para mostrar tendências mas é um dos mais adequados para enfatizar valores efetivos ou diferenças entre valores positivos e negativos.

A torta enfatiza a relação entre as partes e não os valores em si. Ela deve ser usada quando o número de categorias é pequeno e quando se deseja enfatizar uma delas por ser mais significativa.

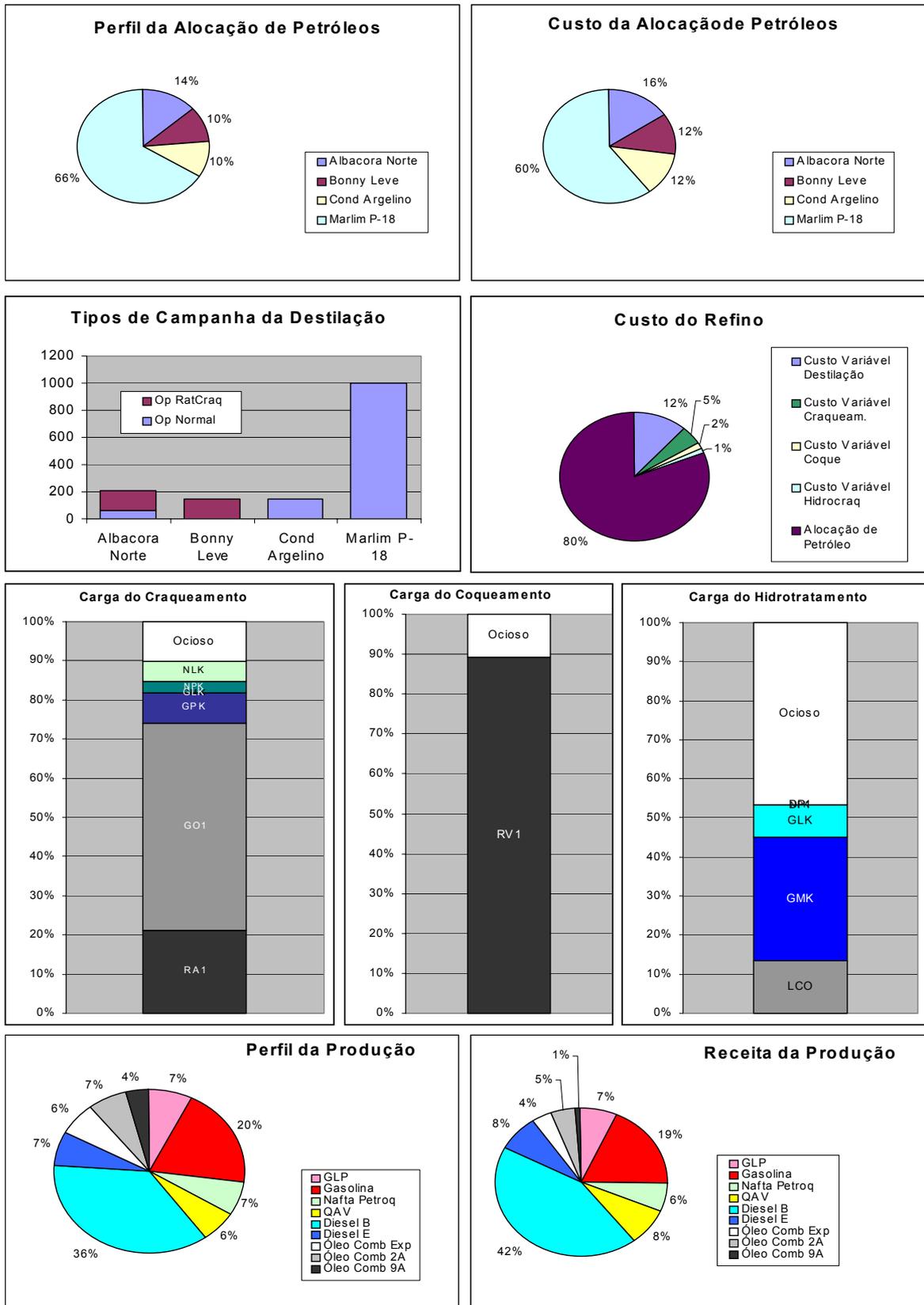
Neste trabalho serão utilizados gráficos de barra para a análise das cargas de unidades e dos tipos de campanha da destilação e de torta para os perfis de alocação de petróleo (matéria prima) e de produção e para os custos e receitas da refinaria, conforme se mostra na figura 5.4.

## **5.4 Conclusões**

O modelo proposto neste capítulo possibilita estudos do tipo “what-if” no planejamento operacional de uma refinaria, permitindo ao usuário fazer modificações em algumas variáveis (determinísticas) e rapidamente analisar as conseqüências das mesmas com o auxílio de gráficos e tabelas com balanços de fluxos físicos e econômicos. Como o modelo tem um pequeno módulo de otimização, ele admite que as atividades inerentes à refinaria sejam otimizadas de acordo com as alterações de cenários sugeridas pelo usuário.

No próximo capítulo será apresentado um estudo de caso onde a simulação descrita é aplicada ao planejamento operacional de uma refinaria da Petrobras.

Figura 5.4: Interface gráfica do modelo proposto



## 6 ESTUDO DE CASO: PLANEJAMENTO OPERACIONAL DA REFINARIA REPLAN DA PETROBRÁS

No capítulo anterior foi apresentada uma proposição de modelagem de uma refinaria, utilizando a técnica de simulação determinística e otimização e as ferramentas Excel e Solver, para aplicação no planejamento operacional. Neste capítulo se utilizará este modelo para um estudo de caso em uma das refinarias da Petrobras – a Replan.

### 6.1 Introdução

A Refinaria do Planalto, conhecida como Replan (figura 6.1), é a maior das 11 refinarias da Petrobrás. Está localizada na cidade de Paulínia, operando desde 1972 com capacidade de refino de petróleo de 54.200 m<sup>3</sup>/dia.

Figura 6.1: Vista Geral da Replan



Fonte: Jônio Machado. Refinaria de Paulínia. Paulínia. out/1990. D000001093

<http://s610006.sercom.petrobras.com.br/framea.htm>

Na tabela 6.1 apresentam-se as capacidades dos processos de separação, conversão e tratamento, como descritos no capítulo 2, disponíveis na Replan:

Tabela 6.1: Principais Unidades de Processo da Replan e suas Capacidades

Tipos de Unidade	Capacidade de Processamento
Destilação Atmosférica U-200	27200 m <sup>3</sup> /dia
Destilação Atmosférica U-200A	27000 m <sup>3</sup> /dia
Destilação a Vácuo U-200	13000 m <sup>3</sup> /dia
Destilação a Vácuo U-200A	12700 m <sup>3</sup> /dia
Craqueamento Catalítico U-220	7500 m <sup>3</sup> /dia
Craqueamento Catalítico U-220 A	8500 m <sup>3</sup> /dia
Coqueamento Retardado	5600 m <sup>3</sup> /dia
Hidrotratamento Catalítico	5000 m <sup>3</sup> /dia

E na tabela 6.2 apresentam-se as capacidades de produção por tipo de produto:

Tabela 6.2: Produção Típica da Replan

Produto	Volume
Óleo Diesel	21.000 m <sup>3</sup> /dia
Gasolina	13.000 m <sup>3</sup> /dia
Óleo Combustível	9.000 m <sup>3</sup> /dia
Petroquímicos	4.500 m <sup>3</sup> /dia
GLP (gás de cozinha)	4.400 m <sup>3</sup> /dia
Querosene de Aviação	1.900 m <sup>3</sup> /dia
Asfalto	800 m <sup>3</sup> /dia
Solventes	400 m <sup>3</sup> /dia

O escoamento da produção é realizado por oleodutos interligados às Distribuidoras locais e a outros órgãos, a fim de atender um grande mercado consumidor situado no interior paulista, sul de Minas Gerais e Triângulo Mineiro, sul de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Rondônia, conforme mostrado na figura 6.2.

Como pode-se observar, são muitos os atores participantes, o que aumenta a complexidade das operações e conseqüentemente, do planejamento operacional da refinaria sob análise.



## **6.2 Etapas do Processo de Planejamento Operacional da Refinaria**

O planejamento operacional corporativo da Petrobrás estabelece as atividades operacionais das refinarias, incluindo matérias primas e mercados de competência de cada uma delas. De posse destas informações, a refinaria confecciona seu plano operacional onde as atividades operacionais definidas pela corporação são viabilizadas e detalhadas. Esses planejamentos operacionais locais fornecem as informações que permitem à sede identificar as necessidades de importação e exportação de produtos.

Em seguida, a sede promove uma reunião onde ela e as refinarias comentam e discutem as dificuldades e os fatores que podem comprometer a consecução do planejamento operacional da empresa. Nesta reunião podem surgir alterações na disponibilidade de matéria prima, nas capacidades de processamento das unidades e nos mercados de cada uma das refinarias. Também podem ser constatados desvios de produção de derivados entre os planos de produção locais e o planejamento corporativo. Todas estas variações podem acarretar em mudança dos planejamentos operacionais locais.

Cada refinaria participa também de outra reunião, junto com outros órgãos operacionais, para discutir e definir mais detalhadamente a programação das operações na região. Ainda aqui podem ser feitas alterações nos planos operacionais das refinarias.

Finalmente, existe na sede um acompanhamento semanal da evolução do suprimento (produções, mercados, importações, exportações e estoques) e novas diretrizes operacionais podem ser determinadas, principalmente quando os níveis dos estoques afastam-se do estabelecido como metas, quando há risco de não atendimento de clientes ou por ocorrência de contingências.

Todas as etapas descritas precisam de novas tomadas de decisão. Assim o uso do modelo descrito no capítulo 5, permitindo estudos “what if” com rapidez

e de fácil interpretação, pode trazer agilidade ao processo de planejamento operacional da refinaria.

### **6.3 Modelagem Replan**

As considerações e os critérios estabelecidos nessa modelagem são resultado da análise de dados históricos, de conhecimentos obtidos com técnicos da refinaria e de informações obtidas nos modelos “Pims” e “Planab” e têm consequência na definição de quantas e quais entidades são importantes na modelagem da refinaria. A partir da definição das entidades participantes do modelo, determinam-se as variáveis e os atributos a serem utilizados.

A apresentação desses critérios e das entidades consideradas importantes para compor esse modelo são apresentadas a seguir:

#### **6.3.1 DEFINIÇÃO DAS ENTIDADES**

##### **6.3.1.1 Unidades de Processo**

A Replan possui 2 unidades de destilação, como pode ser observado na figura 6.3.

Elas são unidades parecidas, oriundas de um mesmo projeto e com condições de operação e performance semelhantes, por isso, na modelagem, serão consideradas como uma unidade única de processo de forma a simplificar a aplicação. Essa suposição permite trabalhar com apenas uma matriz de rendimentos e qualidades das correntes oriundas da separação dos petróleos.

Figura 6.3: Unidades de Destilação da Replan



Fonte: <http://www.replan.petrobras.com.br/destilacao/Imagens/PRDE/U200%20e%20U200A%20.jpg>

As unidades de processo consideradas são:

- UDT – unidade de destilação (atmosférica e vácuo);
- UFC – unidade de craqueamento catalítico;
- – unidade de coqueamento retardado;
- UHD – unidade de hidrotratamento catalítico

### 6.3.1.2 Petróleos

Na tabela 6.3 está representado o elenco<sup>5</sup> da Replan, obtido através de análise

---

<sup>5</sup> Conjunto de petróleos encaminhados à refinaria para processamento.

estatística dos dados do BDEM<sup>6</sup> desde 2001.

Tabela 6.3: Elenco de Replan

Marlim P-18 e assemelhados	66,4%
Condensado Argelino e assemelhados	11,3%
Albacora Norte e assemelhados	8,6%
Bonny Leve e assemelhados	7,9%
Petróleos da Bacia de Campos	2,2%
Petróleos Leves BTE	2,0%
Petróleos para Asfalto	1,0%
Petróleos Pesados BTE	0,4%
Petróleos para Lubrificantes	0,4%
Total	100,0%

Analisando a tabela pode-se observar que os 4 primeiros tipos representam 94 % do total de petróleo processado na Replan. Por conta desta representatividade os petróleos que serão considerados são:

- Albacora Norte
- Bonny Leve
- Condensado Argelino
- Marlim P-18

### 6.3.1.3 Campanhas

As unidades de processo operam em campanhas em função da necessidade de segregação das matérias primas ou das produções. O tipo de campanha pode definir a qualidade e quantidade dos produtos intermediários produzidos nas unidades de processo.

---

<sup>6</sup> Banco de Dados de Estoques, Movimentação e Qualidade da Petrobrás

A Replan opera as suas unidades de destilação em campanhas ATE<sup>7</sup> (segregação de produtos intermediários com elevado teor de enxofre), Asfalto (segregação do resíduo de vácuo para produção de Asfalto), Ratcraç (segregação do resíduo atmosférico craqueável) e Normal (sem segregação pelo teor de enxofre, nem pela produção de rat craqueável nem para produção de Asfalto). Como nenhum dos petróleos incluídos na modelagem é ATE e a produção de Asfalto não participa da modelagem, não se considerou as campanhas ATE e Asfalto.

As outras unidades de processo operam com apenas um tipo de campanha.

#### 6.3.1.4 Produtos Intermediários

Os produtos intermediários contemplados na modelagem são função da necessidade de segregação destes produtos, seja por questão operacional, seja por questão de especificação dos produtos finais.

Os produtos intermediários considerados foram os 21 seguintes produtos:

- LP1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação até 20°C), incorporada ao produto final GLP;
- NL1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação de 20 a 140°C), encaminhada para mistura;
- NP1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação de 140 a 170°C), encaminhada para mistura;
- QU1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação de 170 a 225°C), encaminhada para mistura;

---

<sup>7</sup> alto teor de enxofre

- DL1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação de 225 a 306°C), encaminhada para mistura;
- DP1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação de 306 a 405°C), parte encaminhada para o processamento na unidade de hidrotratamento catalítico e o restante para mistura;
- RA1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação após 405°C), encaminhada para a Unidade de craqueamento catalítico;
- GO1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação de 405 a 560°C), encaminhada para o processamento na unidade de craqueamento catalítico;
- RV1: fração produzida na unidade de destilação (faixa de destilação após 560°C), parte encaminhada para o processamento na unidade de coqueamento retardado e o restante para mistura;
- LPC: fração incorporada ao produto final GLP, produzida na unidade de craqueamento catalítico;
- NFC: fração produzida na unidade de craqueamento catalítico, encaminhada para mistura;
- LCO: fração produzida na unidade de craqueamento catalítico, parte encaminhada para processamento na unidade de hidrotratamento catalítico e o restante para mistura;
- OLD: fração produzida na unidade de craqueamento catalítico, encaminhada para mistura;
- LPK: fração incorporada ao produto final GLP, produzida na unidade de coqueamento retardado;

- NLK: fração produzida na unidade de coqueamento retardado, parte encaminhada para processamento na unidade de craqueamento catalítico e o restante para mistura;
- NPK: fração produzida na unidade de coqueamento retardado, parte encaminhada para processamento na unidade de craqueamento ou hidrotratamento catalítico e o restante para mistura;
- GLK: fração produzida na unidade de coqueamento retardado, parte encaminhada para processamento na unidade de craqueamento ou hidrotratamento catalítico e o restante para mistura;
- GMK: fração produzida na unidade de coqueamento retardado, parte encaminhada para processamento na unidade de craqueamento ou hidrotratamento catalítico e o restante para mistura;
- GPK: fração produzida na unidade de coqueamento retardado, parte encaminhada para processamento na unidade de craqueamento catalítico e o restante para mistura;
- COK: fração produzida na unidade de coqueamento retardado, incorporada ao produto final Coque;
- DHI: fração produzida na unidade de hidrotratamento catalítico, encaminhada para mistura.

#### 6.3.1.5 Produtos Finais

Na tabela 6.2 foram mostrados os principais grupos de produtos, conforme descrito no capítulo 2, disponibilizados pela Replan ao mercado.

Analisando a oferta desses grupos no BDEMQ desde 2001, fez-se a seleção dos 9 produtos apresentados na tabela 6.4, para participarem da modelagem.

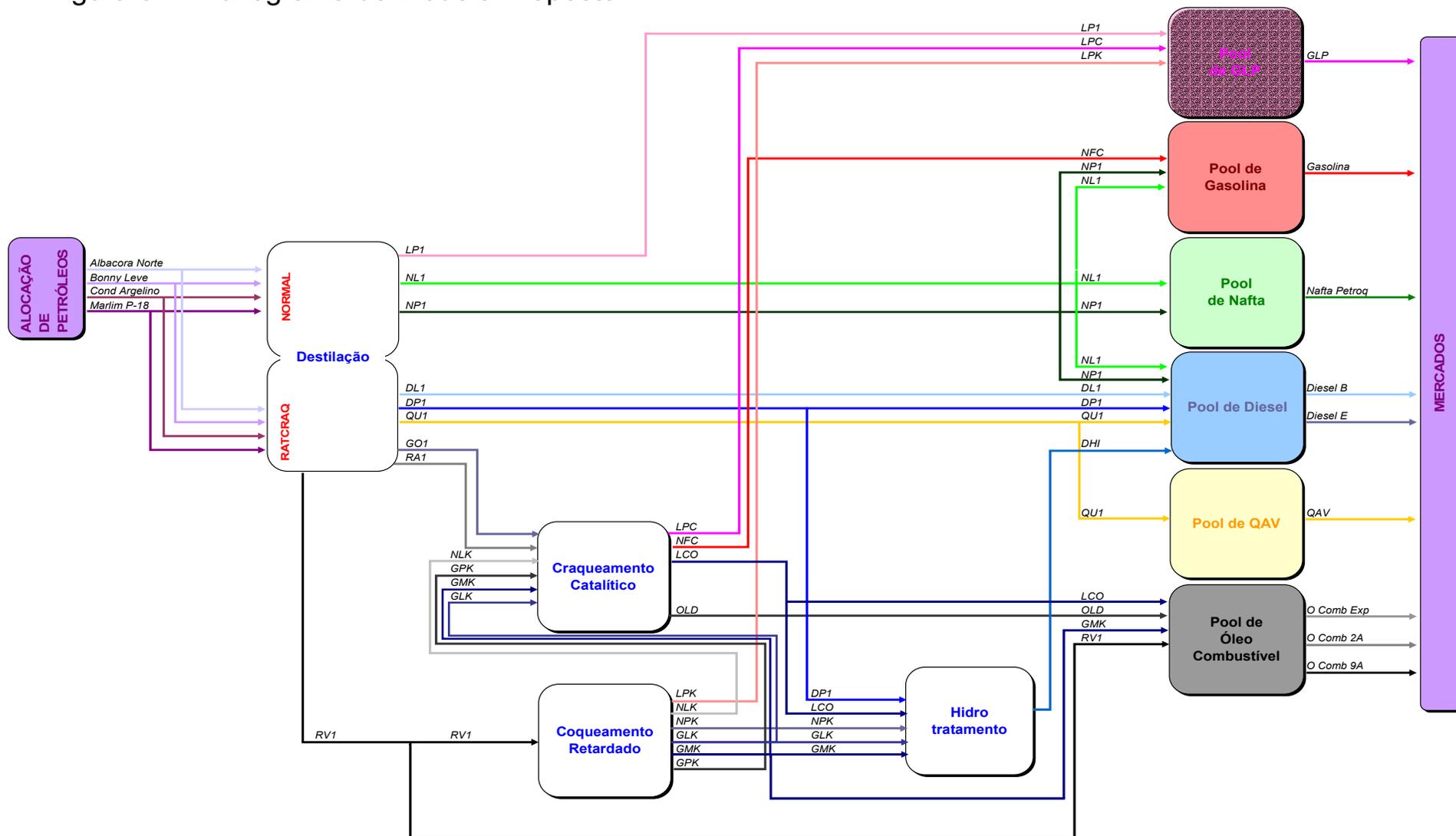
Tabela 6.4: Mercado da Replan no Modelo

Grupo	Produto	%Venda
GLP	GLP (Propano/Butano)	100
Gasolina	Gasolina A	100
Petroquímicos	Nafta Petroquímica	100
QAV	Querosene de Aviação	92
Óleo Diesel	Óleo Diesel Tipo B	100
Óleo Diesel	Óleo Diesel Tipo E	0
Óleo Combustível	Óleo Combustível Exportação	27
Óleo Combustível	Óleo Combustível 2A	27
Óleo Combustível	Óleo Combustível 9A	4

Os critérios de seleção foram:

- Para o GLP, Gasolina e Petroquímicos os produtos escolhidos são os únicos representantes dos grupos no mercado da Replan no período.
- Para o grupo QAV, o produto escolhido representa 92% das vendas. Mais 4 produtos considerados intermediários são ofertados a outras refinarias sem especificação definida e com baixa representatividade nas vendas, por isso não participaram deste estudo.
- Para o grupo do Óleo Diesel, foram considerados o Óleo Diesel Tipo B, que representa 100 % das vendas e o Óleo Diesel Tipo E, produto novo que está entrando no mercado gradativamente e cuja especificação afeta bastante a forma de operar a refinaria.
- Finalmente para o grupamento Óleo Combustível, onde existem cerca de 10 diferentes produtos e muitos deles com vendas significativas, a escolha foi feita em função das demandas, das diferenças de qualidade e das suas composições. Assim, foram escolhidos o Óleo Combustível Exportação, o Óleo Combustível 2A e o Óleo Combustível 9 A como representantes de óleos de baixa, média e alta viscosidade.

Figura 6.4: Fluxograma do Modelo Proposto



No fluxograma da figura 6.4 são representadas todas as entidades envolvidas neste estudo de caso.

## 6.3.2 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS

### 6.3.2.1 Variáveis Simuladas

Estas variáveis, 21 ao todo, são os volumes dos diferentes petróleos destilados na unidade de destilação (UDT) na campanha normal (N) ou ratcraç (R) e os volumes dos diferentes produtos intermediários processados nas outras unidades de processo (UFC, UCQ e UHD) e estão listadas no anexo 9.1.

### 6.3.2.2 Variáveis Otimizadas

As variáveis otimizadas, 32 ao todo, são os volumes de produtos intermediários NL1, NP1, NFC, QU1, DL1, DP1, DH1, RV1, LCO, OLD, GLK e GMK transferidos para os “pools” de Gasolina A, Nafta Petroquímica, Querosene de Aviação, Óleo Diesel Tipo B, Óleo Diesel Tipo E, Óleo Combustível Exportação, Óleo Combustível 2A, Óleo Combustível 9A e estão listadas no anexo 9.2.

### 6.3.2.3 Variáveis “Conseqüência”

Estas variáveis, 113 ao todo, determinadas a partir da definição das variáveis simuladas e das variáveis otimizadas, são os volumes dos petróleos processados na refinaria, as cargas processadas nas unidades de processo, as massas específicas e os teores de enxofre das cargas das unidades de processo UFC, UCQ e UHD, os volumes de produtos intermediários produzidos nas unidades de processo, as massas específicas, os teores de enxofre e os índices de viscosidade dos produtos intermediários produzidos, os volumes de produtos intermediários estocados, os volumes e as características especificadas dos produtos finais produzidos. Elas estão listadas no anexo 9.3.

### 6.3.3 DEFINIÇÃO DOS ATRIBUTOS

Os atributos, conforme descritos no capítulo 5, são características referentes a Coeficientes Tecnológicos (matriz de rendimentos dos petróleos na unidade de destilação, matriz de rendimentos dos produtos intermediários nas unidades de processo, matriz das propriedades massa específica, teor de enxofre e viscosidade a 50°C dos produtos intermediários, fator de transferência do teor de enxofre dos produtos intermediários, fator de octanagem e número de octanagem dos produtos intermediários e especificação dos produtos finais), Econômicos (custos operacionais das unidades de processo, custos dos petróleos e preços dos produtos finais) e de Recursos (capacidades mínimas e máximas das unidades de processo e mercados mínimos e máximos dos produtos finais). Eles estão apresentados no anexo 9.4.

### 6.3.4 DEFINIÇÃO DAS RESTRIÇÕES

As restrições listadas no capítulo 5 para o caso em análise são as seguintes:

Todas as variáveis são não negativas.

$$VOL_{\min}(\text{Albacora Norte}) \leq QDT(\text{Albacora Norte}) \leq VOL_{\max}(\text{Albacora Norte})$$

$$VOL_{\min}(\text{BonnyLeve}) \leq QDT(\text{BonnyLeve}) \leq VOL_{\max}(\text{BonnyLeve})$$

$$VOL_{\min}(\text{CondArgelino}) \leq QDT(\text{CondArgelino}) \leq VOL_{\max}(\text{CondArgelino})$$

$$VOL_{\min}(\text{Mar lim } P-18) \leq QDT(\text{Mar lim } P-18) \leq VOL_{\max}(\text{Mar lim } P-18)$$

$$810 \leq QDT(UDT) \leq 1620$$

$$236 \leq QDT(UFC) \leq 471$$

$$84 \leq QDT(UCK) \leq 168$$

$$75 \leq QDT(UHD) \leq 150$$

$$SUL(\text{Óleo Diesel Tipo B}) \leq 0,5$$

$$SUL(\text{Óleo Diesel Tipo B}) \leq 0,1$$

$$SUL(\text{Óleo Combustível Exportação}) \leq 2,0$$

$$SUL(\text{Óleo Combustível 2A}) \leq 5,5$$

$$SUL(\text{Óleo Combustível 9A}) \leq 5,5$$

$$OCT(\text{Gasolina A}) \geq 80$$

$$0,380 \leq IVI(\text{Óleo Combustível Exportação}) \leq 0,452$$

$$0,498 \leq IVI(\text{Óleo Combustível 2A}) \leq 0,530$$

$$0,674 \leq IVI(\text{Óleo Combustível 9A}) \leq 0,688$$

$$70 \leq PBL(GLP) \leq 1000$$

$$300 \leq PBL(\text{Gasolina A}) \leq 400$$

$$100 \leq PBL(\text{Nafta Petroquímica}) \leq 130$$

$$0 \leq PBL(\text{Querosene de Aviação}) \leq 100$$

$$0 \leq PBL(\text{Óleo Diesel Tipo B}) \leq 700$$

$$0 \leq PBL(\text{Óleo Diesel Tipo E}) \leq 100$$

$$0 \leq PBL(\text{Óleo Combustível Exportação}) \leq 100$$

$$60 \leq PBL(\text{Óleo Combustível 2A}) \leq 100$$

$$60 \leq PBL(\text{Óleo Combustível 9A}) \leq 150$$

onde os valores numéricos dos membros à esquerda e à direita foram obtidos de restrições físicas da refinaria, de especificações dos produtos e de estatísticas referentes aos mercados da Replan.

### 6.3.5 DEFINIÇÃO DA FUNÇÃO-OBJETIVO

A função-objetivo do problema, conforme definido no capítulo 5, é o lucro total da Replan que deve ser maximizado.

Este lucro é representado pela diferença entre as receitas obtidas pela venda dos produtos aos mercados e os custos havidos com a produção dos mesmos.

Tem-se assim a função F seguinte:

$$\begin{aligned} & ((127,79 * PBL(\text{GLP}) + 126,79 * PBL(\text{Gasolina A}) + 127,35 * PBL(\text{Nafta Petroquímica}) + 171,57 * PBL(\text{Querosene de Aviação}) + 162,17 * PBL(\text{Óleo Diesel Tipo B}) + 162,86 * PBL(\text{Óleo Diesel Tipo E}) + 82,67 * PBL(\text{Óleo Combustível Exportação}) + 95,11 * PBL(\text{Óleo Combustível 2A}) + 29,69 * PBL(\text{Óleo Combustível 9A})) - (114,12 * QDT(\text{Albacora Norte}) + 119,21 * QDT(\text{Bonny Leve}) + 120,64 * QDT(\text{Condensado Argelino}) + 92,26 * QDT(\text{Marlim P-18})) \end{aligned}$$

que deve ser maximizada.

## 6.4 Resultados Obtidos

O modelo proposto passou por testes que permitiram analisar a sua coerência por meio da consistência das soluções obtidas frente às alterações provocadas nas cargas das unidades, no elenco processado, no mercado ofertado e nas especificações dos produtos finais.

A retirada do mercado de Óleo Combustível Exportação, por exemplo, aumenta os estoques de LCO e OLD, correntes que compõem o pool deste produto e responsáveis pela redução da viscosidade dos óleos combustíveis. O aumento dos mercados dos outros Óleos Combustíveis desloca estes estoques excedentes para o pool de Óleo Combustível 2A e 9A, levando o índice de viscosidade dos Óleos Combustíveis para o limite inferior.

A retirada do processamento do petróleo Bonny Leve, que apresenta menores teores de enxofre em suas correntes, levou ao aumento dos teores de enxofre dos Óleos Diesel e Óleos Combustíveis e a produção do Óleo Diesel E (menor teor de enxofre) caiu.

O modelo proposto foi comparado com o modelo "PIMS" utilizado quando da confecção do plano de produção da refinaria (anexo 9.5). Para isto, foram utilizadas, para as variáveis simuladas, os mesmos valores que os utilizados pelo "PIMS" (matérias primas e cargas das unidades de processo) e a partir delas, as produções dos produtos intermediários e finais foram determinadas. As produções dos dois modelos encontram-se na tabela 6.5, onde se pode observar que ambos responderam de forma similar às variações de carga e elenco, exceto para o Querosene de Aviação. A diferença para esta produção é explicada em parte porque o modelo "PIMS" faz segregação do querosene intermediário produzido pelo Bonny Leve e pelo Condensado Argelino (menores teores de enxofre). Mas parte da diferença pode ser função da recursividade utilizada na modelagem "Pims" para determinar os teores de enxofre dos produtos intermediários e finais conforme foi comentado no capítulo 3.

Tabela 6.5: Comparação das produções obtidas entre modelos.

Produto	modelo "PIMS" (em mil m3/d)	modelo proposto (em mil m3/d)
GLP (Propano/Butano)	87	93
Gasolina A	300	300
Nafta Petroquímica	100	100
Querosene de Aviação	18	7
Óleo Diesel Tipo B	468	482
Óleo Diesel Tipo E	0	0
Óleo Combustível Exportação	100	96
Óleo Combustível 2A	100	100
Óleo Combustível 9A	100	95

Na tabela 6.6 apresenta-se um comparativo das variáveis econômicas do problema onde se observa uma diferença da ordem de 0,4% da receita total e 1,8% do lucro (função-objetivo).

Tabela 6.6: Comparação dos resultados econômicos obtidos nos modelos.

	modelo "PIMS"	modelo proposto
Receita (Mil US\$/mês)	163209	163896
Custo da MP (Mil US\$/mês)	124900	124900
Outros Custos (Mil US\$/mês)	1140	1344
FO (max Lucro) (Mil US\$/mês)	37169	37652

Foram também avaliadas algumas alternativas de operação originadas a partir da ocorrência de contingências, comparando as suas soluções com a encontrada com o cenário inicial (os 4 petróleos definidos no item 6.3.1 nas proporções apresentadas na tabela 6.3, as cargas das unidades máximas e as restrições de mercado (quantidade e qualidade) apresentadas no item 6.3.4).

A primeira alteração de cenário (caso 1) foi a redução de 300 mil m<sup>3</sup> no processamento de Marlim P-18 na Replan devida a uma queda de produção do mesmo, parcialmente compensada por 100 mil m<sup>3</sup> de Albacora Norte deslocado de outra refinaria e processado em campanha ratcraq.

A segunda (caso 2) considerou uma redução da capacidade de processamento da unidade de craqueamento catalítico para 75 % da carga máxima.

Numa terceira mudança de cenário (caso 3) tratou-se de investigar as consequências da troca de especificação do Óleo Diesel nas atividades

Figura 6.5: Relatório do Modelo Proposto (Caso base)

Alocação Petróleos							
Corrente	L Inf	L Sup	Preços	Normal	RatCrq	Total	Custo
Albacora Norte	100	250	114,12	70	78	148	16890
Bonny Leve	100	200	119,21	0	136	136	16213
Cond Argelino	100	200	120,64	194	0	194	23405
Marlim P-18	900	1200	92,28	1142	0	1142	105381
<b>TOT</b>			<b>99,93</b>	<b>1406</b>	<b>214</b>	<b>1620</b>	<b>161889</b>
Capacidade das Unidades							
Unidade	Min	Máx	CustUn	Real	Custo		
Destilação	810	1620	0,10	1620	162		
Craqueamento	236	471	7,32	454	3324		
Coque	84	168	9,10	168	1529		
Hidrotratamento	75	150	7,32	79	578		
Variáveis da Otimização							
NL1 em Pool de Gasolina - 620	10,57						
NP1 em Pool de Gasolina - 620	55,07						
NFC em Pool de Gasolina - 620	234,37						
NL1 em Pool de Naf Petroq - 625	99,99						
NP1 em Pool de Naf Petroq - 625	0,01						
QU1 em Pool de QAV - 641	98,45						
NL1 em Pool de Diesel B - 64X	117,75						
NP1 em Pool de Diesel B - 64X	0,40						
QU1 em Pool de Diesel B - 64X	0,01						
DL1 em Pool de Diesel B - 64X	217,84						
DP1 em Pool de Diesel B - 64X	222,43						
DHI em Pool de Diesel B - 64X	0,01						
NL1 em Pool de Diesel E - 64U	20,96						
NP1 em Pool de Diesel E - 64U	0,01						
QU1 em Pool de Diesel E - 64U	0,01						
DL1 em Pool de Diesel E - 64U	0,01						
DP1 em Pool de Diesel E - 64U	0,02						
DHI em Pool de Diesel E - 64U	78,99						
LCO em Pool de O Comb Exp - 67Z	34,40						
OLD em Pool de O Comb Exp - 67Z	0,01						
GLK em Pool de O Comb Exp - 67Z	0,11						
GMK em Pool de O Comb Exp - 67Z	0,11						
RV1 em Pool de O Comb Exp - 67Z	62,40						
LCO em Pool de O Comb 2A- 669	6,92						
OLD em Pool de O Comb 2A- 669	39,68						
GLK em Pool de O Comb 2A- 669	0,51						
GMK em Pool de O Comb 2A- 669	1,32						
RV1 em Pool de O Comb 2A- 669	51,57						
OLD em Pool de O Comb 9A - 6AT	4,68						
GLK em Pool de O Comb 9A - 6AT	0,01						
GMK em Pool de O Comb 9A - 6AT	0,01						
RV1 em Pool de O Comb 9A - 6AT	103,69						
Especificação dos Produtos							
Produto	Espec	Min	Máx	Real			
Diesel B	% Enxofre		0,35%	0,35%			
Diesel E	% Enxofre		0,10%	0,04%			
Óleo Comb Exp	% Enxofre		2,00%	0,94%			
Óleo Comb 2A	% Enxofre		5,50%	1,11%			
Óleo Comb 9A	% Enxofre		5,50%	1,05%			
Gasolina	% Nafta DD	19,0%	40,0%	21,9%			
Gasolina	Octanagem	80		83			
Diesel B	% Naf Pes	0	100				
Diesel E	% Naf Pes	0	100				
Óleo Comb Exp	IVISSF@50C	0,380	0,452	0,452			
Óleo Comb 2A	IVISSF@50C	0,498	0,530	0,530			
Óleo Comb 9A	IVISSF@50C	0,674	0,688	0,688			
Mercados							
Produto	Merc	L Inf	L Sup	Preços	Volume	Receita	
GLP	Local	70	1000	127,79	112	14257	
Gasolina	Local	300	400	126,79	300	38036	
Nafta Petroq	Local	100	130	127,35	100	12735	
QAV	Local	0	100	171,57	98	16892	
Diesel B	Local	0	700	162,17	558	90564	
Diesel E	Local	0	100	162,86	100	16286	
Óleo Comb Exp	Local	0	100	82,67	97	8022	
Óleo Comb 2A	Local	60	100	95,11	100	9510	
Óleo Comb 9A	Local	60	150	29,69	108	3219	
<b>TOT</b>				<b>133,12</b>	<b>1574</b>	<b>209521</b>	
<b>Avaliação Econômica</b>							
Lucro		42038					
Lucro / Custo		25,1%					

operacionais da refinaria. Para isso se alteraram os mercados dos Óleos Diesel

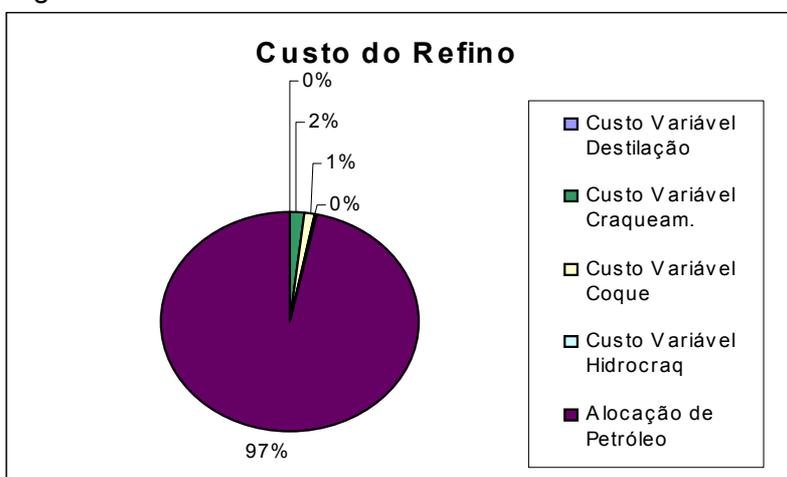
B e E, aumentando o mercado do produto com menor teor de enxofre.

Os resultados obtidos no caso base, com o cenário inicial, estão em relatório composto de diversas tabelas apresentadas na figura 6.5.

A análise destes resultados mostra que:

- o custo da matéria prima representa cerca de 97% dos custos variáveis da refinaria conforme mostrado na figura 6.6;

Figura 6.6: Custos Variáveis da Refinaria



- a refinaria tem falta de matéria prima para processar suas unidades de craqueamento catalítico com cargas máximas conforme mostrado na figura 6.7 onde se representam as cargas da UFC;
- o pool de gasolina é composto com cerca de 20 % de nafta da destilação, próximo do teor mínimo conforme se pode comprovar na tabela "Especificação de Produtos" da figura 6.5;
- o Óleo Diesel produzido tem especificação de enxofre atendida, mesmo operando a unidade de hidrotreatamento com cerca de 50 % da carga máxima conforme se pode comprovar na tabela "Capacidade das Unidades" da figura 6.5;

- mantendo-se a produção de Óleo Combustível Exportação, a especificação de viscosidade de todos os Óleos Combustíveis fica máxima, indicando falta de diluente para especificar os Óleos Combustíveis e operar a unidade de hidrocraqueamento com carga máxima conforme se pode comprovar na tabela "Especificação de Produtos" da figura 6.5.

#### 6.4.1 ANÁLISE DO CASO 1

No cenário do caso 1, a redução de carga de 200 mil m<sup>3</sup>/mês nas unidades de destilação trouxe uma menor produção de produtos intermediários que se refletiu em todas as demais operações da refinaria.

Como a perda foi em Marlim P-18, petróleo que se caracteriza pelo elevado teor de frações pesadas, a perda de produção de produtos mais pesados foi maior. Na figura 6.8 são apresentados os perfis de produção antes e depois da redução do processamento, mostrando que a perda de produção dos Óleos Combustíveis foi maior que as dos outros produtos.

Também houve grandes perdas na produção de gasóleo de vácuo, carga do craqueamento catalítico, representadas na figura 6.7(b). Esta figura mostra que parte dessa perda foi compensada pelo aumento da produção de rat craqueável (maior processamento de Albacora Norte em campanha ratcraq). Nela são apresentadas as cargas do craqueamento catalítico no caso base (6.7(a)) e no caso 1 (6.7(b)), comprovando o aumento dos teores de rat craqueável na UFC no caso 1.

Figura 6.7: Comparação das cargas da UFC no caso base com o caso 1

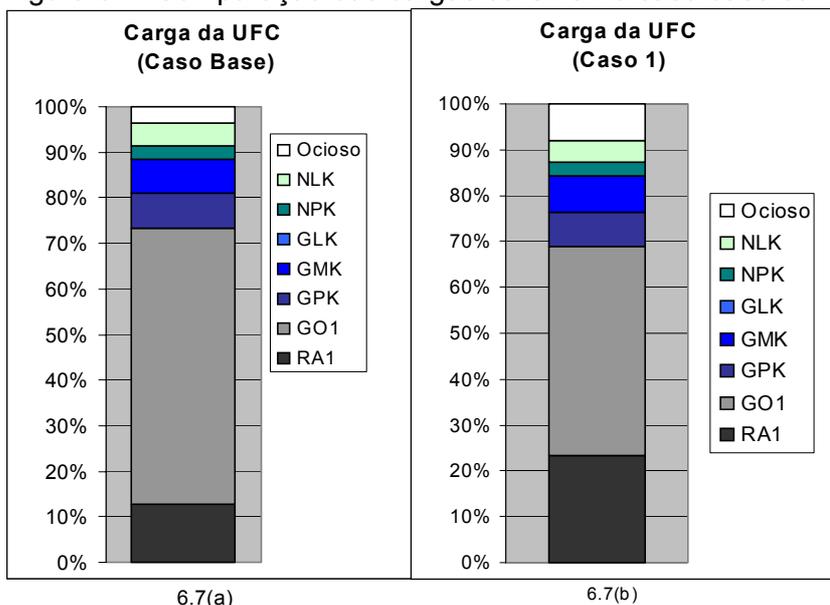
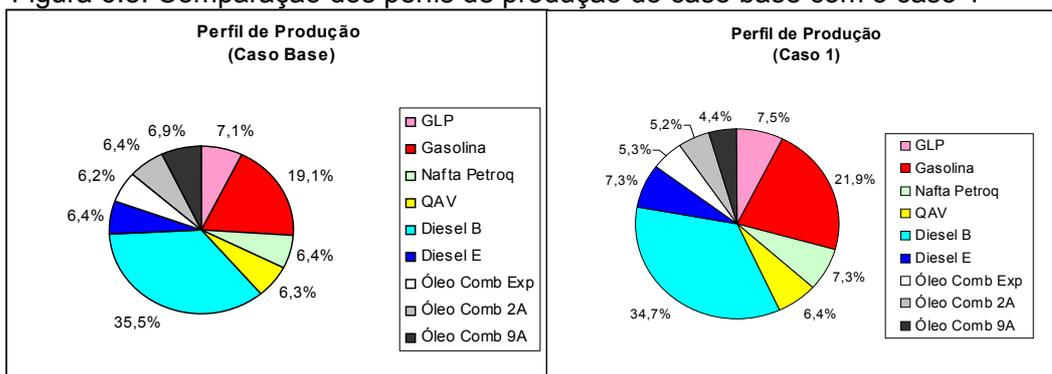


Figura 6.8: Comparação dos perfis de produção do caso base com o caso 1



O maior processamento de rat craqueável no craqueamento catalítico alterou o perfil de produção desta unidade como mostrado na tabela 6.7, diminuindo a produção de LPC (corrente do GLP) e aumentando a de OLD (diluyente de Óleos Combustíveis).

Tabela 6.7: Comparação dos Perfis de Produção da UFC do Caso Base com o Caso 1

Correntes	LPC	NFC	LCO	OLD
Caso Base	22%	54%	14%	10%
Caso 1	21%	54%	14%	11%

Assim a produção de GLP da refinaria foi menor pelo menor processamento na UFC e pela redução do rendimento.

A produção de Gasolina manteve-se com a adição de maiores teores de nafta na gasolina (de 22% para 26%) e a produção de Óleo Diesel diminuiu com a perda de produção e com a menor incorporação das correntes de nafta. Encaminhou-se uma maior quantidade de DP1 para o hidrotreamento catalítico porque os teores de enxofre das frações de DL1 e DP1 oriundas do Albacora Norte são maiores que os das frações de Marlim P-18.

A produção de todos os Óleos Combustíveis foi reduzida pela menor produção de resíduo de vácuo. A composição dos 3 produtos ficou com maiores teores de diluentes, conseqüentemente, a especificação de viscosidade, que no cenário inicial estava no máximo, passou para o mínimo. A refinaria passou a ter excedente de diluentes.

A tabela 6.8 apresenta as receitas, os custos e a função-objetivo nos dois casos.

Tabela 6.8: Comparação dos resultados econômicos do caso base com o caso 1

	Caso Base	Caso 1
Receita (Mil US\$/mês)	209521	187145
Custo da MP (Mil US\$/mês)	161889	145618
Outros Custos (Mil US\$/mês)	5594	5522
FO (max Lucro) (Mil US\$/mês)	42038	36005
FO/Custo	25,1%	23,8%

A FO caiu 14 % com a perda de processamento, indicando interesse de operar a refinaria com processamento máximo. A relação FO/Custo também caiu (de 25,1 para 23,8%), podendo ser indicativo de que o Marlim P-18 resulta em maiores lucros que os outros petróleos.

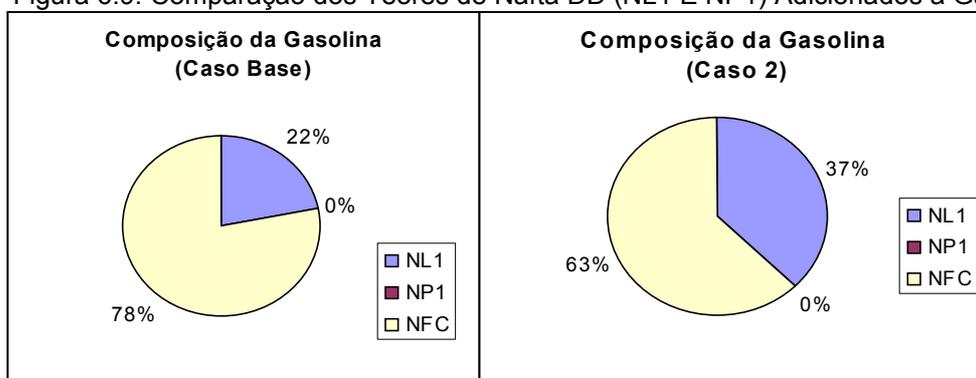
#### 6.4.2 ANÁLISE DO CASO 2

A redução de 25 % da capacidade de processamento da UFC, considerada no cenário do caso 2, tem como conseqüência imediata um excedente das correntes que servem de matéria prima para o processo e uma redução da produção de LPC, NFC, LCO e OCL.

No caso base tem-se os petróleos Albacora Norte e Bonny Leve processados em campanha ratcraq para gerar mais carga para a UFC. A situação neste caso inverteu-se e essas campanhas não são desejadas.

A produção de gasolina foi suficiente para atender o mercado mas com uma adição maior de Nafta DD, conforme representado na figura 6.9, mantendo a especificação de octanagem ainda especificada (81).

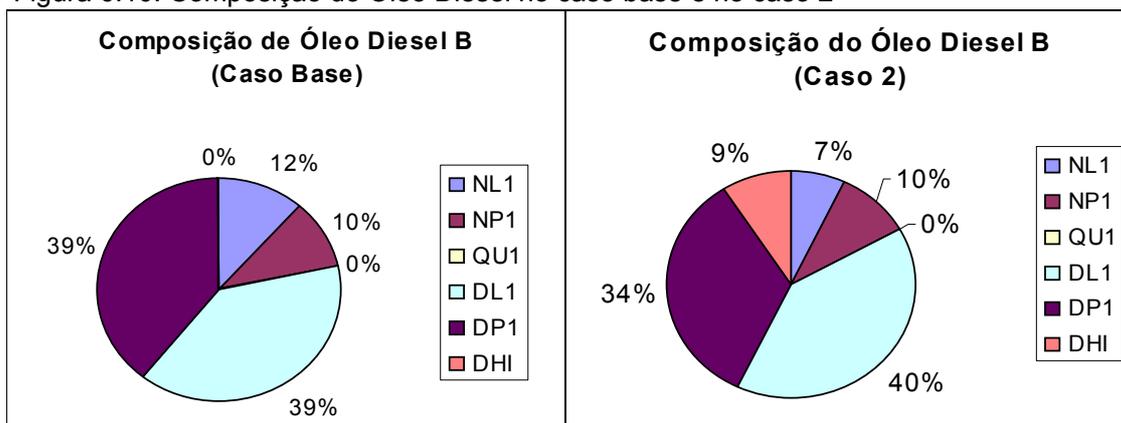
Figura 6.9: Comparação dos Teores de Nafta DD (NL1 E NP1) Adicionados à Gasolina



A carga do hidrotreatamento pôde ser maior, processando os produtos intermediários excedentes oriundos da unidade de coque (GMK, GLK E NPK), aumentando assim a produção de óleo diesel, ao invés de manter um estoque de produtos intermediários para processar na UFC quando o problema estiver solucionado.

A produção de Óleo Diesel perdeu a adição de Nafta DD mas foi acrescida pela adição do Diesel hidrotreatado oriundo da UHD, conforme está representado na figura 6.10. Sua especificação de enxofre fica menor que a especificada.

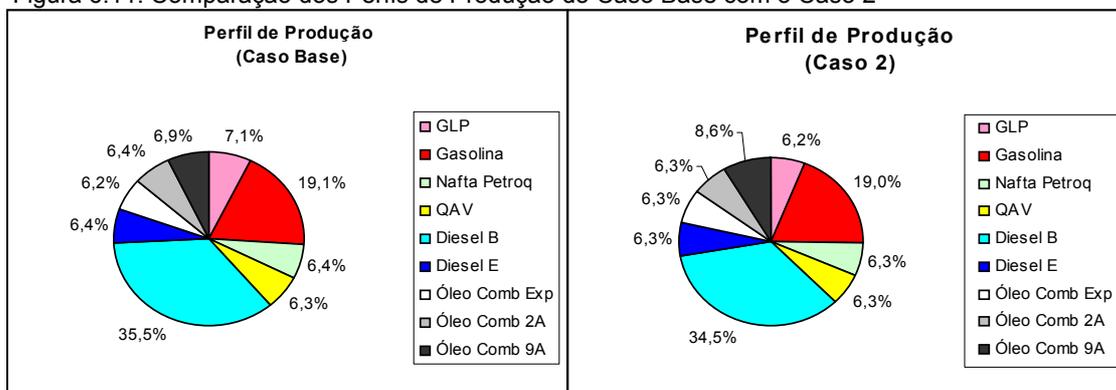
Figura 6.10: Composição do Óleo Diesel no caso base e no caso 2



O maior processamento de gasóleos de coque na UDH deslocou o LCO para o pool de Óleo Combustível. Assim eles ficaram com a especificação de viscosidade no limite mínimo.

A figura 6.11 apresenta os perfis de produção no caso base e neste, observando-se a perda de produção de Óleo Diesel B e de GLP e ganho de produção do Óleo Combustível 9A.

Figura 6.11: Comparação dos Perfis de Produção do Caso Base com o Caso 2



Na tabela 6.9 apresentam-se os resultados econômicos do caso 2 em comparação com o caso base.

Tabela 6.9: Comparação dos resultados econômicos do caso base com o caso 2

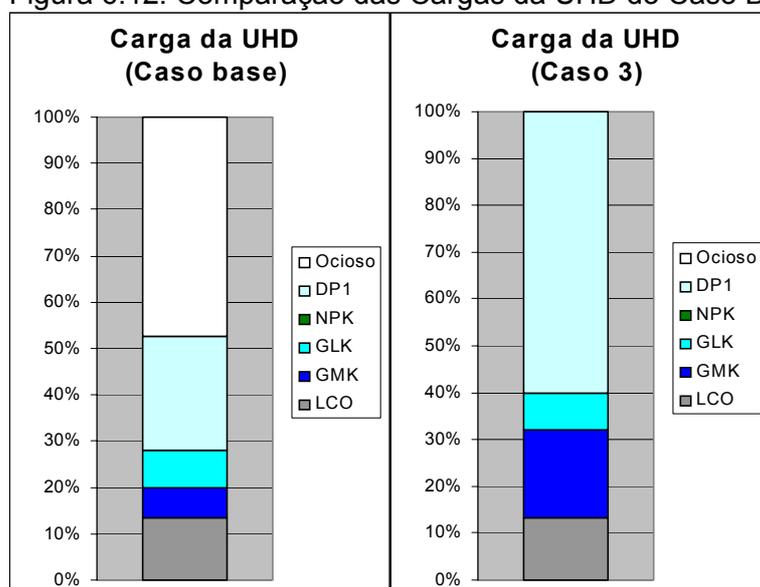
	Caso base	Caso 2
Receita (Mil US\$/mês)	209521	206321
Custo da MP (Mil US\$/mês)	161889	161889
Outros Custos (Mil US\$/mês)	5594	5365
FO (max Lucro) (Mil US\$/mês)	42038	39066
FO/Custo	25,1%	23,4%

A quebra da unidade de craqueamento catalítico reduz o lucro devido à perda de receita com a mudança do perfil de produção conforme já foi comentado anteriormente. Como os custos mantiveram-se, o lucro caiu.

### 6.4.3 ANÁLISE DO CASO 3

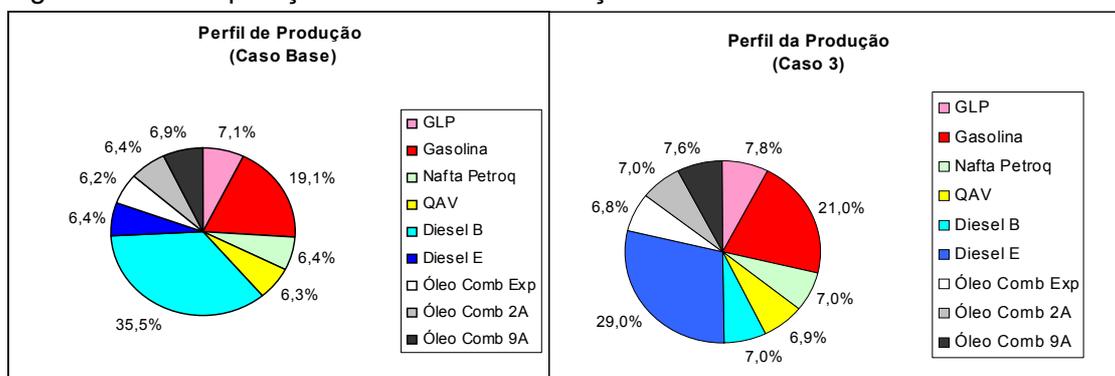
A redução do mercado de Óleo Diesel B (teor de enxofre máximo de 0,35%) e aumento do mercado de Óleo Diesel E (teor de enxofre máximo de 0,10%), considerada no cenário do caso 3, tem como consequência imediata o aumento de processamento na unidade de hidrotreatamento, conforme representado na figura 6.12.

Figura 6.12: Comparação das Cargas da UHD do Caso Base com o Caso 3



Na figura 6.13 estão representados os perfis de produção do caso base e deste caso, mostrando as mudanças provocadas pela variação dos mercados dos dois Óleos Diesel.

Figura 6.13: Comparação dos Perfis de Produção do Caso Base com o Caso 3



A tabela 6.10 mostra os mercados e as produções dos dois tipos de Diesel nos dois casos.

Tabela 6.10: Comparação dos mercados e produções dos Óleos Diesel do caso base com o caso 3

	Caso base		Caso 3	
	Óleo Diesel tipo B	Óleo Diesel tipo E	Óleo Diesel tipo B	Óleo Diesel tipo E
Mercado (Limite Superior)	700	100	100	700
Produção	558	100	100	415

Houve uma perda grande na produção de Óleo Diesel . Essa perda pode ser verificada também pelos 160 mil m<sup>3</sup> de DP1 (produto intermediário que participa do pool de Óleo Diesel) que foram estocados. A manutenção de estoque foi provocada pelo pleno atendimento do mercado do Óleo Diesel tipo B e pela falta de condições de se produzir mais Óleo Diesel tipo E devido aos elevados teores de enxofre dos produtos intermediários disponíveis.

Na tabela 6.11 apresentam-se os resultados econômicos do caso 3 em comparação com o caso base.

A redução de receita pela perda de mercado de Óleo Diesel levou a função-objetivo a uma queda de U\$23 mil, que representa 11% da receita.

Tabela 6.11: Comparação dos resultados econômicos do caso base com o caso 3

	Caso base	Caso 3
Receita (Mil US\$/mês)	209521	186411
Custo da MP (Mil US\$/mês)	161889	161889
Outros Custos (Mil US\$/mês)	5594	5982
FO (max Lucro) (Mil US\$/mês)	42038	18540
FO/Custo	25,1%	11,0%

## 6.5 Conclusões

O modelo desenvolvido mostrou ser de fácil aplicação com o uso das planilhas do Excel disponíveis no mercado.

Esse estudo de caso revelou que o modelo, mesmo sofrendo uma série de simplificações, pode ser útil em estudos de causa/efeito, oferecendo respostas rápidas, de fácil entendimento para técnicos e gerentes.

A caracterização das correntes que participam da modelagem sem o uso da recursividade foi exemplificada no caso 1 quando a troca de elenco afetou os teores de enxofre das correntes que compunham o “pool” do Óleo Diesel B e o do Óleo Diesel E, e os produtos ficaram fora de especificação.

A importância do uso de equações não lineares ficou representada no caso 2, dado que a propriedade octanagem é definida por equações não lineares e o caso avaliou a capacidade da refinaria de produzir gasolina com a octanagem especificada apesar das perdas na UFC.

Analisando as reduções nas FO's de cada um dos casos, verifica-se que a perda por incompatibilidade da refinaria com o seu mercado, no caso 3, elevou os estoques de produtos da refinaria, provocando uma perda mais significativa que aquelas ocorridas por falta de matéria prima e ou pela quebra de uma unidade de processamento.

A incompatibilidade da refinaria com o mercado, quando se trata de uma empresa integrada, normalmente não é competência do planejamento operacional da refinaria, e deve ser tratada em nível corporativo. Uma

ferramenta simples como a proposta aqui pode, no entanto, auxiliar a visualizar e sinalizar o problema para que a corporação encontre a melhor forma de solucioná-lo, num sinergismo extremamente positivo para o processo de planejamento das atividades logísticas da empresa.

## 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 7.1 Conclusões

Esse trabalho de dissertação permitiu aprofundar conhecimentos no que tange à influência do uso de modelos no planejamento operacional e na integração desse planejamento ao processo de planejamento das atividades logísticas como um todo e fazer algumas considerações:

- Unidades operacionais pertencentes a uma cadeia logística integrada têm seu planejamento operacional atrelado ao planejamento corporativo e conseqüentemente tem pouca liberdade para a tomada de decisões, dado que as definições essenciais para empresa são feitas no planejamento corporativo;
- Ao planejamento operacional das partes integrantes da empresa integrada cabe viabilizar as operações definidas pela corporação, estabelecendo as demais operações, considerando os aspectos de programação restritivos das atividades;
- A PL é uma técnica cuja modelagem e análise dos resultados exige um grande conhecimento técnico do usuário, mas cujos benefícios vão além do simples estabelecimento das atividades que atendem à função objetivo; ela permite definir áreas de interesse para investimentos, ela aponta gargalos operacionais e ajuda a estabelecer faixas de preço e custo de produtos e matérias primas;
- O uso da PL num problema cujas questões fundamentais já estão determinadas significa restringir a ferramenta a operar como uma planilha de cálculo e a desprezar o seu potencial gerencial;

- O algoritmo utilizado na PL não é adequado para estudos de causa/efeito, o enfoque é matemático e não físico, a execução é em “batch” e não fica claro para o usuário que influência terá no modelo a alteração do valor de algum dado ou variável.

A simulação determinística mostrou-se uma técnica bastante simples e de fácil interpretação para ser utilizada no planejamento operacional de refinarias e em estudos de causa/efeito.

O uso de Excel garantiu simplicidade para a construção de interfaces (gráficos, tabelas de dados e painel de controle das variáveis), facilitando a análise rápida das conseqüências de alterações.

O uso de um módulo de otimização (PL), associado à simulação determinística, permitiu encontrar-se a solução ótima para aquelas atividades inerentes da refinaria e não afetou a simplicidade da ferramenta.

O uso da simulação determinística permitiu abolir o uso da recursividade na modelagem, facilitando a análise da solução, aumentando a garantia de que a solução obtida seja a solução ótima (nas operações de mistura) e permitindo modelar uma segregação de correntes similar a real.

O uso da simulação determinística permitiu usar equações não lineares, garantindo previsões melhores envolvendo algumas características de produtos (octanagem da gasolina).

O procedimento utilizado nesse trabalho para análises de causa/efeito no planejamento operacional de refinarias partiu do pressuposto que uma análise econômica anterior já havia qualificado e quantificado as operações que fazem parte da solução ótima (técnica otimizante) para a corporação. Ao modelo de simulação determinística coube a tarefa de explorar detalhadamente as conseqüências dessas decisões, de viabilizá-las ou de apontar as

inexequibilidades. Dessa forma a técnica “What-if” entrou para apoiar a PL num sinergismo que permitiu aprofundar o conhecimento do sistema modelado.

## **7.2 Recomendações**

O modelo construído mostrou ser uma ferramenta útil na previsão das atividades da refinaria. Construído de forma bastante simplificada, não abrangeu alguns dos aspectos importantes no dia a dia de uma refinaria como algumas propriedades das cargas e das produções das unidades de processo (além da massa específica e o teor de enxofre), outras especificações de produtos finais, a capacidade de segregação e estocagem dos petróleos, produtos intermediários e finais. A ampliação da modelagem, incluindo esses aspectos permitiria integrar mais o planejamento operacional corporativo e da refinaria à programação (“scheduling”) dessa refinaria.

Este trabalho poderia ser estendido com a inclusão da aquisição de produtos intermediários de outras refinarias, do processamento de um maior número de petróleos e da venda de um maior número de produtos.

Outra alternativa de estudo é a inclusão na modelagem de outras refinarias, com suas trocas e sinergismos, importante principalmente para a análise detalhada das contingências do ponto de vista corporativo.

Outro aspecto que pode ser recomendado para futuros trabalhos, é o de explorar o sinergismo das duas técnicas utilizando o modelo “What-if” para resolver questões do modelo em PL.

Com relação à coleta das informações, elas foram obtidas de diversas fontes e alimentadas diretamente em planilha excel. A medida que a complexidade do modelo vai aumentando, cresce a dificuldade de gerenciar esses dados de entrada. A escolha e a organização das informações em um banco de dados também é um trabalho recomendado.

## FONTES BIBLIOGRÁFICAS

1. Abadie, Elie. Processos de refinação. Petrobras/Serec/Cen-Sud, 1995.
2. ABAST-LOG/GEPLP. Sistemática de planejamento
3. Anargyros, Papageorgiou e Spassimir Paskov Deterministic simulation for risk management. Journal of Portfolio Management; New York, maio 1999.
4. Ballou, Ronald H. Business Logistics Management: Planning and Control. Prentice Hall, New Jersey, 2ª edição, 1995.
5. Ballou, Ronald H. Logística empresarial. Editora Atlas, São Paulo, 1992.
6. Banks, Jerry. Handbook of Simulation. John Wiley & Sons, Inc, 1998.
7. Barros, J.F. Simulation optimization. <http://PO1.pep.ufrj/~jfb Barros/simopt.html>
8. Bascur, O.A e J.P. Kennedy, J.P. Measuring, managing and maximizing refinery performance. Hydrocarbon Processing, janeiro 1996.
9. Bechtel Corporation. Manual de Usuários do Pims. Bechtel Corporation, 8ª edição, out 1995.
10. Bodington, C. Edward. Planning, scheduling, and control integration in the process industries McGraw-Hill 1995
11. Borges, Fernando José Lopes. Uma Análise da Cadeia Logística de Suprimento da Indústria de Petróleo Utilizando a Técnica de Simulação – Uma Aplicação ao Sistema Bacia de Campos – Refinaria de Araucária. Universidade Federal de Santa Catarina, novembro 2000.

12. Bowersox, Donald J. e Closs, David J. Logistical management: The integrated supply chain process. McGraw-Hill Series in Marketing, 1996.
13. Dornier, Philippe-Pierre; Ernst, Ricardo; Fender, Michel e Kouvelis, Panos. Global operation and logistics. John Wiley & Sons, 1998.
14. Eppen, G.D.; Gould, F.J.; Schmidt, C.P.; Moore, Jeffrey H. e Weatherford, Larry R. Introductory management science. Prentice Hall, 1998.
15. Farah, Marco Antônio. Caracterização do petróleo e seus produtos. Petrobras/Serec/Cen-Sud, 1996.
16. Ferreira, Antônio Buarque de Holanda. Novo dicionário da língua portuguesa. Editora Nova Fronteira - 2ª edição.
17. Glidewell, M. Petroleum chain integration. Hydrocarbon Processin, dezembro 1997.
18. Hartmann, J.C.M. Decision-making and modeling in petroleum refining. Hydrocarbon Processin, novembro 1997.
19. Hartmann, J.C.M. Distinguish between scheduling and planning models. Hydrocarbon Processin, julho 1998.
20. Hartmann, J.C.M. Interpreting LP outputs. Hydrocarbon Processin, fevereiro 1999.
21. Hartmann, J.C.M. Is your refinery model balanced?. Hydrocarbon Processin, novembro 1999.
22. Hillier, Frederick S. e Liebermann, Gerald J. Introducción a la investigación de operaciones. McGraw-Hill, Inc., U.S.A, 5ª Edição.

23. Kelton, W. David e Law, Averill M. Simulation Modeling and Analysis McGraw-Hill, Inc., U.S.A, 3ª Edição.
24. Kleijnen, Jack P.C. Simulation and optimization in production planning. Decision Support Systems 9 (1993) 269-280
25. Klingman, Darwin e Phillips, Nancy. Combining recent advances in information and optimization technologies for competitive advantage in the downstream petroleum industry. Proceedings of the Shell conference on logistics, Apeldoorn, the Netherlands, 2-3 novembro 1988.
26. Langeveld, A.T. Downstream oil and chemicals logistics conference: where ends have to meet. Proceedings of the Shell conference on logistics, Apeldoorn, the Netherlands, 2-3 novembro 1988.
27. Lázaro, Luiz Paulo. Lubrificantes básicos. Curso de informação sobre petróleo e derivados. IBP, 1975.
28. Leitão, Doradame. Administração Estratégica, abordagem conceitual e atitudinal. Rio de Janeiro, Senai/DN, Peterobrás, 1995.
29. Leontsinis, Epaminondas. Solventes de petróleo. Curso de informação sobre petróleo e derivados. IBP, 1975.
30. Novaes, Antônio G. e Alvarenga, Antônio C. Logística aplicada suprimento e distribuição física. Livraria Pioneira Editora, São Paulo, 2ª edição, 1994.
31. Saliby, Eduardo. Repensando a Simulação. Editora Atlas S.A. 1989
32. Saliby, Eduardo. Tecnologia da informação: uso da simulação para obtenção de melhorias em operações logística. Revista Tecnológica, janeiro 1999.

33. Teixeira, Wanda Santos. Uma linguagem visual de interação sobre gráficos quantitativos em aplicação computacionais. Junho 1995.
34. The Ohio State University. Strategic planning for logistics. Council of Logistics Management, 1992.
35. Valleur, M.M. System integration improves refining . Hydrocarbon Processing, maio 1998.
36. Van Rijn, C.F. H. Logistics: where ends have to meet Proceedings of the Shell conference on logistics, Apeldoorn, the Netherlands, 2-3 novembro 1988.