



**COPPE/UFRJ**

INCORPORAÇÃO DE INCERTEZAS NO PLANO DE ABASTECIMENTO DE  
UMA EMPRESA DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Luis Francisco Ferreira Senne

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, COPPE, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Rio de Janeiro

Abril 2009

INCORPORAÇÃO DE INCERTEZAS NO PLANO DE ABASTECIMENTO DE  
UMA EMPRESA DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Luis Francisco Ferreira Senne

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO INSTITUTO ALBERTO  
LUIZ COIMBRA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA DE ENGENHARIA  
(COPPE) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE  
DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE  
EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO.

Aprovada por:

---

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

---

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

---

Prof. Silvio Hamacher, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL

ABRIL DE 2009

Senne, Luis Francisco Ferreira

Incorporação de Incertezas no Plano de Abastecimento de uma Empresa da Indústria do Petróleo/ Luis Francisco Ferreira Senne. – Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009.

XV, 150 p.: il.; 29,7 cm.

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Dissertação (mestrado) – UFRJ/ COPPE/ Programa de Engenharia de Produção, 2009.

Referências Bibliográficas: p. 117-125.

1. Plano de Abastecimento. 2. Programação Estocástica. 3. Cadeia de Suprimento do Petróleo. I. Ferreira Filho, Virgílio José Martins. II. Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia de Produção. III. Título.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais Maria Ligia Ferreira Senne e Edson Luiz França Senne por todo amor, apoio e confiança em mim depositada;

À minha esposa Daniella Brito Ianni Senne por toda compreensão, companheirismo e incentivo em todos os momentos;

Ao professor Virgílio José Martins Ferreira Filho pelos ensinamentos acadêmicos, pela orientação concedida e tempo dedicado ao acompanhamento deste trabalho;

Aos professores Laura Silvia Bahiense da Silva Leite e Silvio Hamacher pelos ensinamentos acadêmicos e por aceitarem participar da banca examinadora;

Ao gerente Cláudio Rogério Linassi Mastella pela orientação transmitida ao longo destes anos e pela flexibilidade concedida para a realização deste mestrado;

Ao colega Marco Paulo Diniz Cabral pelos debates e trocas de conhecimento ao longo destes anos, bem como pela ajuda oferecida durante a elaboração deste trabalho;

À Petróleo Brasileiro S.A. pela oportunidade concedida para a realização deste mestrado;

Ao técnico Ramon Campos por sua pronta disposição para solucionar os problemas relacionados ao uso remoto dos computadores;

Ao consultor Horia Tipi pelas preciosas dicas quanto ao uso do XPRESS-SP.

Resumo da Dissertação apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

INCORPORAÇÃO DE INCERTEZAS NO PLANO DE ABASTECIMENTO DE  
UMA EMPRESA DA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO

Luis Francisco Ferreira Senne

Abril/2009

Orientador: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Programa: Engenharia de Produção

Com o intuito de se considerar incertezas no Plano de Abastecimento de uma empresa do setor de petróleo foram utilizadas técnicas de programação estocástica, mais especificamente, modelos de recursos de dois e multi estágios, em que os valores dos parâmetros estocásticos foram descritos através de distribuições discretas. Ao todo foram analisados onze modelos estocásticos que se diferenciam pelo parâmetro considerado aleatório. Estes modelos foram comparados entre si e com um modelo base determinístico. A ferramenta utilizada para a construção e solução dos modelos foi o XPRESS-MP. Para se verificar o impacto das incertezas, algumas informações foram escolhidas para serem analisadas. Foram constatados diferentes graus de impacto para as diversas incertezas. Para cada modelo também foram avaliados o valor da solução estocástica e o esforço computacional exigido.

Abstract of Dissertation presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

INCORPORATION OF UNCERTAINTIES IN THE SUPPLY PLAN OF AN OIL  
COMPANY

Luis Francisco Ferreira Senne

April/2009

Advisor: Virgílio José Martins Ferreira Filho

Department: Industrial Engineering

In order to considerate some uncertainties in the supply plan of an oil company, stochastic programming techniques were employed, more specifically, two-stage and multi-stage recourse models, where the stochastic parameters were described by discrete distributions. Eleven stochastic models, telling them apart by the stochastic parameter, were studied. Each of those models was compared with each other and with a deterministic one. To build and solve the models the software XPRESS-MP was used. To measure the impact of uncertainties in the plan some information were chosen to be watched. It was verified different degrees of impacts associated to different kinds of uncertainty. The values of the stochastic solution as well as the computational effort were also analyzed.

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica .....</b>                  | <b>3</b>  |
| 2.1. Cadeia de suprimento do petróleo .....                                    | 3         |
| 2.1.1. Elos da cadeia de suprimento do petróleo e literatura relacionada ..... | 4         |
| 2.1.2. Resumo das abordagens de modelagem .....                                | 10        |
| 2.2. Incorporação de incertezas .....  | 11        |
| 2.2.1. Abordagens utilizadas em outros setores e literatura relacionada .....  | 12        |
| 2.2.2. Programação Estocástica .....   | 14        |
| 2.2.2.1. Modelos de recurso de dois estágios .....                             | 14        |
| 2.2.2.2. Modelos de recurso multi estágios .....                               | 16        |
| 2.2.2.3. Geração de cenários .....   | 18        |
| 2.2.2.4. Medição da qualidade das soluções: EVPI e VSS .....                   | 19        |
| 2.2.2.5. Ferramenta utilizada: XPRESS-MP .....                                 | 20        |
| <b>3. Sistema Considerado .....</b>  | <b>23</b> |
| 3.1. Resumo do Sistema Petrobras .....   | 23        |
| 3.2. Sistema simplificado .....  | 26        |
| 3.2.1. Visão macro .....   | 26        |
| 3.2.2. Informações sobre produtos e qualidade .....                            | 28        |
| 3.2.3. Informações sobre processos e misturas .....                            | 32        |
| 3.2.4. Informações sobre transporte e armazenagem .....                        | 38        |
| 3.2.5. Informações comerciais .....  | 42        |
| <b>4. Modelagem .....</b>  | <b>44</b> |
| 4.1. Modelo determinístico .....   | 44        |
| 4.1.1. Formulação matemática simplificada .....                                | 44        |
| 4.1.1.1. Índices .....   | 44        |
| 4.1.1.2. Conjuntos .....   | 45        |
| 4.1.1.3. Parâmetros .....  | 45        |
| 4.1.1.4. Variáveis .....   | 47        |
| 4.1.1.5. Restrições .....  | 48        |
| 4.1.1.5.1. Restrições de Balanço .....   | 48        |
| 4.1.1.5.2. Restrições de Qualidade .....                                       | 48        |
| 4.1.1.5.3. Restrições de Estoque .....   | 49        |
| 4.1.1.5.4. Restrições de Transporte / Fluxo .....                              | 49        |
| 4.1.1.5.5. Restrições de Processamento .....                                   | 49        |
| 4.1.1.5.6. Restrições de Comercialização .....                                 | 49        |

|            |   |            |
|------------|---|------------|
| 4.1.1.5.7. | Restrições de Não-negatividade .....                                      | 49         |
| 4.1.1.5.8. | Função Objetivo .....   | 50         |
| 4.1.2.     | Comentários sobre as restrições.....                                      | 50         |
| 4.1.2.1.   | Restrições de Balanço.....  | 50         |
| 4.1.2.2.   | Restrições de Qualidade .....   | 51         |
| 4.1.2.3.   | Restrições de Estoque .....   | 52         |
| 4.1.2.4.   | Restrições de Transporte / Fluxo .....                                    | 52         |
| 4.1.2.5.   | Restrições de Processamento.....  | 52         |
| 4.1.2.6.   | Restrições de Comercialização.....  | 53         |
| 4.2.       | Modelos Estocásticos .....  | 53         |
| 4.2.1.     | Estimativa dos possíveis valores dos parâmetros aleatórios.....           | 54         |
| 4.2.2.     | Construção dos modelos estocásticos .....                                 | 59         |
| 4.2.3.     | Considerações sobre os modelos estocásticos .....                         | 60         |
| <b>5.</b>  | <b>Resultados .....</b>   | <b>62</b>  |
| 5.1.       | Resultados do cenário determinístico.....                                 | 64         |
| 5.2.       | Impactos de incertezas no nível de utilização das unidades.....           | 64         |
| 5.2.1.     | Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos .....                 | 65         |
| 5.2.2.     | Impactos de incertezas quanto aos preços de produtos.....                 | 72         |
| 5.2.3.     | Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades.....          | 78         |
| 5.3.       | Impactos de incertezas na formação de estoques de derivados .....         | 84         |
| 5.3.1.     | Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos .....                 | 85         |
| 5.3.2.     | Impactos de incertezas quanto aos preços de produtos.....                 | 87         |
| 5.3.3.     | Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades.....          | 90         |
| 5.4.       | Impactos de incertezas na comercialização de derivados.....               | 92         |
| 5.4.1.     | Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos .....                 | 92         |
| 5.4.2.     | Impactos de incertezas quanto aos preços dos produtos.....                | 95         |
| 5.4.3.     | Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades.....          | 98         |
| 5.5.       | Impactos de incertezas no resultado econômico .....                       | 101        |
| 5.5.1.     | Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos .....                 | 101        |
| 5.5.2.     | Impactos de incertezas quanto aos preços de produtos.....                 | 103        |
| 5.5.3.     | Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades.....          | 104        |
| 5.6.       | Resumo dos resultados associados à utilização de modelagem estocástica .. | 106        |
| 5.6.1.     | Valores robustos para as informações analisadas .....                     | 107        |
| 5.6.2.     | Valor da modelagem estocástica .....                                      | 112        |
| 5.6.3.     | Esforço computacional .....   | 113        |
| <b>6.</b>  | <b>Considerações Finais .....</b>   | <b>115</b> |
| <b>7.</b>  | <b>Referências Bibliográficas .....</b>                                   | <b>117</b> |



|   |            |
|---|------------|
| <b>8. Anexos.....</b>                           | <b>126</b> |
| 8.1. Informações comerciais.....                | 126        |
| 8.2. Formulação matemática detalhada .....      | 133        |
| 8.2.1. Índices .....                            | 133        |
| 8.2.2. Conjuntos.....                           | 133        |
| 8.2.3. Parâmetros .....                         | 137        |
| 8.2.4. Variáveis.....                           | 139        |
| 8.2.5. Restrições .....                         | 140        |
| 8.2.5.1. Restrições de Balanço.....             | 140        |
| 8.2.5.2. Restrições de Qualidade .....          | 140        |
| 8.2.5.3. Restrições de Estoque .....            | 141        |
| 8.2.5.4. Restrições de Transporte / Fluxo ..... | 141        |
| 8.2.5.5. Restrições de Processamento.....       | 141        |
| 8.2.5.6. Restrições de Comercialização .....    | 142        |
| 8.2.5.7. Restrições de Não-negatividade .....   | 142        |
| 8.2.5.8. Função Objetivo .....                  | 142        |
| 8.2.6. Comentários sobre as restrições.....     | 142        |
| 8.2.6.1. Restrições de Balanço.....             | 143        |
| 8.2.6.2. Restrições de Qualidade .....          | 145        |
| 8.2.6.3. Restrições de Estoque.....             | 146        |
| 8.2.6.4. Restrições de Transporte / Fluxo ..... | 147        |
| 8.2.6.5. Restrições de Processamento.....       | 147        |
| 8.2.6.6. Restrições de Comercialização .....    | 149        |

## ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

|  |    |
|--|----|
| Ilustração 2.1 – Quantidade de trabalhos pesquisados sobre a cadeia de suprimento do petróleo e elos enfatizados ..... | 11 |
| Ilustração 2.2– Árvore de cenários genérica.....   | 18 |
| Ilustração 3.1– Escopo do Plano de Abastecimento da Petrobras .....  | 24 |
| Ilustração 3.2– Entidades representadas no Plano de Abastecimento da Petrobras.....                                    | 25 |
| Ilustração 3.3– Visão macro do sistema considerado .....   | 28 |
| Ilustração 3.4– Esquema de refino .....  | 33 |
| Ilustração 3.5– Esquema de degradações (misturas) .....  | 38 |
| Ilustração 4.1– Árvore de possíveis cenários de realização para cada parâmetro incerto .....                           | 58 |

## ÍNDICE DE GRÁFICOS

|   |    |
|---|----|
| Gráfico 2.1 – Quantidade de trabalhos pesquisados sobre a cadeia de suprimento do petróleo e abordagem de solução .....     | 11 |
| Gráfico 3.1 – Rendimentos de derivados para os petróleos considerados .....   | 29 |
| Gráfico 4.1 – Desvios entre as demandas realizada e planejada de diesel.....  | 56 |
| Gráfico 5.1 – Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de destilação..                              | 65 |
| Gráfico 5.2 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de FCC.....                                  | 68 |
| Gráfico 5.3 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de desasfaltação .....                       | 69 |
| Gráfico 5.4 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de coque.....                                | 70 |
| Gráfico 5.5 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de HDS .....                                 | 71 |
| Gráfico 5.6 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de HDT .....                                 | 71 |
| Gráfico 5.7- Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de destilação .....                           | 73 |
| Gráfico 5.8 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de FCC.....                                  | 75 |
| Gráfico 5.9 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de desasfaltação .....                       | 76 |
| Gráfico 5.10 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de coque.....                               | 77 |
| Gráfico 5.11 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de HDS .....                                | 77 |
| Gráfico 5.12 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de HDT .....                                | 78 |
| Gráfico 5.13 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização da destilação.....     | 79 |
| Gráfico 5.14 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do FCC .....           | 80 |
| Gráfico 5.15 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização da desasfaltação ..... | 81 |
| Gráfico 5.16 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do coque.....          | 82 |
| Gráfico 5.17 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do HDS .....           | 83 |
| Gráfico 5.18 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do HDT .....           | 83 |
| Gráfico 5.19 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de formação de estoques de gasolina .....    | 86 |

|  |     |
|--|-----|
| Gráfico 5.20 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de formação de estoques de diesel .....                           | 86  |
| Gráfico 5.21 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de formação de estoques de óleo combustível e bunker .....        | 87  |
| Gráfico 5.22 - Impacto de incertezas quanto ao preço de produtos na indicação de formação de estoques de gasolina .....                          | 88  |
| Gráfico 5.23 - Impacto de incertezas quanto ao preço de produtos na indicação de formação de estoques de diesel .....                            | 89  |
| Gráfico 5.24 - Impacto de incertezas quanto ao preço de produtos na indicação de formação de estoques de óleo combustível e bunker .....         | 89  |
| Gráfico 5.25 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de formação de estoques de gasolina .....                 | 90  |
| Gráfico 5.26 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de formação de estoques de diesel .....                   | 91  |
| Gráfico 5.27 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de formação de estoques de óleo combustível e bunker..... | 91  |
| Gráfico 5.28 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de importação de diesel.....                                      | 93  |
| Gráfico 5.29 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de exportação de gasolina.....                                    | 94  |
| Gráfico 5.30 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de exportação de óleo combustível e bunker .....                  | 95  |
| Gráfico 5.31 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos na indicação de importação de diesel.....                                     | 96  |
| Gráfico 5.32 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos na indicação de exportação de gasolina.....                                   | 97  |
| Gráfico 5.33 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos na indicação de exportação de óleo combustível e bunker .....                 | 98  |
| Gráfico 5.34 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de importação de diesel.....                              | 99  |
| Gráfico 5.35 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de exportação de gasolina .....                           | 100 |
| Gráfico 5.36 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de exportação de óleo combustível e bunker.....           | 100 |
| Gráfico 5.37 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos no resultado econômico .   | 102 |

|   |     |
|---|-----|
| Gráfico 5.38 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos no balanço de operações externas.....                     | 102 |
| Gráfico 5.39 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos no resultado econômico..                                 | 103 |
| Gráfico 5.40 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos no balanço de operações externas.....                    | 104 |
| Gráfico 5.41 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades no resultado econômico .....                      | 105 |
| Gráfico 5.42 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades no balanço de operações externas.....             | 105 |
| Gráfico 5.43 – Probabilidade da utilização de unidades superar um valor mínimo robusto para cada caso .....                 | 108 |
| Gráfico 5.44 - Probabilidade da indicação de formação de estoques ser abaixo de um nível máximo robusto para cada caso..... | 110 |
| Gráfico 5.45 - Probabilidade da indicação de comercialização de derivados superar um nível mínimo em cada caso .....        | 111 |
| Gráfico 5.46 Probabilidade do resultado econômico superar um nível mínimo em cada caso...                                   | 112 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 2.1 – Resumo da literatura dedicada à cadeia do <i>downstream</i> : escopo e abordagens de solução.....                     | 10 |
| Tabela 2.2 – Resumo da literatura sobre trabalhos com incorporação de incertezas: setor de aplicação e abordagens de solução ..... | 13 |
| Tabela 3.1 – Associação entre petróleo e derivados que possuem diferenças de qualidade.....  | 30 |
| Tabela 3.2 – Limites de especificação para os parâmetros de qualidade considerados.....  | 31 |
| Tabela 3.3 – Parâmetros de qualidade dos produtos utilizados em misturas .....   | 32 |
| Tabela 3.4 – Rendimentos de derivados na destilação para cada tipo de petróleo .....   | 34 |
| Tabela 3.5 – Rendimentos de produtos no FCC para cada tipo de carga .....  | 35 |
| Tabela 3.6 – Rendimentos de produtos na desasfaltação.....   | 35 |
| Tabela 3.7 – Rendimentos de produtos no coque .....  | 35 |
| Tabela 3.8 – Rendimentos de produtos nas unidades de tratamento (HDS e HDT).....   | 35 |
| Tabela 3.9 – Capacidade máxima de processamento por unidade.....   | 36 |
| Tabela 3.10 – Composição dos grupos de transporte .....  | 39 |
| Tabela 3.11 – Capacidade de movimentação mensal de cada grupo de produto por sentido .....   | 40 |
| Tabela 3.12 – Composição dos grupos de estoques .....  | 41 |
| Tabela 3.13 – Capacidade de estocagem mensal para cada grupo de produtos.....  | 41 |
| Tabela 4.1 – Desvios na demanda de diesel para cada período que antecede sua realização .....                                      | 56 |
| Tabela 4.2 – Desvios na demanda de gasolina para cada período que antecede sua realização ...                                      | 56 |
| Tabela 4.3 – Desvios na demanda de óleo combustível para cada período que antecede sua realização.....                             | 57 |
| Tabela 4.4 - Desvios no preço internacional de diesel para cada período que antecede sua realização.....                           | 57 |
| Tabela 4.5 - Desvios no preço internacional de gasolina para cada período que antecede sua realização.....                         | 57 |
| Tabela 4.6 - Desvios no preço internacional de óleo combustível para cada período que antecede sua realização .....                | 57 |
| Tabela 4.7 - Desvios na disponibilidade da destilação para cada período que antecede sua realização.....                           | 57 |
| Tabela 4.8 - Desvios na disponibilidade do FCC para cada período que antecede sua realização                                       | 58 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabela 4.9 - Desvios na disponibilidade do coque para cada período que antecede sua realização .....  | 58  |
| Tabela 4.10 - Desvios na disponibilidade das unidades de tratamento para cada período que antecede sua realização.....                          | 58  |
| Tabela 4.11 – Descrição dos parâmetros incertos associados a cada modelo estocástico .....  | 61  |
| Tabela 5.1 – Resumo dos resultados do cenário determinístico .....  | 64  |
| Tabela 5.2 – Desvio padrão das informações analisadas para cada incerteza considerada .....   | 107 |
| Tabela 5.3 – Valor da solução estocástica e sob informação perfeita em cada caso .....  | 113 |
| Tabela 5.4 – Número de restrições, variáveis e tempo para otimização em cada caso.....  | 114 |
| Tabela 8.1– Custo de transporte (US\$/m <sup>3</sup> ) de cada produto entre dois locais .....  | 126 |
| Tabela 8.2 – Custo de utilização de unidade (US\$/m <sup>3</sup> ) .....  | 126 |
| Tabela 8.3 – Custo de estocagem (US\$/m <sup>3</sup> ) de cada produto estocável .....  | 127 |
| Tabela 8.4 – Volume (mil m <sup>3</sup> ) de cada produto demandado no mercado interno em cada período .....                                    | 127 |
| Tabela 8.5 – Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de cada produto demandado no mercado interno em cada período .....                                    | 128 |
| Tabela 8.6 - Volume (mil m <sup>3</sup> ) de cada produto demandado no mercado externo (opções de exportação) em cada período.....              | 128 |
| Tabela 8.7 - Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de cada produto demandado no mercado externo (opções de exportação) em cada período.....              | 129 |
| Tabela 8.8 - Volume (mil m <sup>3</sup> ) de cada produto ofertado no mercado externo (opções de importação) em cada período .....              | 130 |
| Tabela 8.9 - Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de cada produto ofertado no mercado externo (opções de importação) em cada período .....              | 131 |
| Tabela 8.10 – Volume extra (mil m <sup>3</sup> ) de cada produto ofertado no mercado externo (opções de importação extra) em cada período ..... | 131 |
| Tabela 8.11 - Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de cada produto extra ofertado no mercado externo (opções de importação extra) em cada período ..... | 132 |
| Tabela 8.12 – Volume (mil m <sup>3</sup> ) de cada tipo de petróleo produzido em cada período .....   | 132 |

## 1. Introdução

No mundo globalizado dos dias de hoje, a crescente concorrência entre as empresas torna cada vez mais difícil a sobrevivência no mercado. Para se manterem vivas, as companhias devem estar sempre buscando maiores vantagens competitivas frente às suas concorrentes. Para a obtenção dessas vantagens competitivas, a eficiente gestão da cadeia de suprimentos da empresa tem papel preponderante.

A integração e a transparência entre os vários elos que compõem a cadeia de suprimentos, permitindo um livre fluxo de informações e bens dentro das empresas e ao longo da cadeia, é condição necessária, mas não suficiente, para uma eficiente gestão da cadeia de suprimentos. Por mais que a tecnologia de informação (através de sistemas inovadores de controle dos fluxos ao longo da cadeia e de apoio à tomada de decisão), e a adoção de novos conceitos de negócios calcados na cooperação, e não na competição entre as empresas de uma mesma cadeia, tenham favorecido esta integração, ainda assim ocorrem rupturas nas cadeias de suprimentos. Mesmo empresas integradas verticalmente sofrem com problemas como, por exemplo, falta ou excesso de estoques, necessidade de baixar seus preços, entre outros. Isto acontece porque existem incertezas que, muitas vezes, são negligenciadas.

A crescente globalização aumenta a complexidade da gestão das cadeias de suprimentos, dada a dependência entre empresas com culturas diferentes espalhadas em diferentes partes do mundo e a elevada exposição das companhias ao risco. Estes riscos podem ser financeiros (custos excessivos de estoques, perda de vendas, etc.), operacionais (incertezas quanto à demanda, ao suprimento, à disponibilidade dos recursos, etc.) ou de mercado (perda de oportunidades comerciais). Uma abordagem conservadora para lidar, por exemplo, com os riscos operacionais consistiria em manter elevados níveis de estoques ou duplicidade de recursos. No entanto, isso aumenta o capital empatado das empresas, reduzindo suas possibilidades de investimento e elevando os riscos financeiros e de mercado. Uma abordagem mais eficaz para se lidar com os riscos e, assim, permitir a gestão das cadeias de suprimentos de forma mais eficiente passa pela utilização de técnicas de programação estocástica.

A utilização de técnicas de programação estocástica possibilita o desenvolvimento de metodologias eficientes para a tomada de decisão sob incerteza,



ponderando-se os riscos e as recompensas de forma apropriada para a obtenção da melhor solução possível.

O setor de petróleo, apesar de lidar com *commodities*, enfrenta muitas incertezas, que podem estar ligadas a questões geopolíticas (guerras em regiões produtoras de petróleo e decisões da OPEP tornam incertas a oferta de petróleo no mundo), ambientais (terremotos, furacões, chuvas etc. oferecem riscos à capacidade produtiva das empresas), de qualidade dos produtos (a busca por produtos menos poluentes e fontes alternativas de energia tornam incertas as demandas por alguns produtos), econômicas (crises econômicas locais ou globais trazem incertezas aos preços e às demandas dos produtos), dentre outras.

Na busca por uma eficiente gestão da cadeia de suprimento, este trabalho tem como objetivo a utilização de técnicas de programação estocástica para a incorporação de incertezas no Plano de Abastecimento de uma empresa do setor de petróleos.

Este trabalho está organizado da seguinte forma: no capítulo 2 será apresentada uma breve fundamentação teórica sobre cadeia de suprimento do petróleo (revisão da literatura sobre os diversos problemas relacionados e as abordagens de solução utilizadas) e sobre métodos de incorporação de incertezas em modelos matemáticos (revisão da literatura sobre abordagens utilizadas e ênfase em programação estocástica, abordagem que será utilizada neste trabalho); no capítulo 3 será feita uma simplificada apresentação sobre o Sistema Petrobras e, em seguida, será detalhado o sistema que será utilizado neste trabalho; no capítulo 4 será apresentada a formulação matemática do problema determinístico bem como as considerações para a construção dos modelos estocásticos; no capítulo 5 serão comparados os resultados obtidos a partir de cada um dos modelos e as considerações finais serão feitas no capítulo 6.

## 2. Fundamentação Teórica e Revisão Bibliográfica

Para abastecer os diversos mercados consumidores de derivados de petróleo ao redor do mundo de forma plena, econômica e segura, as companhias de petróleo precisam ter um plano que considere as milhares de variáveis e restrições envolvidas e que lhes assegure o máximo resultado econômico, ou seja, precisam de um Plano de Abastecimento.

Dada a elevada complexidade e as diversas fontes de incertezas que afetam a indústria de petróleo, desde desastres naturais como furacões, terremotos e inundações, passando por riscos operacionais (confiabilidade dos ativos), até fatores geopolíticos como guerras em regiões produtoras de petróleo, com reflexos na capacidade produtiva e logística das companhias e, conseqüentemente, nos preços e demandas dos produtos no mercado, a elaboração de um Plano de Abastecimento robusto é uma tarefa complexa.

São inúmeras as fontes de incerteza que podem afetar o plano. As empresas que conseguem otimizar suas atividades levando em consideração as principais incertezas envolvidas têm maiores chances de obter um Plano de Abastecimento eficiente e aderente à realidade. Dado o elevado capital movimentado ao longo da cadeia de suprimentos do petróleo, tais empresas têm maior potencial de auferir grandes ganhos econômicos e, conseqüentemente, elevadas vantagens competitivas.

Portanto, por mais complexa que seja, é primordial a busca por um Plano de Abastecimento robusto, ou seja, um plano que considere conjuntamente diferentes atividades da cadeia de suprimento do petróleo e que leve em consideração as incertezas associadas aos parâmetros mais críticos.

### 2.1.Cadeia de suprimento do petróleo

Em comparação com outras indústrias, a cadeia de suprimento do petróleo é bastante complexa (Hussain, Assavapokee *et al.*, 2006). Na literatura, as atividades que compõem esta cadeia são divididas em dois ou três grandes segmentos, dependendo do autor.

A maior parte dos autores (Bueno, 2003; Manzano, 2005; Hussain, Assavapokee *et al.*, 2006; Carneiro, 2008) divide a cadeia de suprimento do petróleo em duas cadeias menores: *upstream* e *downstream*. No segmento de *upstream* estão compreendidas as

atividades de exploração e produção do petróleo. Na cadeia do *downstream* são desempenhadas as atividades de transporte do petróleo até as refinarias, sua comercialização (compra e venda), seu refino, a produção dos derivados e sua comercialização (compra e venda), e o transporte dos derivados ao mercado.

Há ainda aqueles que dividem a cadeia de suprimento do petróleo em três segmentos (Kimura, 2005), incluindo o *midstream*. De acordo com essa divisão, este segmento intermediário passa a englobar as atividades desde o transporte do petróleo do local de produção até produção dos derivados nas refinarias, ficando as atividades de distribuição e venda dos derivados ao mercado no segmento de *downstream*.

### **2.1.1. Elos da cadeia de suprimento do petróleo e literatura relacionada**

Na posição mais à montante na cadeia de suprimento do petróleo estão as atividades de exploração e produção (E&P) de petróleos. Essas atividades do segmento de *upstream* são caracterizadas pelo intensivo capital requerido e pelo elevado risco de insucesso associado, o que limita o número de entrantes neste setor (Araújo, 2004)<sup>1</sup>.

Seguindo a divisão da cadeia de suprimento do petróleo em dois segmentos, os próximos elos constituem a cadeia do *downstream*: a aquisição dos petróleos, seu transporte até os terminais (através de navios ou dutos), sua armazenagem, a venda de petróleos, e/ou o envio até as refinarias onde serão processados para a produção de derivados, a armazenagem dos derivados, o transporte dos derivados produzidos (através de dutos, caminhões, trens, etc.) até as bases de distribuição, a compra de derivados acabados e sua entrega nas bases de distribuição, o envio de derivados produzidos para os terminais de onde serão exportados, a distribuição dos derivados para o mercado consumidor.

Devido ao fato de existir, em cada elo da cadeia de suprimentos do petróleo, vários e, muitas vezes, complexos subproblemas a serem resolvidos, o gerenciamento integrado de toda a cadeia de suprimento pode resultar em modelos matemáticos intratáveis computacionalmente (Jia e Ierapetritou, 2003). O que se encontra mais

---

<sup>1</sup> O foco deste trabalho é na cadeia do *downstream* e, sendo assim, as atividades do *upstream* não serão detalhadas.

comumente na literatura são diferentes modelos que otimizam partes da cadeia de suprimento do petróleo independentemente, com diferentes abordagens de solução.

Os autores (Más e Pinto, 2003) desenvolveram uma formulação de programação linear-inteira mista para a obtenção do *scheduling* ótimo de petróleos a partir de terminais (considerando-se navios, píeres, tanques, subestações) para as refinarias, utilizando-se uma rede de oleodutos. São considerados as datas de chegada, os níveis de estoque e os custos associados aos navios petroleiros; as capacidades, condições operacionais e custos dos píeres; as capacidades e condições operacionais para a estocagem de diferentes tipos de petróleo; os custos e infra-estrutura relacionados à malha de dutos; as capacidades de estocagem e processamento do petróleo nas refinarias bem como a receita associada ao refino. Como resposta o modelo proposto indica um *scheduling* de navios aos píeres e alocação de petróleos aos tanques, um *scheduling* de utilização dos dutos e alocação de petróleos às refinarias que minimiza os custos operacionais de todo o processo.

Os autores (Lee, Pinto *et al.*, 1996) apresentam um modelo de programação linear inteira mista (MILP) para lidar com o problema de gestão de estoques de petróleos em refinarias. Enquanto (Ponnambalam, Vannelli *et al.*, 2002) desenvolveram uma abordagem que combina o método simplex com um método de pontos interiores para a solução do problema de planejamento multi-período na indústria de refino de petróleo, (Joly, Moro *et al.*, 2002) propõem modelos de programação não linear e programação inteira mista para o planejamento da produção em refinarias.

Já (Pinto, Joly *et al.*, 2000) dividem seu trabalho em algumas partes, todas também com foco na otimização de atividades desempenhadas pela refinaria, e utilizam várias abordagens de modelagem (MIP, MILP, MINLP) para atacar alguns tipos de problemas. Eles primeiramente propõem um modelo para a definição de uma nova forma de operação, que maximize a produção de produtos de maior valor agregado e satisfaça a todas as restrições de qualidade. Também abordam o problema de gestão de estoques de petróleos na refinaria (o que envolve o recebimento do óleo por duto, sua transferência para tanques e o *scheduling* de envio dos petróleos para as unidades de destilação) e de mistura de produtos (para a obtenção de qualidade para o atendimento das especificações e de volume para atendimento da demanda).

Utilizando-se de modelos de programação não-linear, o problema de mistura de produtos também é tratado por (Pinto e Moro, 2000) e o de maximização de produtos de

maior valor agregado também é o foco de (Moro, Zanin *et al.*, 1998). (Jia e Ierapetritou, 2003), utilizando-se de modelos de programação linear inteira mista (MILP), abordam o problema de mistura de produtos (produção de gasolina) e o de *scheduling* de produtos para tanques de produto final e para atendimento de pedidos.

Os autores (Magatão, Arruda *et al.*, 2002) propõem um modelo de programação linear-inteira mista (MILP) para auxiliar a decisão de seqüenciar produtos em uma rede de dutos entre refinaria e terminal levando em consideração restrições de tancagem, de disponibilidade de produtos, de bombeio entre outras.

Dedicado ao problema de transporte marítimo de produtos derivados de petróleo, (Iakovou, 2001) apresenta uma metodologia iterativa que combina programação linear multiobjetivo e a opinião de um tomador de decisão para auxiliar o entendimento dos *trade-offs* existentes entre risco e custos de transporte. Para uma dada uma frota de navios, os petróleos e os derivados devem ser transportados de um terminal a outro, respeitando-se as restrições de cada terminal e a um mínimo custo e risco.

Focado mais no final da cadeia de suprimentos, (Ross, 2000) propõe um modelo DEA para o planejamento da rede de distribuição do segmento *downstream* baseado em medidas de performance, em que a alocação de recursos, tais como centros de distribuição e veículos, é gerenciada de forma a maximizar o lucro. O custo de entrega é determinado dependendo da zona geográfica, custo da viagem, frequência de pedidos e distância a cada cliente. Esta abordagem foi testada em quarenta problemas de tamanho real e os *trade-offs* entre os problemas permitiram analisar as interações existente entre o lucro esperado, nível de serviço e eficiência operacional para aquisição de recursos e redistribuição.

Apesar da maioria dos modelos propostos basearem-se em programação determinística, incertezas quanto a preços, demandas e outras condições de mercado podem tornar não robustas ou mesmo inviáveis decisões tomadas a partir destes modelos (Li, Hui *et al.*, 2004). (Al-Othman, Lababidi *et al.*, 2008) destacam ainda a existência de incertezas quanto a disponibilidade e qualidade de petróleos, capacidade de processamento e rendimentos dos derivados. Há mais de cinquenta anos, outros autores (Beale, 1955; Dantzig, 1955) já davam a entender que, devido à existência de incertezas nos parâmetros dos problemas reais, que variam entre o momento da modelagem e o momento em que a decisão deve ser tomada, a modelagem sem a

incorporação de incertezas não era a mais adequada para representar a verdadeira dinâmica do mundo real.

Nos trabalhos (Cheng e Duran, 2003; Cheng e Duran, 2004) é desenvolvido um sistema de suporte à decisão para o problema de armazenagem e transporte de petróleo. O sistema combina simulação, para a representação do dinâmico sistema de armazenagem e transporte, e para análises “*What if*” de cenários, e otimização estocástica (através de processos de decisão de Markov) para a proposição de ações em tempo real levando em considerações incertezas quanto à demanda de petróleo e tempo de viagem.

O problema da escolha de qual petróleo comprar e o quanto produzir de cada derivado é considerado em (Pongsakdia, Rangsunvigit et al., 2006), em que programação estocástica com modelos de recurso de dois estágios são empregados.

O planejamento operacional de uma refinaria, considerando-se o *tradeoff* entre o nível de serviço (associado ao atendimento da demanda) e a receita da planta, é abordado por (Li, Hui et al., 2004). Convencidos de que no cálculo da expectativa de funções incertas reside a maior dificuldade da programação estocástica, os autores discutem diferentes métodos para o cálculo dessas expectativas, aproximando-as através de funções lineares por partes e, assim, reduzindo-se o esforço computacional. (Hsieh e Chiang, 2001) propõem um sistema de planejamento da produção em refinaria, combinando programação linear e teoria *Fuzzy*, para lidar com incertezas acerca de custos de produção e demanda de produtos. (Neiro e Pinto, 2005) também enfatizam o planejamento da produção em refinaria através da utilização de modelos de programação não-linear inteira mista e considerando incertezas quanto a preços e demandas. O mesmo tipo de problema é abordado por (Neiro e Pinto, 2006), entretanto com uma abordagem de solução diferente. Desta vez os autores aliaram programação estocástica com técnicas de decomposição (decomposição lagrangeana) para explorar a estrutura bloco-diagonal do problema e, então, reduzir o esforço computacional. O planejamento das atividades em refinarias também foi abordado por (Khor, Elkamel et al., 2008), em que incertezas quanto preço, demanda e rendimento dos produtos foram consideradas através de modelos de programação estocástica. Em quatro abordagens diferentes, os autores combinaram programação estocástica de dois estágios com recurso fixo, modelo média-variância de Markowitz, e o modelo Desvio Absoluto

Médio (MAD) para a minimização do valor esperado e/ou da variância dos valores esperados associados aos parâmetros incertos.

Apesar do grande desafio, a integração dos elos da cadeia do *downstream* desde a obtenção da matéria-prima até a entrega dos produtos finais ao consumidor é bastante relevante para o sucesso da empresa (Neiro e Pinto, 2004; Gainsborough, 2006; Hussain, Assavapokee *et al.*, 2006). A evolução da tecnologia dos computadores tem mostrado potencial para a solução de problemas grandes (Türkay e Grossmann, 1996; Van Den Heever e Grossmann, 1999; Vecchiotti e Grossmann, 2000), o que permite tratar do complexo problema de gerenciamento da cadeia de suprimentos do *downstream* em um único modelo.

Segundo (Neiro e Pinto, 2003), a abordagem do gerenciamento da cadeia de suprimentos de petróleo foi pioneiramente realizada por (Sear, 1993), que utilizou programação linear para planejar a logística de distribuição de uma companhia de petróleo. O modelo considerava a compra e transporte de petróleos, processamento e transporte dos produtos, além de operações de estocagem.

Um modelo de planejamento corporativo, utilizando-se programação não linear inteira mista (MINLP), contendo múltiplas refinarias que se interligam através de uma malha de dutos é apresentado por (Neiro e Pinto, 2003; 2004). Neste modelo, navios petroleiros transportam petróleos<sup>2</sup> de diferentes tipos para terminais, que são conectados às refinarias através de uma rede de dutos. Os petróleos são convertidos em derivados nas refinarias, que podem estar conectadas a outras para aproveitar ao máximo a capacidade instalada de cada refinaria. Os derivados produzidos nas refinarias são enviados aos centros de distribuição. A partir deste ponto, os produtos podem ser transportados tanto por dutos quanto por caminhões, trens ou navios. O modelo proposto deve, então, apresentar o nível de produção de cada produto em cada local, bem como as condições de operação para cada refinaria, levando em consideração as condições de transporte e armazenagem dos produtos, e com o objetivo de se obter o máximo resultado econômico (receita com a venda dos produtos menos custos com matéria-prima, operações e estoques).

---

<sup>2</sup> O petróleo pode ser de produção própria ou adquirido de fornecedores externos.

Os autores (Escudero, Quintana *et al.*, 1999) propuseram um modelo de programação linear que aborda as atividades de logística de suprimento, transformação (refino) e distribuição com o objetivo de atendimento da demanda ao mínimo custo total. Para a consideração de incertezas nos custos de suprimento, demandas e preços dos produtos, foi utilizada análise de cenários em dois estágios, em que as incertezas são modeladas através de um conjunto de cenários (resultando em um modelo de programação linear estendido) e as decisões quanto à política de suprimento, transformação e distribuição para os períodos iniciais são tomadas, sem a necessidade de antecipar as decisões relacionadas aos outros períodos.

O trabalho (Dempster, Pedrón *et al.*, 2000) também considera as atividades de suprimento, refino e distribuição, mas para um consórcio de companhias de petróleo. Para atacar o problema, os autores também utilizaram programação estocástica. Primeiramente foi desenvolvido um modelo de programação linear multiperíodo determinístico para ser utilizado como base para implementar uma formulação de programação estocástica com incertezas nas demandas dos produtos e custos de suprimentos. O modelo considera que cada operador supre cada terminal com um certo volume de petróleo previamente acordado pelo consórcio. Nos terminais, os petróleos são estocados e, posteriormente, transportados para as refinarias. As transformações dos petróleos em derivados acontecem nas refinarias, que podem processar o petróleo existente em estoque recebido dos terminais no período anterior ou no período atual. Os produtos finais são transportados das refinarias para outros terminais onde são estocados temporariamente antes de serem distribuídos no mercado. Cada companhia de petróleo individualmente deve operar de acordo com a necessidade de todo o consórcio, compartilhando os produtos, as refinarias e os meios de transporte. Recursos insuficientes do consórcio, tanto em termos de refino ou de logística, podem causar inviabilidades no suprimento do mercado. Neste caso, pode-se recorrer ao mercado spot para a obtenção do produto. Caso o suprimento de petróleo seja insuficiente, o consórcio pode comprar petróleo no mercado spot. Ao contrário, caso haja excedente de petróleo, este pode ser vendido ao mercado spot.

A importância da integração dos elos da cadeia do petróleo é enfatizada em (Al-Othman, Lababidi *et al.*, 2008), que abordam conjuntamente, através de um modelo de programação estocástica de dois estágios, atividades relacionadas à produção de



petróleos, seu processamento e distribuição dos derivados ao longo de vários períodos. Incertezas relacionadas ao mercado (demandas e preços) também são consideradas.

### 2.1.2. Resumo das abordagens de modelagem

Com o intuito de visualizar mais facilmente o escopo de atuação e a abordagem de solução utilizada pelos trabalhos comentados na seção anterior foi elaborada a Tabela 2.1 apresentada a seguir.

**Tabela 2.1 – Resumo da literatura dedicada à cadeia do *downstream*: escopo e abordagens de solução**

| Referência Bibliográfica                          | Foco do trabalho |            |             |        |              | Abordagem de solução |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
|---|------------------|------------|-------------|--------|--------------|----------------------|-----|-----|-----|------|-------------|-----------------|-----------------|-----------------|----|-------|--------|-------|-----------|--|---|---|---|--|
|   | Comercialização  | Transporte | Armazenagem | Refino | Distribuição | Determinística       |     |     |     |      | Estocástica |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
|   |                  |            |             |        |              | PL                   | PNL | DEA | MIP | MILP | MINLP       | SP <sup>1</sup> | SP <sup>2</sup> | SP <sup>3</sup> | PL | MINLP | Markov | Fuzzy | Simulação |  |   |   |   |  |
| 1 Sear, 1993                                      |                  |            |             |        | X            | X                    |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 2 Lee, Pinto <i>et al.</i> , 1996                 | X                | X          |             |        |              |                      |     |     |     | X    |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 3 Moro, Zanin <i>et al.</i> , 1998                |                  |            | X           |        |              |                      | X   |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 4 Escudero, Quintana <i>et al.</i> , 1999         | X                | X          | X           | X      |              |                      |     |     |     |      |             | X               |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 5 Dempster, Pedrón <i>et al.</i> , 2000           | X                | X          | X           | X      |              |                      |     |     |     |      |             | X               |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 6 Pinto e Moro, 2000                              |                  |            | X           |        |              | X                    |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 7 Pinto, Joly <i>et al.</i> , 2000                |                  |            | X           |        |              |                      |     | X   | X   | X    |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 8 Ross, 2000                                      |                  |            |             | X      |              |                      | X   |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 9 Hsieh e Chiang, 2001                            |                  |            | X           |        |              |                      |     |     |     |      |             |                 |                 | X               |    |       |        |       |           |  |   | X |   |  |
| 10 Iakovou, 2001                                  | X                |            |             |        | X            |                      |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 11 Joly, Moro <i>et al.</i> , 2002                |                  |            | X           |        |              | X                    |     | X   |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 12 Magatão, Arruda <i>et al.</i> , 2002           | X                | X          |             |        |              |                      |     |     | X   |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 13 Ponnambalam, Vannelli <i>et al.</i> , 2002     |                  |            | X           |        | X            |                      |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 14 Cheng e Duran, 2003                            | X                | X          |             |        |              |                      |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  | X |   | X |  |
| 15 Jia e Ierapetritou, 2003                       |                  |            | X           |        |              |                      |     |     | X   |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 16 Más e Pinto, 2003                              | X                | X          |             |        |              |                      |     |     | X   |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 17 Neiro e Pinto, 2003                            |                  |            | X           |        |              |                      |     |     |     | X    |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 18 Cheng e Duran, 2004                            | X                | X          |             |        |              |                      |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  | X |   | X |  |
| 19 Li, Hui <i>et al.</i> , 2004                   |                  |            | X           |        |              |                      |     |     |     |      |             | X               |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 20 Neiro e Pinto, 2004                            |                  |            | X           |        |              |                      |     |     |     | X    |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 21 Neiro e Pinto, 2005                            |                  |            | X           |        |              |                      |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       |        |       |           |  | X |   |   |  |
| 22 Neiro e Pinto, 2006                            |                  |            | X           |        |              |                      |     |     |     |      |             |                 |                 |                 |    |       | X      |       |           |  |   |   |   |  |
| 23 Pongsakdia, Rangsunvigita <i>et al.</i> , 2006 | X                |            | X           |        |              |                      |     |     |     |      |             | X               |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 24 Al-Othman, Lababidi <i>et al.</i> , 2008       | X                | X          | X           | X      | X            |                      |     |     |     |      |             | X               |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |
| 25 Khor, Elkamel <i>et al.</i> , 2008             |                  |            | X           |        |              |                      |     |     |     |      |             | X               |                 |                 |    |       |        |       |           |  |   |   |   |  |

PL                                    Programação linear  
 PNL                                  Programação não linear  
 PI                                     Programação inteira  
 MILP                                Programação linear inteira mista  
 MINLP                              Programação não linear inteira mista  
 SP<sup>1</sup>                                  Programação estocástica (modelo de recurso com 2 estágios)  
 SP<sup>2</sup>                                  Programação estocástica (com métodos de aproximação)  
 SP<sup>3</sup>                                  Programação estocástica (com métodos de decomposição)  
 Markov                              Processo de decisão de Markov  
 Fuzzy                                Teoria Fuzzy  
 Simulação                         Modelos de simulação

Pode-se observar na Tabela 2.1 e na Ilustração 2.1 que a maioria dos trabalhos relacionados à indústria do petróleo foca em alguns elos da cadeia individualmente, com predominância para trabalhos relacionados à área de refino.

| Nº de Trabalhos | Foco do Trabalho |            |             |        |              |
|-----------------|------------------|------------|-------------|--------|--------------|
|                 | Comercialização  | Transporte | Armazenagem | Refino | Distribuição |
| 13              |                  |            |             | 1      |              |
| 5               |                  | 1          | 1           |        |              |
| 2               |                  |            |             |        | 1            |
| 2               |                  | 1          | 1           | 1      | 1            |
| 1               |                  | 1          |             |        |              |
| 1               | 1                |            |             | 1      |              |
| 1               | 1                | 1          | 1           | 1      | 1            |
| 25              | 2                | 9          | 8           | 17     | 5            |

Ilustração 2.1 – Quantidade de trabalhos pesquisados sobre a cadeia de suprimento do petróleo e elos enfatizados

Também predomina a abordagem determinística para a solução dos problemas. Os métodos estocásticos de solução se concentram nos trabalhos mais recentes, conforme mostrado no Gráfico 2.1.

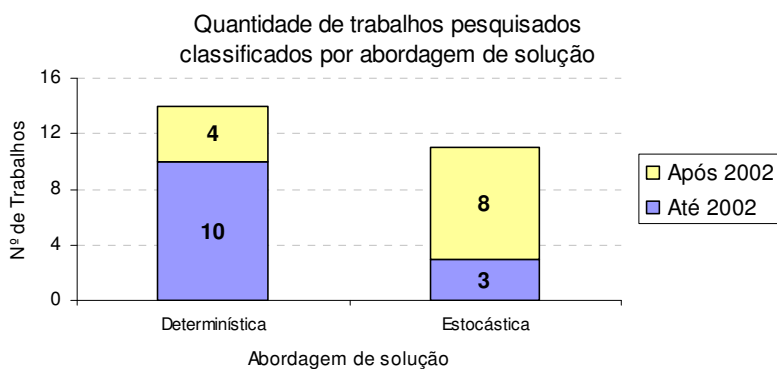


Gráfico 2.1 – Quantidade de trabalhos pesquisados sobre a cadeia de suprimento do petróleo e abordagem de solução

## 2.2. Incorporação de incertezas

É cada vez mais comum se encontrar na literatura trabalhos em que incertezas são consideradas, seja pela evolução tecnológica que permite se trabalhar com modelos mais complexos, seja pelas técnicas desenvolvidas que reduzem o esforço computacional.

Nesta seção serão apresentados, resumidamente, um levantamento sobre trabalhos existentes na literatura aplicados a outros setores, que não o de petróleo, em que incertezas foram incorporadas, e a teoria relacionada à programação estocástica, abordagem escolhida para este trabalho.

### **2.2.1. Abordagens utilizadas em outros setores e literatura relacionada**

São inúmeros os trabalhos existentes na literatura em que incertezas são consideradas. Uma pequena amostra destes trabalhos é resumida na Tabela 2.2, onde se destaca o setor de aplicação e a abordagem estocástica utilizada.

Dada a elevada complexidade que envolve os modelos estocásticos, que crescem rapidamente com o aumento do número de incertezas consideradas, não é surpresa o grande número de abordagens existentes na literatura que exploram a estrutura matricial do problema e, através de métodos de decomposição, reduzem seu tamanho e, conseqüentemente, diminuem o esforço computacional para sua resolução.

Também para lidar com a dificuldade inerente aos problemas estocásticos, alguns trabalhos sugerem a utilização de métodos heurísticos e técnicas de aproximações seqüenciais que sucessivamente refinam os limites inferior e superior para o valor ótimo da função objetivo, reduzindo-se a região viável das variáveis aleatórias a partições cada vez menores.

Outros trabalhos defendem a idéia de se compensar o ganho econômico e o risco associado e, assim, propõem a utilização de *chance constraints* para garantir que a decisão ótima a ser tomada não ultrapasse o limite desejável de exposição ao risco.

Existe ainda uma boa parte de trabalhos que não empregam nenhuma destas técnicas, valendo-se de modelos de recurso de dois ou multi estágios para a incorporação de incertezas. Destes, grande parte propõe que se trabalhe com um número finito de cenários, discretizando-se as possibilidades de realizações dos parâmetros incertos, transformando o problema estocástico em um extenso problema equivalente determinístico. É esta a metodologia que será adotada neste trabalho.

Para complementar a revisão da literatura mostrada na tabela abaixo, (Sahinidis, 2004; Mula, Poler *et al.*, 2006) apresentam vários outros trabalhos aplicados aos mais diversos setores e com diferentes propostas de abordagem.

**Tabela 2.2 – Resumo da literatura sobre trabalhos com incorporação de incertezas: setor de aplicação e abordagens de solução**

| Referência Bibliográfica                     | Setor    |         |            |         |         |                 |            | Abordagem de solução    |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|--|----------|---------|------------|---------|---------|-----------------|------------|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|  | Genérico | Químico | Financeiro | Energia | Militar | Telecomunicação | Transporte | Supply Chain Management | Estocástica     |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
|  |          |         |            |         |         |                 |            |                         | SP <sup>1</sup> | SP <sup>2</sup> | SP <sup>3</sup> | SP <sup>4</sup> | SP <sup>1</sup> | SP <sup>2</sup> | SP <sup>3</sup> | SP <sup>4</sup> |
| 1 Birge, 1985                                | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 | X               |                 |                 |
| 2 Dantzig e Infanger, 1993                   | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 | X               |                 |                 |
| 3 Escudero e Kamesam, 1995                   | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 | X               |                 |                 |
| 4 Ierapetritou e Pistikopoulos, 1996         | X        |         |            |         |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 5 Liu e Sahinidis, 1996                      | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 6 Clay e Grossman, 1997                      | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 7 Liu e Sahinidis, 1997                      |          | X       |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 8 Ahmed e Sahinidis, 1998                    |          | X       |            |         |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 9 Bok, Lee <i>et al.</i> , 1998              |          | X       |            |         |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 10 Consigli e Dempster, 1998                 |          |         | X          |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 | X               |                 |                 |
| 11 Cormican, Morton <i>et al.</i> , 1998     |          |         |            |         | X       |                 |            |                         | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 12 Tomasgard, Audestad <i>et al.</i> , 1998  |          |         |            |         |         | X               |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 13 Petrovic, Roy <i>et al.</i> , 1999        | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 14 Dupacová, Consigli <i>et al.</i> , 2000   | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |
| 15 Gupta e Maranas, 2000                     | X        |         |            |         |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 16 Petrovic, 2001                            | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 17 Tsiakis, Shah <i>et al.</i> , 2001        | X        |         |            |         |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 18 Berkelaar, Deert <i>et al.</i> , 2002     |          |         | X          |         |         |                 |            |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 19 Gröwe-Kuska, Kiwiel <i>et al.</i> , 2002  |          |         |            | X       |         |                 |            |                         |                 |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |
| 20 Landeghem e Vanmaele, 2002                |          | X       |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 21 Laporte, Louveaux <i>et al.</i> , 2002    |          |         |            |         |         |                 | X          |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 22 Gupta e Maranas, 2003                     | X        |         |            |         |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 23 Li, Wendt <i>et al.</i> , 2003            | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |
| 24 Riis, 2003                                |          |         |            |         |         | X               |            |                         |                 | X               |                 |                 |                 | X               |                 |                 |
| 25 Riis, Skriver <i>et al.</i> , 2003        |          |         |            |         |         | X               |            |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 26 Ziemba, 2003                              |          |         | X          |         |         |                 |            |                         |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |
| 27 Chen e Lee, 2004                          | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 28 Lababidi, Ahmed <i>et al.</i> , 2004      |          | X       |            |         |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 29 Riis e Andersen, 2004                     |          |         |            |         |         | X               |            | X                       |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |
| 30 Teng, Ong <i>et al.</i> , 2004            |          |         |            |         |         |                 | X          |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 31 Santoso, Ahmed <i>et al.</i> , 2005       |          |         |            |         |         |                 | X          |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 32 Triki, Beraldi <i>et al.</i> , 2005       |          |         |            | X       |         |                 |            |                         |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |
| 33 Dormer, Vazacopoulos <i>et al.</i> , 2006 |          |         |            |         |         |                 | X          | X                       |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |
| 34 Hvattum e Løkketangen, 2006               |          |         |            |         |         | X               |            |                         | X               |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |
| 35 Lu e Li, 2006                             | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 36 Morton e Saegar, 2006                     |          |         |            |         | X       |                 |            |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 37 Ntaimo e Sen, 2006                        |          |         |            |         |         |                 | X          |                         |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |                 |
| 38 Snyder e Shen, 2006                       |          |         |            |         |         |                 | X          |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 39 Huang, 2007                               |          |         | X          |         |         |                 |            |                         |                 |                 | X               |                 |                 |                 |                 |                 |
| 40 Peidro, Mula <i>et al.</i> , 2007         |          |         |            |         |         |                 | X          |                         |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 | X               |
| 41 Singh, Philpott <i>et al.</i> , 2007      | X        |         |            |         |         |                 |            |                         |                 |                 |                 |                 |                 | X               |                 |                 |
| 42 Beraldi, Conforti <i>et al.</i> , 2008    |          |         |            | X       |         |                 |            | X                       |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |                 |

SP<sup>1</sup>

SP<sup>2</sup>

SP<sup>3</sup>

SP<sup>4</sup>

Fuzzy

Simulação

Programação estocástica

Programação estocástica (com métodos de aproximação)

Programação estocástica (com métodos de decomposição)

Programação estocástica (Chance Constraints)

Teoria Fuzzy

Modelos de simulação

### 2.2.2. Programação Estocástica

A programação estocástica lida com problemas de otimização que possuem algum tipo de incerteza associada aos seus parâmetros, seja na função objetivo ou nas restrições (Riis, 2003; Li, Hui *et al.*, 2004). Os parâmetros incertos são descritos através de distribuições de probabilidade ou de cenários possíveis (Li, Hui *et al.*, 2004). O objetivo é encontrar a melhor solução considerando-se todas as possíveis realizações dos parâmetros incertos.

A base da programação estocástica é a programação matemática, diferentemente de outras abordagens de tomada de decisão sob incerteza como, por exemplo, processos de decisão de Markov, teoria de decisão estatística e teoria de controle estocástico (Riis, 2003).

A programação estocástica consiste, principalmente, de modelos de recurso (de dois ou multi estágios) e modelos com restrições probabilísticas (*chance constraints*) (Riis, 2003; Li, Hui *et al.*, 2004). Como neste trabalho serão utilizados apenas modelos de recurso, não será dada maior ênfase aos modelos com restrições probabilísticas. Para maiores detalhes, ver (Kall e Wallace, 1994; Birge e Louveaux, 1997; Shapiro e Nemirovski, 2005; Shapiro e Philpott, 2007; Bertolossi e Pagnoncelli, 2008; Liu, 2008; Shapiro e Ruszczyński, 2008).

#### 2.2.2.1. Modelos de recurso de dois estágios

Nos modelos de recurso de dois estágios as decisões são divididas em dois grupos. No grupo de primeiro estágio as decisões são tomadas sem o conhecimento da realização dos parâmetros incertos do modelo. Já no grupo de segundo estágio as decisões são tomadas após a revelação dos valores associados aos parâmetros incertos e servem para corrigir possíveis decisões tomadas anteriormente, quando ainda não se sabia o que iria acontecer. Considere, por exemplo, o seguinte problema:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & cx \\ \text{s.a.} \quad & Ax \geq b \\ & T(\xi)x \geq h(\xi), \\ & x \geq 0, \end{aligned}$$

onde  $c$  e  $b$  são vetores determinísticos e representam, respectivamente, os custos e o RHS de primeiro estágio;  $A$  é uma matriz determinística com os coeficientes das restrições de primeiro estágio;  $T$  e  $h$  são, respectivamente, uma matriz e um vetor cujos coeficientes dependem do evento aleatório  $\xi$ .  $T$  é chamada matriz de tecnologia e  $h$  corresponde ao RHS de segundo estágio. A variável de decisão  $x$  não depende do evento  $\xi$  e é chamada, então, de variável de primeiro estágio.

Assumindo primeiramente que o segundo conjunto de restrições (que dependem do evento aleatório) possa ser violado, obtém-se um solução ótima  $x^*$ . Entretanto, não se pode simplesmente violar um conjunto de restrições do problema. Assim, substituindo-se  $x^*$  no conjunto de restrições inicialmente violado, podem ocorrer inviabilidades dependendo da realização de  $\xi$ . Para se recuperar a viabilidade do problema, algumas ações corretivas ou de recurso  $y(\xi)$  são tomadas após se conhecer a realização do evento aleatório (Shapiro e Philpott, 2007). As variáveis  $y(\xi)$  são, então, chamadas de variáveis de segundo estágio. Considerando-se que o objetivo do problema é minimizar a soma dos custos conhecidos e custos de recursos esperados, podemos escrever o problema anterior da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & cx + E[q(\xi)y(\xi)] \\ \text{s.a.} \quad & Ax \geq b \\ & T(\xi)x + W(\xi)y(\xi) \geq h(\xi), \\ & x \geq 0, y(\xi) \geq 0, \end{aligned}$$

onde  $E$  corresponde ao operador de expectância relacionado ao evento aleatório  $\xi$ ,  $q$  é o vetor de custos de segundo estágio e depende de  $\xi$ ,  $W$  é chamada matriz de recurso e depende do evento aleatório  $\xi$ <sup>3</sup>. Pode-se resumir a sequência de eventos e decisões tomadas neste processo da seguinte forma:

$$\text{Decisão}(x) \rightarrow \text{observação}(\xi) \rightarrow \text{decisão}(y(\xi)).$$

Pode-se resumir ainda mais a formulação deste modelo da seguinte forma:

---

<sup>3</sup> Quando a matriz  $W$  é determinística, ou seja, não depende de  $\xi$ , dizemos que o modelo tem uma estrutura de recurso fixa.

$$\text{Min} \quad cx + Q(x)$$

$$\text{s.a.} \quad Ax \geq b$$

$$x \geq 0,$$

onde,  $Q(x) = \text{Min}\{ E[q(\xi)y(\xi)] \mid T(\xi)x + W(\xi)y(\xi) \geq h(\xi), y(\xi) \geq 0 \}$ .

A grande dificuldade em se resolver um problema estocástico de recurso consiste em calcular  $Q(x)$ , e as abordagens existentes na literatura e mostradas na Tabela 2-2 diferenciam-se, principalmente, pela forma como a expectância inserida em  $Q(x)$  é calculada. A partir do momento em que  $Q(x)$  passa a ser conhecido, o problema deixa de ser estocástico.

Nos modelos de programação estocástica os parâmetros incertos são representados através de variáveis aleatórias e, para descrevê-los corretamente, são utilizadas suas distribuições de probabilidades (Birge e Louveaux, 1997). Considerar distribuição contínua dos parâmetros aleatórios no cálculo de  $Q(x)$  pode resultar em cálculos de integrais de difícil solução prática (Riis, 2003). O que se faz, mais comumente, é assumir uma distribuição discreta com suporte finito para os parâmetros estocásticos. Com uma distribuição finita dos parâmetros estocásticos, a incerteza pode ser descrita através de um número finito de cenários (Riis, 2003), sendo que cada cenário  $s$  tem seus respectivos valores de parâmetros aleatórios  $q^s$ ,  $h^s$ ,  $T^s$  e  $W^s$ . Representando-se por  $p^s$  a probabilidade de ocorrer o cenário  $s$ , sendo  $s \in \{1, \dots, S\}$ , o problema estocástico anterior se transforma no problema determinístico extenso:

$$\text{Min} \quad cx + \sum_{s=1}^S p^s q^s y^s$$

$$\text{s.a.} \quad Ax \geq b$$

$$T^s x + W^s y^s \geq h^s, \quad s = 1, \dots, S$$

$$x \geq 0, y^s \geq 0, \quad s = 1, \dots, S,$$

onde  $S$  representa o número total de cenários.

### 2.2.2.2. Modelos de recurso multi estágios

Os modelos de recurso multi estágios são uma extensão dos modelos de dois estágios. Em um modelo de recurso multi estágio, as informações incertas  $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_T$  são

reveladas ao longo de T períodos e as decisões devem ser adaptadas à cronologia deste processo (Shapiro e Ruszczyński, 2008). Os estágios (momentos em que as decisões são tomadas) não, necessariamente, coincidem com os períodos de tempo do problema. Eles devem significar etapas do processo decisório (Escudero e Kamesam, 1995; Dupacová, Consigli *et al.*, 2000), que tem a seguinte sequência:

$$\text{Decisão}(x_1) \rightarrow \text{observação}(\xi_2) \rightarrow \text{decisão}(x_2) \rightarrow \dots \rightarrow \text{observação}(\xi_T) \rightarrow \text{decisão}(x_T).$$

Os valores do vetor de decisão  $x_t$  podem depender de informações disponíveis até o estágio  $t$ , nunca de resultados de observações futuras (estágios futuros). Isso diferencia problemas estocásticos multi estágio de problemas determinísticos multi períodos, em que se assume que toda informação esteja disponível desde o início do processo decisório (Shapiro e Ruszczyński, 2008). Além disso, em um dado estágio  $t$ , cenários que têm a mesma história  $\xi_{[t]}$  não podem ser diferenciados. Este princípio é chamado de *nonanticipativity constraints* e deve ser considerado no modelo (Shapiro e Ruszczyński, 2008). Estendendo a formulação de dois estágios ao caso multi estágios, temos:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & cx_1 + E[c_2(\xi_2)x_2(\xi_2) + \dots + E[c_T(\xi_T)x_T(\xi_T)] \dots] \\ \text{s.a.} \quad & Ax_1 \geq b \quad (1^\circ \text{ Estágio}) \\ & T_{t-1}(\xi_{t-1})x_{t-1}(\xi_{t-1}) + W_t(\xi_t)x_t(\xi_t) \geq h_t(\xi_t), t = 2, \dots, T; (2^\circ \text{ ao } T^\circ \text{ Estágio}) \\ & x \geq 0; y_t(\xi_t) \geq 0, \quad t = 2, \dots, T. \end{aligned}$$

Seguindo a mesma idéia, a extensão da formulação discreta ao caso multi estágios, incluindo as *nonanticipativity constraints*, pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \text{Min} \quad & \sum_{s=1}^S p^s \sum_{t=1}^T c_t^s x_t^s \\ \text{s.a.} \quad & Ax_1^s \geq b \quad s = 1, \dots, S \\ & T_{t-1}^s x_{t-1}^s + W_t^s x_t^s \geq h_t^s, \quad s = 1, \dots, S; t = 2, \dots, T. \\ & x_t^k = x_t^l \quad \forall k, l \mid \xi_{[t]}^k = \xi_{[t]}^l \quad k, l = 1, \dots, S, k \neq l; t = 1, \dots, T. \\ & x \geq 0, y \geq 0 \end{aligned}$$



Diferentemente das formulações apresentadas para o caso de dois estágios, em que se utilizou “c” e “q” para diferenciar os vetores de custos, respectivamente, de primeiro e segundo estágios e “x” e “y” para diferenciar os vetores de decisão também, respectivamente, de primeiro e segundo estágios, nas formulações multi estágios optou-se por utilizar apenas “c” para representar o vetor de custos e “x” para o vetor de variáveis de decisão, sendo os estágios indicados pelo índice “t”.

### 2.2.2.3. Geração de cenários

A variável aleatória  $\xi_t$  pode assumir diferentes valores com diferentes probabilidades. Discretizando-se  $\xi_t$  e com os valores assumidos pela variável aleatória, bem como suas respectivas probabilidades de ocorrência, pode-se representar os possíveis cenários através de uma árvore de cenários. A Ilustração 2.2, a seguir, mostra uma árvore de cenários.

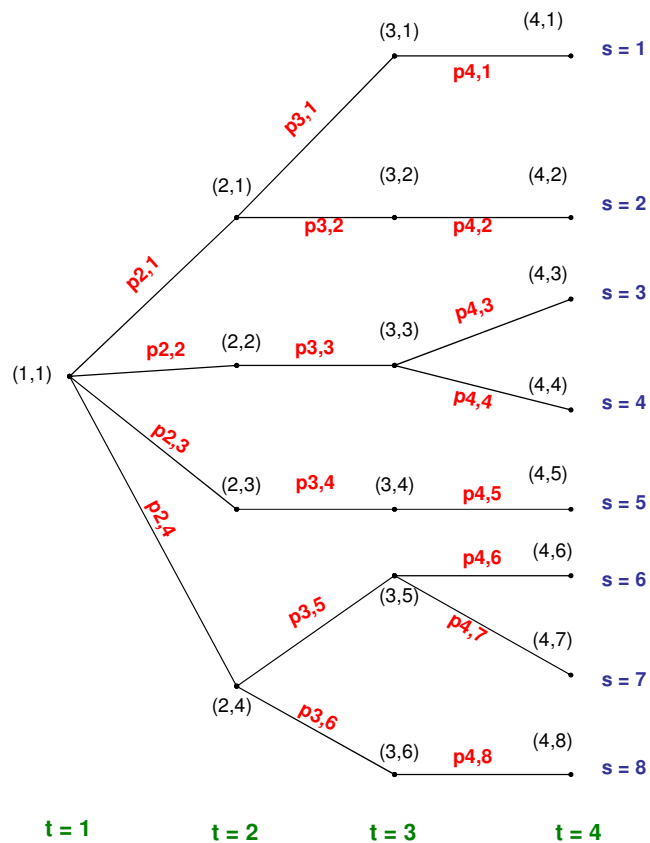


Ilustração 2.2– Árvore de cenários genérica

A árvore acima possui quatro estágios e representa oito possíveis cenários. Os cenários são representados através de seqüências de realizações das variáveis aleatórias,

em cada estágio, ou ainda, através de caminhos na árvore desde o primeiro nó (no primeiro estágio) até um nó existente no último estágio.

Em uma árvore de cenários, as seguintes regras devem ser obedecidas (Dupacová, Consigli *et al.*, 2000; Dash\_Optimization, 2006):

1) Partindo-se de um dado nó, o somatório das probabilidades condicionais de se visitar cada um dos nós filhos, no estágio seguinte deve ser igual a 1. Por exemplo, na árvore acima,  $p_{2,1} + p_{2,2} + p_{2,3} + p_{2,4} = 1$ ;  $p_{3,1} + p_{3,2} = 1$ .

2) A probabilidade incondicional  $P_{(t,n)}$  de se alcançar o nó  $n$  no estágio  $t$  deve ser igual ao produto das probabilidades condicionais que estão no caminho que levam ao nó  $(t,n)$ . Por exemplo, na árvore acima,  $P_{(3,1)} = p_{2,1} * p_{3,1}$ .

3) Em um dado estágio, o somatório das probabilidades incondicionais de se alcançar cada um dos nós deve ser igual a 1. Por exemplo, na árvore acima,  $P_{(3,1)} + P_{(3,2)} + P_{(3,3)} + P_{(3,4)} + P_{(3,5)} + P_{(3,6)} = 1$ .

4) A probabilidade  $P_s$  de acontecer o cenário  $s$  é igual ao produto das probabilidades condicionais ao longo do caminho que representa este cenário. Por exemplo,  $P_1 = p_{2,1} * p_{3,1} * p_{4,1}$ .

5) O somatório das probabilidades de todos os possíveis cenários deve ser igual a 1. Por exemplo,  $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 = 1$ .

Neste trabalho, as árvores de cenários necessárias serão geradas pelo programa XPRESS-SP, usando como *inputs* os valores e as probabilidades associadas aos parâmetros incertos. Para maiores detalhes sobre métodos de geração de cenários, avaliação da qualidade e adequação desses métodos ao modelo de programação estocástica, e abordagens para agregação de estágios e redução de árvores de cenários ver (Escudero, Kamesam *et al.*, 1993; Escudero e Kamesam, 1995; Dupacová, 1996; Dupacová, Consigli *et al.*, 2000; Høyland e Wallace, 2001; Dupacová, Gröwe-Kuska *et al.*, 2003; Kaut e Wallace, 2003; Kuhn, 2005).

#### **2.2.2.4. Medição da qualidade das soluções: EVPI e VSS**

O valor esperado da informação perfeita (EVPI) mede a quantidade máxima que o tomador de decisão estaria disposto a pagar pela informação perfeita sobre o futuro (Birge e Louveaux, 1997; Bortolossi e Pagnoncelli, 2008). Ele é calculado pela diferença entre o valor da solução ótima considerando-se conhecidos os valores dos

parâmetros incertos (solução espere-e-veja) e o valor ótimo calculado pelo modelo estocástico. Para o cálculo da solução espere-e-veja, calcula-se o valor ótimo para cada possível realização da variável aleatória, ou seja, otimiza-se cada cenário independentemente, e, posteriormente, as soluções obtidas para cada cenário são ponderadas pela probabilidade de ocorrência do cenário e agregadas em um único valor (Kall e Wallace, 1994; Dash\_Optimization, 2006). Um alto EVPI significa que a aleatoriedade tem forte influência no problema (Kall e Wallace, 1994). Um baixo EVPI indica que sofisticções nos métodos de previsão resultarão em ganhos pequenos (Infanger, 1992).

O valor da solução estocástica (VSS) dá a idéia do custo de se ignorar a incerteza (Gupta e Maranas, 2000), ou ainda, o possível ganho de se utilizar um modelo estocástico (Infanger, 1992; Birge e Louveaux, 1997; Bortolossi e Pagnoncelli, 2008). Para entender melhor o cálculo do VSS, consideremos três etapas. Primeiramente, substituindo-se todos os parâmetros aleatórios do problema estocástico original pelos seus respectivos valores esperados, o problema deixa de ser estocástico e passa a ser determinístico. Otimizando-se este problema determinístico, tem-se o que chamaremos de solução VE, ou seja, solução obtida considerando-se o valor esperado de todos os parâmetros aleatórios. Na segunda etapa, são atribuídos às variáveis de primeiro estágio do problema estocástico original os respectivos valores da solução VE obtida na primeira etapa. Tem-se, então, um problema estocástico modificado, onde os valores das variáveis de primeiro estágio estão fixos. Resolvendo-se este problema estocástico modificado tem-se o resultado esperado utilizando-se a solução VE para as variáveis de primeiro estágio. Chamaremos o resultado deste problema estocástico modificado de solução E\_VE. Na terceira e última etapa resolve-se o problema estocástico de recurso original normalmente, sem fixar nenhum valor, obtendo-se a solução ER (solução esperada do problema de recurso original). A diferença entre a solução ER e a solução E\_VE é chamada de valor da solução estocástica (VSS) (Gupta e Maranas, 2000; Dash\_Optimization, 2006).

#### **2.2.2.5. Ferramenta utilizada: XPRESS-MP**

Ferramentas de programação matemática tradicionais disponíveis no mercado muitas vezes não são adequadas para se modelar e solucionar problemas relacionados a otimização em cadeias de suprimentos (que levam em conta incertezas), seja pela falta

de algumas funcionalidades, seja pela complexidade de modelagem, que as torna impraticáveis para os problemas reais das empresas (Dormer, Vazacopoulos *et al.*, 2006).

A facilidade de modelagem e análise visual dos resultados, a capacidade de solução de problemas grandes e a existência de um módulo para se trabalhar com problemas estocásticos foram preponderantes na decisão de se utilizar o *software* XPRESS-MP para a modelagem e solução dos problemas neste trabalho.

XPRESS-MP é um conjunto de ferramentas para a modelagem matemática e otimização de problemas lineares, inteiros, quadráticos, não lineares, e estocásticos. Neste trabalho, as ferramentas utilizadas foram: XPRESS-Optimizer versão 19.00.00, XPRESS-Mosel versão 2.4.0 e XPRESS-IVE versão 1.19.01.

O XPRESS-Optimizer utiliza implementações dos métodos *primal* e *dual* simplex para a solução de problemas lineares. O algoritmo barreira é uma alternativa aos algoritmos simplex e utiliza métodos de pontos interiores para a solução de problemas de programação linear e quadrática. Para a solução de problemas lineares inteiros mistos (MILP) e problemas quadráticos inteiros mistos (MIQP), o XPRESS-Optimizer dispõe de um algoritmo *branch and bound*.

O XPRESS-Mosel permite a formulação do problema, sua solução com o *solver* adequado, e a análise dos resultados. A linguagem Mosel permite escrever o problema de forma bastante similar à sua forma algébrica, utilizando-se conjuntos e faixas de variação para os índices. O Mosel possui diferentes módulos (ou bibliotecas) que dão acesso a diferentes *solvers*. Um dos módulos permite se utilizar o XPRESS-Optimizer. Outro módulo dá acesso aos programas XPRESS-SLP (para formulação e solução de problemas não lineares via programação linear sequencial), XPRESS-SP (para formulação e solução de problemas estocásticos) e XPRESS-Kalis. Um terceiro módulo permite, ainda, a interface com bancos de dados e planilhas eletrônicas (Dash\_Optimization, 2008).

Neste trabalho, para a solução do problema determinístico foi utilizado o módulo “*mmxprs*” (que dá acesso ao XPRESS-Optimizer) e para se resolver os problemas estocásticos foi usado o módulo “*mmsp*”, para acesso ao XPRESS-SP.

O programa XPRESS-SP pode ser usado para a modelagem, solução e análise de problemas estocásticos de recurso de dois ou multi estágios. O programa trabalha com

distribuições de probabilidades discretas associadas aos parâmetros incertos e o usuário pode criar a árvore de cenários de forma extensa (especificando-se a distribuição discreta independente ou conjunta das variáveis aleatórias), simétrica (especificando-se a estrutura da árvore e a distribuição discreta) ou explícita (especificando-se a estrutura da árvore e os valores das variáveis aleatórias na árvore de cenários). A redundância na modelagem de problemas estocásticos é minimizada com a utilização do XPRESS-SP. Por exemplo, não há a necessidade do usuário escrever as restrições não antecipativas (*nonanticipativity constraints*) nem de escrever o problema na forma extensa por cenários (Dash\_Optimization, 2006).

As funcionalidades de programação estocástica do XPRESS-SP ficam disponíveis no módulo “*mmsp*”, que deve ser incluído nos modelos pelos usuários. O escopo deste módulo inclui diferentes tipos de entidades (variáveis de decisão, variáveis aleatórias, restrições estocásticas, etc), funções para a modelagem, solução e análise, e parâmetros de controle (Dash\_Optimization, 2006).

Também é possível, utilizando-se o XPRESS-SP, calcular o VSS e o EVPI. Isto é feito facilmente através de um comando na chamada para a otimização do problema.

Aliado às ferramentas que compõem o conjunto XPRESS-MP está o XPRESS-IVE, um ambiente visual integrado (*Integrated Visual Environment*) que facilita a modelagem (possui um programa editor, compilador e de execução, permite a visualização da árvore de cenários no caso estocástico, etc.) e a visualização dos resultados (valor das variáveis de decisão, análise estatística dos resultados no caso estocástico, etc.).

### 3. Sistema Considerado

Nesta seção será, primeiramente, feita uma breve descrição do Sistema Petrobras e, em seguida será enfatizado o sistema mais simplificado que foi considerado para este trabalho.

#### 3.1. Resumo do Sistema Petrobras

Dentre as principais áreas de atuação da Petrobras destacam-se as de Exploração e Produção (E&P), de Gás e Energia e de Abastecimento.

A área de E&P é responsável pela pesquisa, localização, identificação, desenvolvimento, produção e incorporação de reservas de óleo e gás natural. O transporte e comercialização do gás natural produzido fica a cargo da área de Gás e Energia, que também é responsável pela importação do produto para garantir o pleno atendimento do mercado.

Na área de Abastecimento concentram-se as atividades de *downstream*, ou seja, de refino de petróleo e de transporte, armazenagem e comercialização de petróleos e derivados. O petróleo produzido no país ou importado é transferido através de navios ou oleodutos até terminais marítimos. Dos terminais, o petróleo pode ser exportado ou seguir por oleodutos para as refinarias, onde é processado para a obtenção dos derivados<sup>4</sup>. Depois de produzidos, os derivados são transportados por modais rodoviários, ferroviários ou através de polidutos para as bases primárias (tanques das distribuidoras). A Petrobras, então, vende os produtos para as distribuidoras<sup>5</sup>, que passam a ser responsável pelo controle de qualidade e suprimento do mercado consumidor.

Segundo (Petrobras, 2007), o Sistema Petrobras conta hoje com 109 plataformas de produção de petróleo e gás natural (produção média diária em torno de 2,3 milhões de barris de óleo equivalente), com uma malha de dutos de 23.142 quilômetros, com uma frota de 55 navios (46 próprios e 9 fretados), com 46 terminais (20 terrestres e 26

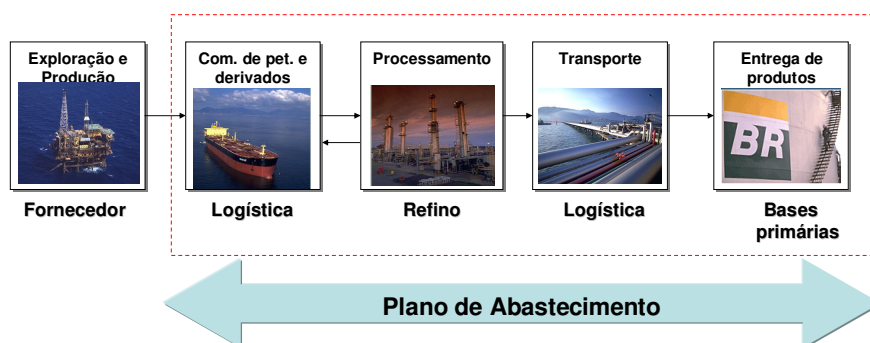
---

<sup>4</sup> Todas as atividades de transporte e armazenagem são realizadas pela Transpetro (Petrobras Transportes S.A.), empresa subsidiária da Petrobras.

<sup>5</sup> A Petrobras atua no setor de distribuição através de sua subsidiária, a Petrobras Distribuidora.

aquaviários) com capacidade total de armazenagem de 10,3 milhões de m<sup>3</sup>, e com 15 refinarias (sendo 11 em território nacional).

Neste trabalho serão enfatizadas as atividades desempenhadas na área de Abastecimento da Petrobras. Mensalmente, a gerência de Planejamento da Logística, pertencente à área de Abastecimento da Petrobras, elabora um Plano de Abastecimento com indicações quanto à operação das atividades do *downstream* para um horizonte de doze meses à frente. A cada mês, portanto, diversas informações necessárias à elaboração deste plano são fornecidas pelas áreas responsáveis dentro da empresa. Esse conjunto de informações é, então, alimentado em um modelo de programação linear determinístico (conhecido como PlanAb) que, após otimizado, resultará no Plano de Abastecimento. Não fazem parte do escopo do Plano de Abastecimento da Petrobras as atividades anteriores à obtenção do petróleo (por exemplo, as atividades de exploração e produção de petróleo) nem posteriores à entrega dos derivados finais às bases primárias (por exemplo, as atividades de distribuição dos produtos ao mercado consumidor). A Ilustração 3.1 abaixo mostra o escopo do Plano de Abastecimento da Petrobras.

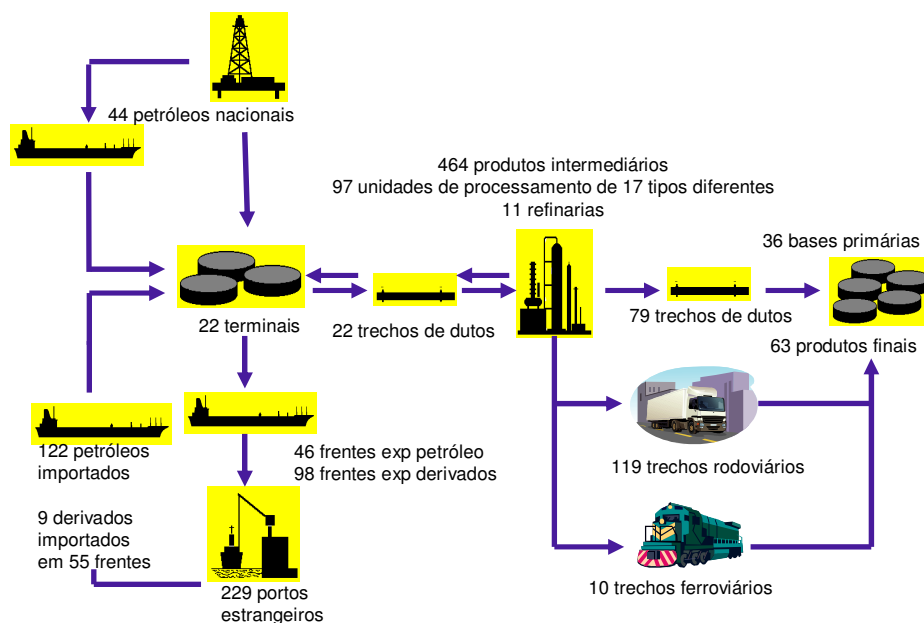


**Ilustração 3.1– Escopo do Plano de Abastecimento da Petrobras**

O objetivo deste plano é a obtenção de diretrizes operacionais que levem à maximização do lucro da companhia no total dos doze meses. Alguns exemplos dessas diretrizes são as indicações de importação e exportação de petróleos e derivados levando-se em conta as diferentes qualidades dos produtos, indicações de em que refinaria processar cada tipo de petróleo, indicações do nível de utilização de cada tipo de unidade de processo, entre outras.

Apesar de haver simplificações na representação das entidades (muitas vezes consolidando alguns ativos em uma única entidade), a infra-estrutura de Abastecimento conforme está representada no PlanAb é bastante complexa. Para a representação deste

sistema, são considerados no PlanAb 22 terminais nacionais (sendo 7 terrestres e 15 aquaviários) e 229 terminais no exterior, 36 bases primárias, 11 refinarias com 97 unidades de processo de 17 tipos diferentes, 22 trechos de dutos de petróleo ligando terminais às refinarias, 79 trechos de dutos de derivados, 119 trechos rodoviários e 10 trechos ferroviários ligando refinarias e terminais, 44 tipos de petróleos nacionais que totalizam toda a produção de petróleo do E&P, 122 tipos de petróleos estrangeiros, 63 produtos finais e 464 produtos intermediários, 46 frentes de exportação de petróleo, 28 tipos de derivados ofertados ao mercado externo em 98 frentes de exportação e 9 tipos de derivados demandados do mercado externo em 55 frentes de importação. A Ilustração 3.2, a seguir, apresenta este sistema.



**Ilustração 3.2– Entidades representadas no Plano de Abastecimento da Petrobras**

A elevada complexidade da representação deste sistema no PlanAb pode ser percebida através das milhares de variáveis e restrições<sup>6</sup> modeladas e no tempo superior a 90 minutos para a otimização. É importante enfatizar a complexidade desta modelagem mesmo em se tratando de um modelo de programação linear com todos os parâmetros determinísticos. A utilização de programação inteira ou mista, ou a consideração de parâmetros estocásticos neste modelo multiplicaria seu porte por

<sup>6</sup> No PlanAb existem cerca de 15.000 restrições e 45.000 variáveis por período.



algumas vezes, aumentando muito mais sua complexidade e, assim, inviabilizando sua utilização.

Como se tem o interesse, neste trabalho, de se incorporar incertezas ao Plano de Abastecimento, o que significa passar a considerar parâmetros estocásticos no modelo, optou-se por uma modelagem mais simplificada. Na seção seguinte, então, será apresentado o modelo que foi considerado neste trabalho.

### **3.2.Sistema simplificado**

A principal utilidade de um Plano de Abastecimento no processo de planejamento é a indicação de macro diretrizes como, por exemplo, as comerciais (indicações de importações e exportações de petróleo e derivados) e de processos (indicação de utilização das unidades de processo). Posteriormente, este plano é desdobrado em micro diretrizes por áreas dentro da empresa especializadas em atividades específicas.

Como o Plano de Abastecimento, neste trabalho, está sendo considerado para efeito de planejamento, torna-se possível a simplificação da modelagem do sistema sem grandes danos às macro indicações. As seções seguintes detalham o sistema simplificado que foi adotado.

#### **3.2.1. Visão macro**

Para a simplificação do sistema, as centenas de locais considerados no PlanAb foram consolidados em apenas nove, representados por: BR, Merc, Plat, Term\_nac, T5, T6, T7, T8 e T9.

O local “BR” corresponde à totalização das 11 refinarias da Petrobras em território nacional. A capacidade operacional de refino foi totalizada por tipo de unidade de processo (destilação, FCC, desasfaltação, coque, HDS e HDT), e todo o parque de refino do sistema foi considerado como uma única refinaria com seis unidades de processo no local “BR”.

A mesma idéia de consolidação também foi feita para o mercado interno de derivados. As dezenas de bases primárias a atender mensalmente consideradas no PlanAb passaram a ser representadas por uma única no local chamado de “Merc”.

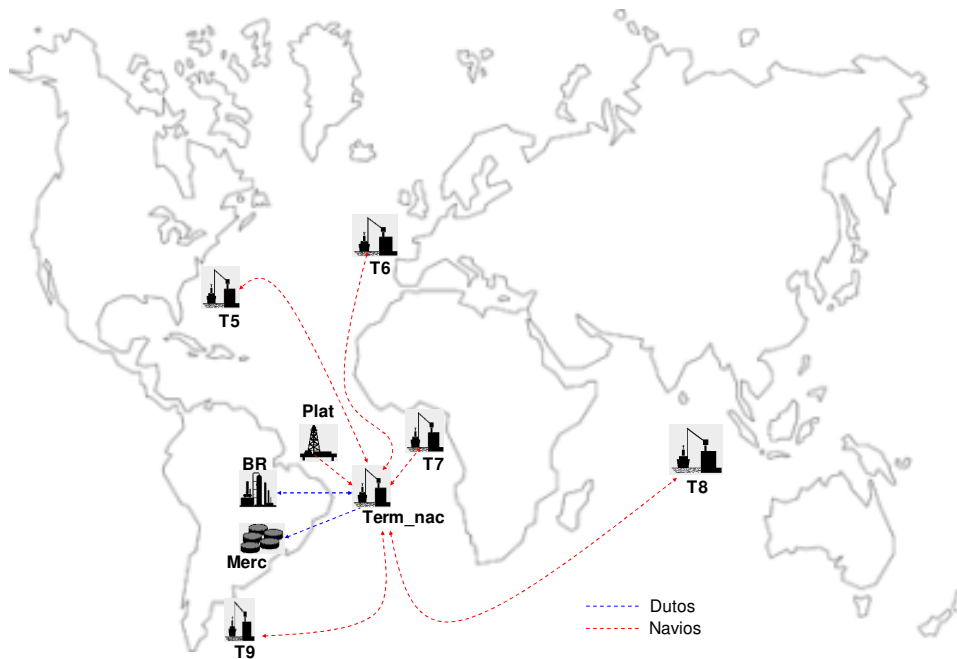
Todos os campos de produção de petróleo foram agrupados em um único local, como se todos os poços produtores estivessem ligados a uma única plataforma, de onde sairiam os petróleos para serem refinados. Esta plataforma única foi chamada de “Plat”.

Também um único terminal no território nacional, chamado de Term\_nac, foi considerado. Este terminal representa o elo de ligação entre o local de produção de petróleo (Plat) e a refinaria (BR), entre a refinaria (BR) e o mercado (Merc) e entre os terminais no exterior e a refinaria (BR) e o mercado (BR). Todos os fluxos de produtos passam pelo Term\_nac.

Foram considerados cinco terminais no exterior - T5, T6, T7, T8 e T9 – representando, respectivamente, a América do Norte, a Europa, a África, o Oriente Médio, Ásia e Oceania, e a América do Sul.

Ligando a refinaria (BR) ao terminal nacional (Term\_nac) foram considerados três trechos de dutos, com capacidades diferentes para a movimentação de derivados claros, de derivados escuros e petróleo. Entre o Term\_nac e o mercado (Merc) não foram consideradas restrições às movimentações, entendendo-se que os dutos que levam produtos para as bases primárias das distribuidoras são suficiente para a movimentação do volume necessário para o atendimento do mercado, não significando, portanto, uma restrição. Também não foram consideradas restrições às movimentações entre a plataforma de produção de petróleo (Plat) e o Term\_nac e entre este e os terminais no exterior, considerando-se que os navios necessários para estas movimentações podem ser prontamente contratados no mercado.

A Ilustração 3.3 abaixo mostra de forma macro este sistema simplificado.



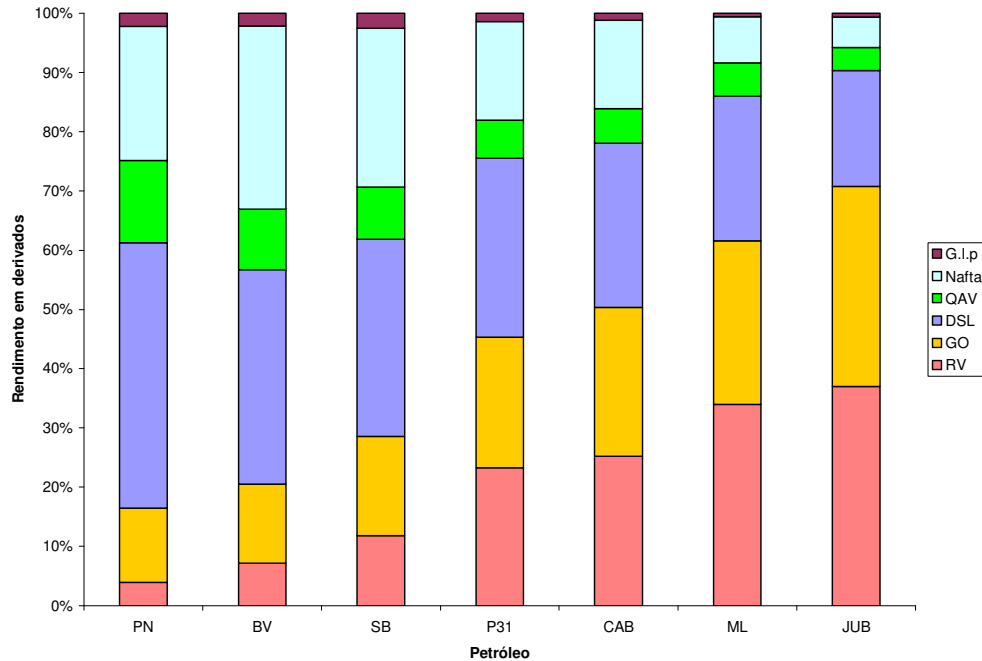
**Ilustração 3.3– Visão macro do sistema considerado**

### **3.2.2. Informações sobre produtos e qualidade**

Nesta seção serão detalhados os diferentes produtos (petróleos e derivados) considerados e os processos de refino empregados para a transformação do petróleo em derivados.

Ao invés dos quase 700 produtos (entre petróleos e derivados intermediários e finais) considerados no PlanAb, foram considerados neste trabalho 44 produtos, sendo sete petróleos e 37 derivados.

Os quase 200 petróleos existentes no PlanAb foram atribuídos a sete grupos levando-se em consideração semelhanças de qualidade existentes entre os petróleos. Os sete representantes bem como o grupo que eles representam são: PN (óleo leve com significativo rendimento em derivados médios: diesel + QAV), BV (óleo leve com significativo rendimento em derivados leves: nafta + GLP), SB (óleo leve com significativo rendimento de derivados pesados: GO + RV), P31 (óleo médio com resíduo craqueável), CAB (óleo médio com resíduo não craqueável), ML (óleo pesado) e JUB (óleo ultra pesado). O Gráfico 3.1 abaixo ilustra os rendimentos dos tipos de derivados obtidos a partir do processamento de cada um dos sete petróleos.



**Gráfico 3.1 – Rendimentos de derivados para os petróleos considerados**

Os mais de 500 derivados modelados no PlanAb foram resumidos a apenas 37, sendo doze produtos finais e 25 intermediários. Os doze produtos finais, ou seja, que podem ser vendidos diretamente ao mercado interno ou externo são: asfalto, bunker, coque, DSL2000, DSL500, g.l.p, gas.exp., gasolina, nafta, OC1%, OC3% e QAV. Como se pode perceber, alguns produtos como diesel (DSL2000 e DSL500), gasolina (gas.exp. e gasolina) e óleo combustível (OC1% e OC3%) possuem mais de um tipo. A razão disso está associada à diferença de qualidade entre eles.

Por esse mesmo motivo, também existem alguns tipos de diesel intermediário (D(0,10), D(0,15), D(0,30), D(0,40) e D(0,75)) e de querosene intermediário (Q(0,015), Q(0,11) e Q(0,35)) que se diferenciam pelo teor de enxofre (valor entre parêntesis). Já os diferentes tipos de resíduos (RV(0,30/12,0), RV(0,30/5,5), RV(0,80/3,0), RV(0,80/6,5), RV(1,00/-3,0), RV(1,00/3,5) se diferenciam pelo par ordenado “teor de enxofre”, “viscosidade”. A viscosidade, sendo uma grandeza não linear, foi representada por um índice linear e quanto menor o índice, mais elevada a viscosidade do produto.

As diferenças de qualidade entre derivados são representadas no modelo para se permitir diferenciar os vários tipos de petróleos bem como se definir a rota a ser seguida para o enquadramento da qualidade do produto final, seja via unidades de processo, seja via mistura. A Tabela 3.1 abaixo associa os petróleos aos derivados do tipo diesel, querosene e resíduo produzidos na destilação, explicitando-se as diferenças de

qualidade. Para os outros derivados advindos da destilação (g.l.p, nafta e gasóleo) não foram consideradas diferenças de qualidade entre os diferentes petróleos.

**Tabela 3.1 – Associação entre petróleo e derivados que possuem diferenças de qualidade**

| Tipo derivado | Petróleo  | Derivado      |
|---------------|-----------|---------------|
| Diesel        | BV        | D(0,10)       |
|               | CAB       | D(0,30)       |
|               | JUB       | D(0,40)       |
|               | ML        | D(0,75)       |
|               | P31       | D(0,30)       |
|               | PN        | D(0,10)       |
|               | SB        | D(0,15)       |
|               | Querosene | BV            |
| CAB           |           | Q(0,11)       |
| JUB           |           | Q(0,11)       |
| ML            |           | Q(0,35)       |
| P31           |           | Q(0,11)       |
| PN            |           | Q(0,015)      |
| SB            |           | Q(0,015)      |
| RV            |           | BV            |
|               | CAB       | RV(0,80/3,0)  |
|               | JUB       | RV(1,00/3,5)  |
|               | ML        | RV(1,00/-3,0) |
|               | P31       | RV(0,80/6,5)  |
|               | PN        | RV(0,30/5,5)  |
|               | SB        | RV(0,30/12,0) |

Além dos derivados intermediários do tipo diesel, querosene e resíduo, também foram considerados como produtos intermediários o gasóleo (GO), o gasóleo leve de coque (GOLK), o gasóleo pesado de coque (GOPK), a nafta de coque (NAFK), a nafta craqueada (NCr.), o óleo leve de reciclo (LCO), o óleo decantado (ODEC), o óleo desasfaltado (Odes), o resíduo asfáltico (Rasf), o resíduo de vácuo (RV)<sup>7</sup>, e o resíduo de vácuo craqueável (RVC). O papel de cada um desses produtos ficará mais claro adiante, quando forem apresentadas as alternativas de processamento e/ou misturas para cada um deles.

Para o atendimento da especificação dos produtos finais alguns parâmetros de qualidade estão sendo considerados. Para os produtos QAV, DSL500, DSL2000, bunker, OC1% e OC3% são considerados o teor de enxofre máximo e a viscosidade mínima e máxima. Para a gasolina e gas.exp. são considerados, de forma indireta, a octanagem e a formação de goma potencial através dos limites mínimo e máximo de

---

<sup>7</sup> Este se diferencia dos anteriores mostrados na tabela por ser carga de unidade de processo, enquanto os outros são utilizados para misturas.

incorporação de nafta ao pool dos produtos. Para os outros produtos finais (asfalto, coque, g.l.p e nafta) está sendo considerado que sua especificação de qualidade é atendida com facilidade, não representando, assim, restrições ao processo produtivo. A Tabela 3.2 abaixo apresenta os limites dos parâmetros de qualidade que devem ser respeitados para o enquadramento de cada produto final.

**Tabela 3.2 – Limites de especificação para os parâmetros de qualidade considerados**

| <b>Produto Final</b> | <b>Teor de enxofre máximo (%)</b> | <b>Viscosidade mínima</b> | <b>Viscosidade máxima</b> | <b>Teor de nafta mínimo (%)</b> | <b>Teor de nafta máximo (%)</b> |
|----------------------|-----------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| QAV                  | 0,10                              | 61,00                     | 62,00                     |                                 |                                 |
| DSL500               | 0,05                              | 53,00                     | 54,00                     |                                 |                                 |
| DSL2000              | 0,20                              | 53,00                     | 54,00                     |                                 |                                 |
| Bunker               | 4,50                              | 21,50                     | 30,00                     |                                 |                                 |
| OC1%                 | 1,00                              | 18,50                     | 19,00                     |                                 |                                 |
| OC3%                 | 3,00                              | 11,00                     | 16,00                     |                                 |                                 |
| Gasolina             |                                   |                           |                           | 5                               | 32                              |
| Gas.Exp.             |                                   |                           |                           | 0                               | 0                               |

Para o atendimento da especificação mostrada acima, algumas misturas entre os produtos (que serão detalhadas adiante) são permitidas e, desta forma, é necessário conhecer os parâmetros de qualidade de cada produto. A Tabela 3.3, a seguir, mostra isso. Apesar de a densidade não estar sendo considerada como limitante para a especificação dos produtos, ela é mostrada na tabela abaixo por ser necessária para o cálculo do balanço de enxofre, que é feito em base mássica, enquanto todos os outros são em base volumétrica.

**Tabela 3.3 – Parâmetros de qualidade dos produtos utilizados em misturas**

| <b>Produto</b> | <b>Teor de enxofre (%)</b> | <b>Densidade (Ton/m3)</b> | <b>Índice de viscosidade</b> |
|----------------|----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| Bunker         | 4,500                      | 1,00                      | 21,50                        |
| D(0,10)        | 0,100                      | 0,84                      | 53,00                        |
| D(0,15)        | 0,150                      | 0,84                      | 53,00                        |
| D(0,30)        | 0,300                      | 0,84                      | 53,00                        |
| D(0,40)        | 0,400                      | 0,84                      | 53,00                        |
| D(0,75)        | 0,750                      | 0,84                      | 53,00                        |
| DSL2000        | 0,200                      | 0,84                      | 53,00                        |
| DSL500         | 0,050                      | 0,84                      | 53,00                        |
| GO             | 0,400                      | 0,92                      | 30,00                        |
| GOLK           | 0,500                      | 0,87                      | 50,00                        |
| GOPK           | 0,500                      | 0,99                      | 28,00                        |
| LCO            | 0,800                      | 0,96                      | 48,00                        |
| Nafta          | 0,050                      | 0,69                      | 73,00                        |
| OC1%           | 1,000                      | 1,00                      | 18,50                        |
| OC3%           | 3,000                      | 1,00                      | 11,00                        |
| ODEC           | 1,000                      | 1,10                      | 20,00                        |
| Odes           | 1,000                      | 0,96                      | 23,00                        |
| Q(0,015)       | 0,015                      | 0,78                      | 62,00                        |
| Q(0,11)        | 0,110                      | 0,78                      | 62,00                        |
| Q(0,35)        | 0,350                      | 0,78                      | 62,00                        |
| QAV            | 0,100                      | 0,78                      | 62,00                        |
| Rasf           | 1,800                      | 1,10                      | -8,00                        |
| RV(0,30/12,0)  | 0,300                      | 1,00                      | 12,00                        |
| RV(0,30/5,5)   | 0,300                      | 1,00                      | 5,50                         |
| RV(0,80/3,0)   | 0,800                      | 1,00                      | 3,00                         |
| RV(0,80/6,5)   | 0,800                      | 1,00                      | 6,50                         |
| RV(1,00/-3,0)  | 1,000                      | 1,00                      | -3,00                        |
| RV(1,00/3,5)   | 1,000                      | 1,00                      | 3,50                         |

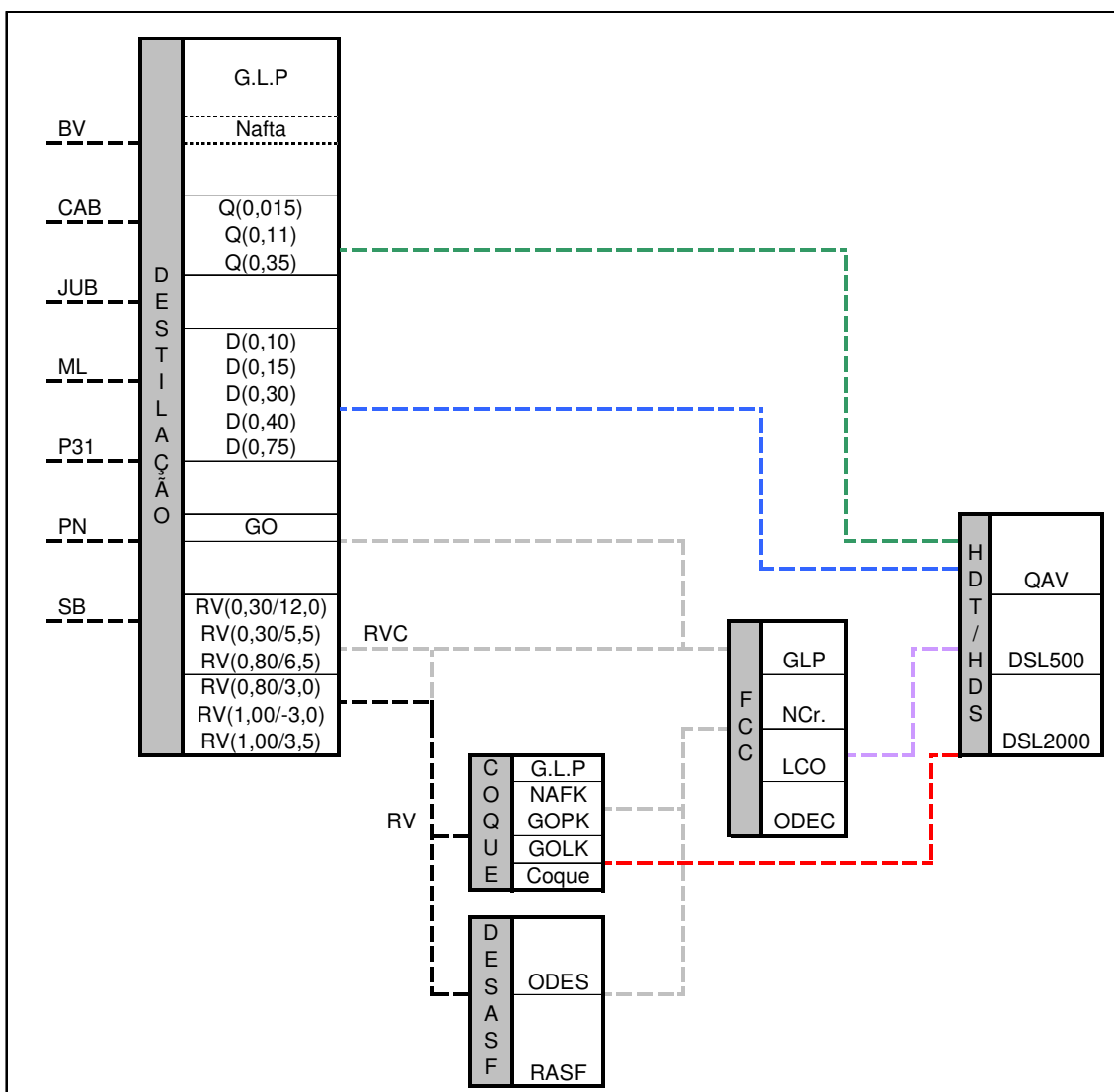
Vale destacar que os produtos asfalto, coque, g.l.p, gas.exp., gasolina, NAFK, RV e RVC não aparecem na tabela acima por não se misturar a nenhum outro. Já a nafta craqueada (NCr.), apesar de poder se misturar, não aparece acima uma vez que ela só é utilizada para a produção de gasolina ou gas.exp., ambos produtos em que o teor de enxofre e a viscosidade não estão sendo considerados como parâmetros de qualidade limitantes.

Estas restrições de qualidade estão representadas matematicamente, no capítulo seguinte, através dos conjuntos de inequações VI a X ou pelas inequações XX e XXI (limites de adição de nafta ao *pool* de gasolina), XXIV e XXV (teor de enxofre máximo), XXVI e XXVII (limites de viscosidade) em anexo.

### **3.2.3. Informações sobre processos e misturas**

A primeira etapa do processo produtivo é o refino do petróleo, feito através da separação, através de destilação, das diversas frações que compõem a mistura. Algumas

destas frações podem ser vendidas diretamente ao mercado, outras são utilizadas como carga em outras unidades de processo, ou ainda, são misturadas para o enquadramento da especificação de qualidade dos produtos finais. Neste trabalho estão sendo consideradas seis unidades de processo: destilação, FCC, desasfaltação, coque, HDS e HDT. Para ilustrar as possibilidades de aproveitamento de cada produto em cada unidade de processo é apresentado, na Ilustração 3.4, o esquema a seguir.



**Ilustração 3.4– Esquema de refino**

Os rendimentos considerados de derivados produzidos em cada unidade de processo para cada tipo de carga processada são mostrados nas tabelas 3.4 a 3.8 a seguir. A produção de derivados via processamento em unidades é representada no modelo matemático através da equação XIX no próximo capítulo ou pelas equações XLIV, XLV, XLVI, XLVII, XLVIII e XLIX em anexo.



**Tabela 3.4 – Rendimentos de derivados na destilação para cada tipo de petróleo**

| <b>Petróleo</b> | <b>Derivado</b> | <b>Rendimento</b> |
|-----------------|-----------------|-------------------|
| BV              | D(0,10)         | 36%               |
|                 | G.l.p           | 2%                |
|                 | GO              | 13%               |
|                 | Nafta           | 31%               |
|                 | Q(0,015)        | 10%               |
|                 | RV(0,30/5,5)    | 7%                |
| BV Total        |                 | 100%              |
| CAB             | D(0,30)         | 28%               |
|                 | G.l.p           | 1%                |
|                 | GO              | 25%               |
|                 | Nafta           | 15%               |
|                 | Q(0,11)         | 6%                |
|                 | RV(0,80/3,0)    | 25%               |
| CAB Total       |                 | 100%              |
| JUB             | D(0,40)         | 20%               |
|                 | G.l.p           | 1%                |
|                 | GO              | 34%               |
|                 | Nafta           | 5%                |
|                 | Q(0,11)         | 4%                |
|                 | RV(1,00/3,5)    | 37%               |
| JUB Total       |                 | 100%              |
| ML              | D(0,75)         | 24%               |
|                 | G.l.p           | 1%                |
|                 | GO              | 28%               |
|                 | Nafta           | 8%                |
|                 | Q(0,35)         | 6%                |
|                 | RV(1,00/-3,0)   | 34%               |
| ML Total        |                 | 100%              |
| P31             | D(0,30)         | 30%               |
|                 | G.l.p           | 1%                |
|                 | GO              | 22%               |
|                 | Nafta           | 17%               |
|                 | Q(0,11)         | 6%                |
|                 | RV(0,80/6,5)    | 23%               |
| P31 Total       |                 | 100%              |
| PN              | D(0,10)         | 45%               |
|                 | G.l.p           | 2%                |
|                 | GO              | 13%               |
|                 | Nafta           | 23%               |
|                 | Q(0,015)        | 14%               |
|                 | RV(0,30/5,5)    | 4%                |
| PN Total        |                 | 100%              |
| SB              | D(0,15)         | 33%               |
|                 | G.l.p           | 3%                |
|                 | GO              | 17%               |
|                 | Nafta           | 27%               |
|                 | Q(0,015)        | 9%                |
|                 | RV(0,30/12,0)   | 12%               |
| SB Total        |                 | 100%              |

**Tabela 3.5 – Rendimentos de produtos no FCC para cada tipo de carga**

| Carga | Produto |     |      |      | Total |
|-------|---------|-----|------|------|-------|
|       | G.I.p   | LCO | NCr. | ODEC |       |
| GO    | 25%     | 15% | 54%  | 10%  | 104%  |
| GOPK  | 23%     | 18% | 48%  | 15%  | 104%  |
| NAFK  | 32%     | 7%  | 68%  | 0%   | 107%  |
| Odes  | 21%     | 18% | 46%  | 12%  | 97%   |
| RVC   | 20%     | 19% | 47%  | 13%  | 99%   |

Vale destacar que no processo de conversão que ocorre no FCC e coque o rendimento não soma 100% devido a expansões e contrações volumétricas.

**Tabela 3.6 – Rendimentos de produtos na desasfaltação**

| Carga | Produto |      | Total |
|-------|---------|------|-------|
|       | Odes    | Rasf |       |
| RV    | 43%     | 57%  | 100%  |

**Tabela 3.7 – Rendimentos de produtos no coque**

| Carga | Produto |       |      |      |      | Total |
|-------|---------|-------|------|------|------|-------|
|       | G.I.p   | Coque | GOLK | GOPK | NAFK |       |
| RV    | 6%      | 26%   | 44%  | 18%  | 15%  | 109%  |

**Tabela 3.8 – Rendimentos de produtos nas unidades de tratamento (HDS e HDT)**

| Campanha | Carga    | Produto |        |      | Total |
|----------|----------|---------|--------|------|-------|
|          |          | DSL2000 | DSL500 | QAV  |       |
| DSL2000  | D(0,10)  | 100%    |        |      | 100%  |
|          | D(0,15)  | 100%    |        |      | 100%  |
|          | D(0,30)  | 100%    |        |      | 100%  |
|          | D(0,40)  | 100%    |        |      | 100%  |
|          | D(0,75)  | 100%    |        |      | 100%  |
|          | GOLK     | 100%    |        |      | 100%  |
|          | LCO      | 100%    |        |      | 100%  |
|          | Q(0,015) | 100%    |        |      | 100%  |
|          | Q(0,11)  | 100%    |        |      | 100%  |
| Q(0,35)  | 100%     |         |        | 100% |       |
| DSL500   | D(0,10)  |         | 100%   |      | 100%  |
|          | D(0,15)  |         | 100%   |      | 100%  |
|          | D(0,30)  |         | 100%   |      | 100%  |
|          | D(0,40)  |         | 100%   |      | 100%  |
|          | D(0,75)  |         | 100%   |      | 100%  |
|          | GOLK     |         | 100%   |      | 100%  |
|          | LCO      |         | 100%   |      | 100%  |
|          | Q(0,015) |         | 100%   |      | 100%  |
|          | Q(0,11)  |         | 100%   |      | 100%  |
| Q(0,35)  |          | 100%    |        | 100% |       |
| QAV      | Q(0,015) |         |        | 100% | 100%  |
|          | Q(0,11)  |         |        | 100% | 100%  |
|          | Q(0,35)  |         |        | 100% | 100%  |

Vale destacar que a molécula de carga que entra no HDS ou HDT é apenas hidrogenada, não ocorrendo nenhum processo de separação ou quebra. Daí o rendimento de 100% para todo tipo de carga. A diferença entre as unidades de HDS e HDT está na severidade da remoção de enxofre e no limite de produtos instáveis que podem ser tratados.

Para o HDT foi considerado que 99% do enxofre (em massa) existente na carga da unidade é removido. Já para o HDS, o índice de remoção de enxofre considerado é de 85%. Essa remoção de enxofre é representada matematicamente no modelo considerado através da equação XXII, mostrada no capítulo seguinte.

Com relação ao processamento de produtos instáveis (LCO e GOLK), foi considerado um total (soma dos dois produtos) máximo de 55% da carga para o HDT e 6% para o HDS. Também foram considerados limites ao processamento individual de cada um dos produtos. Para o LCO foi considerado um limite máximo de 15% da carga do HDT e 6% do HDS. Para o GOLK, 56% da carga do HDT e 3% da carga do HDS. Estas limitações estão representadas através da inequação XVII no capítulo seguinte ou através das inequações XL, XLI e XLII em anexo.

A capacidade máxima de processamento para cada unidade de processo é mostrada na tabela abaixo.

**Tabela 3.9 – Capacidade máxima de processamento por unidade**

| Unidade | Capacidade máxima (mil m <sup>3</sup> /Mês) |
|---------|---|
| Coque   | 741   |
| DESASF  | 453   |
| DEST    | 8610  |
| FCC     | 2550  |
| HDS     | 626   |
| HDT     | 802   |

A representação matemática do limite máximo de carga admitido para cada unidade se dá pela inequação XVI no próximo capítulo ou pelas inequações XXXVIII e XXXIX, mostradas em anexo.

Para que o catalisador da unidade de FCC não tenha sua vida útil muito reduzida, está sendo considerada uma limitação ao processamento de resíduo craqueável

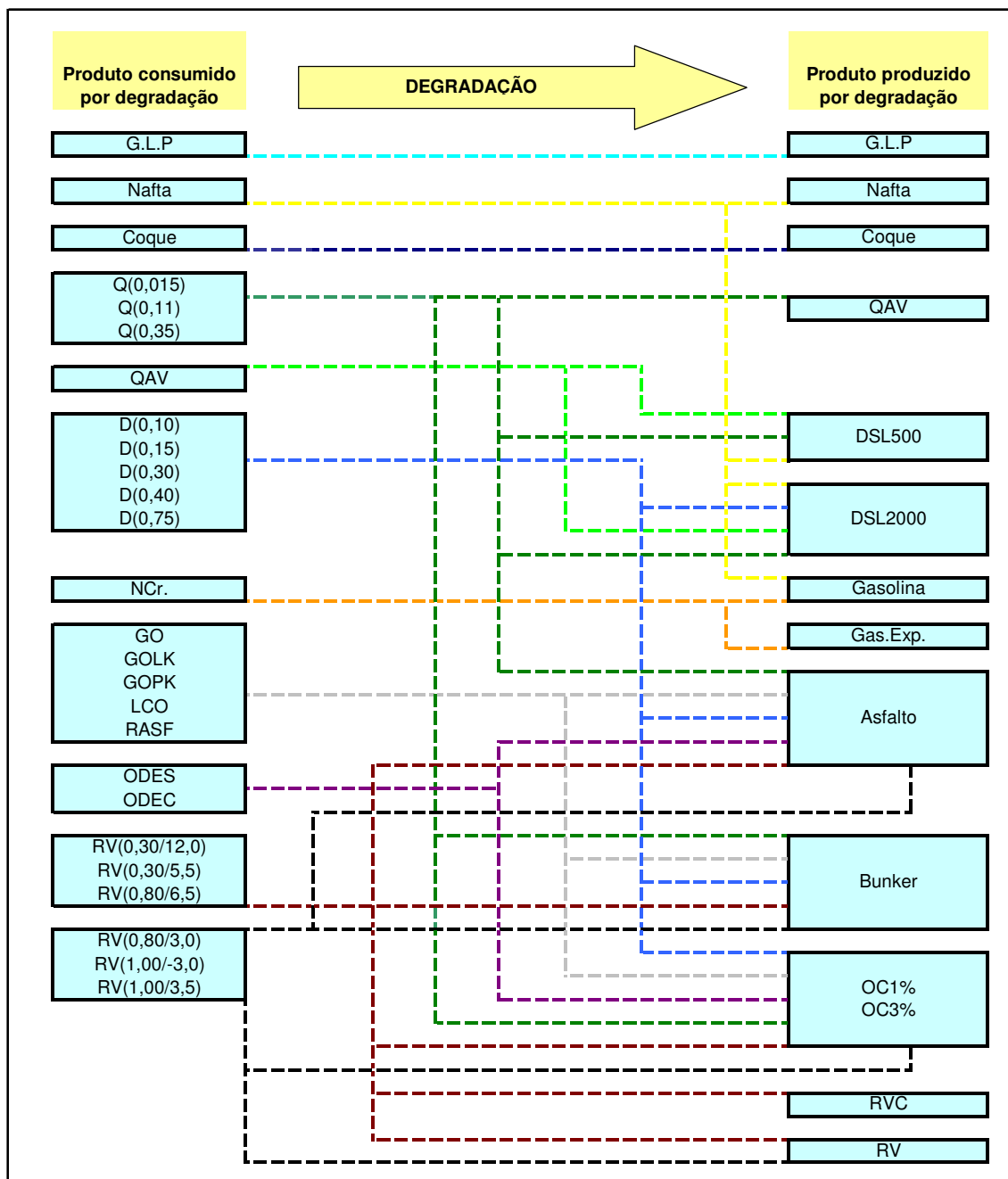
(RVC) no FCC equivalente a 12% da carga da unidade. Isto está modelado através da inequação XVIII no capítulo seguinte ou pela inequação XLIII em anexo.

Por não estarem representados alguns parâmetros de qualidade que limitam a produção de QAV, foi considerado um limite máximo de produção do derivado em 390 mil m<sup>3</sup>/mês. Isto está representado no modelo pela inequação LV em anexo.

Conforme já comentado, também são consideradas alternativas de mistura de produtos para o enquadramento da especificação final dos produtos. Esta mistura consiste na degradação de um produto para outro.

O termo “degradação” normalmente significa a incorporação de um produto de melhor qualidade em um outro de pior qualidade. Entretanto, neste trabalho, degradação tem o significado de incorporação de produtos de modo geral, incluindo incorporações de produtos de pior qualidade no *pool* de produtos de melhor qualidade, como ocorre, por exemplo, entre nafta e gasolina e entre resíduos e bunker.

A Ilustração 3.5, a seguir, mostra quais as possíveis alternativas de degradação entre os produtos consideradas neste trabalho. Isto está representado, matematicamente, através da inequação XX no capítulo seguinte ou pela inequação LI em anexo.



**Ilustração 3.5– Esquema de degradações (misturas)**

### **3.2.4. Informações sobre transporte e armazenagem**

Conforme mostrado na visão macro do sistema (Ilustração 3.3), as alternativas de transporte consideradas neste trabalho são entre o terminal marítimo nacional (Term\_nac) e os locais BR (onde fica a refinaria), o mercado (Merc), o local de produção de petróleo (Plat) e os terminais no exterior (T5, T6, T7, T8, T9). Estas alternativas possíveis de movimentações entre locais são modeladas através da

inequação XIV, no próximo capítulo, ou através das inequações XXXIV, XXXV, XXXVI e XXXVII em anexo.

Entre os locais Term\_nac e BR está sendo considerada a existência de três dutos, podendo operar em ambos os sentidos. Cada duto pode movimentar grupos de produtos diferentes (produtos claros (G-CLA), produtos escuros (G-ESC) e petróleo (G-PET)) e possuem capacidades distintas de movimentação. Os três grupos de produtos considerados e os produtos que os compõem são mostrados na Tabela 3.10 abaixo.

**Tabela 3.10 – Composição dos grupos de transporte**

| <b>Grupo transporte</b> | <b>Produto</b>  |
|-------------------------|---|
| G-CLA                   | DSL2000<br>DSL500<br>G.l.p<br>Gas.Exp.<br>Gasolina<br>Nafta<br>QAV    |
| G-ESC                   | Asfalto<br>Bunker<br>Coque<br>GO<br>LCO<br>NAFK<br>OC1%<br>OC3%<br>RV |
| G-PET                   | BV<br>CAB<br>JUB<br>ML<br>P31<br>PN<br>SB                             |

As capacidades máximas de movimentação de cada grupo de produto em cada sentido do duto são mostradas na

Tabela 3.11 a seguir. Note que para os derivados (claros e escuros) existem limites de movimentação em ambos os sentidos, já para os petróleo não faz sentido a movimentação da refinaria para o terminal. Daí, então, o limite nulo neste sentido. Estas restrições de transporte são representadas pela inequação XIII, no capítulo seguinte, ou pelas inequações XXXI, XXXII e XXXIII em anexo.

**Tabela 3.11 – Capacidade de movimentação mensal de cada grupo de produto por sentido**

| Grupo transporte | Local Origem | Local Destino | Capacidade movimentação (mil m3/mês) |
|------------------|--------------|---------------|--------------------------------------|
| G-CLA            | BR           | Term_nac      | 7.000                                |
| G-ESC            | BR           | Term_nac      | 1.400                                |
| G-PET            | BR           | Term_nac      | 0                                    |
| G-CLA            | Term_nac     | BR            | 1.000                                |
| G-ESC            | Term_nac     | BR            | 200                                  |
| G-PET            | Term_nac     | BR            | 9.550                                |

O duto que liga o terminal (Term\_nac) ao mercado (Merc) tem capacidade suficiente para o atendimento pleno da demanda e, sendo assim, nenhuma restrição foi considerada. O mesmo foi considerado para as movimentações de produtos entre o terminal nacional (Term\_nac) e os outros terminais no exterior (T5, T6, T7, T8, T9) e entre o Term\_nac e a plataforma de produção de petróleo (Plat), entendendo-se que caso haja necessidade de se utilizar mais navios, estes podem ser contratados no mercado *spot*.

Da mesma forma como no caso de transporte, para o caso de estoques também foram definidos grupos de produtos e a restrição de armazenagem foi aplicada ao grupo. A Tabela 3.12 abaixo ilustra os dois grupos (derivados claros (G-CLA) e derivados escuros (G-ESC)). Foi considerado que petróleos não podem ser estocados, daí a não existência de um grupo para petróleos.

**Tabela 3.12 – Composição dos grupos de estoques**

| <b>Grupo<br/>Estoque</b> | <b>Produto</b>  |
|--------------------------|---|
| G-CLA                    | DSL2000<br>DSL500<br>G.l.p<br>Gas.Exp.<br>Gasolina<br>Nafta<br>QAV                    |
| G-ESC                    | Asfalto<br>Bunker<br>Coque<br>GO<br>GOPK<br>NAFK<br>OC1%<br>OC3%<br>Odes<br>RV<br>RVC |

Foi considerada a possibilidade de estocagem de produtos apenas na refinaria (BR). A Tabela 3.13 abaixo mostra os limites máximos de estoques para cada grupo de produtos.

**Tabela 3.13 – Capacidade de estocagem mensal para cada grupo de produtos**

| <b>Grupo<br/>Estoque</b> | <b>Local</b> | <b>Capacidade de<br/>estoques<br/>(mil m3/mês)</b> |
|--------------------------|--------------|--|
| G-CLA                    | BR           | 50   |
| G-ESC                    | BR           | 60   |

Estas limitações de armazenagem foram representadas matematicamente através das restrições XI e XII, no capítulo a seguir, e das restrições XXVIII e XXIX mostradas em anexo. Também foi considerada a não existência de produto em estoque no período inicial do modelo. Isso foi modelado através da equação XXX em anexo.

Na modelagem matemática do problema é importante garantir que seja respeitado o balanço volumétrico de todos os produtos em todos os locais e períodos, ou seja, garantir que não haja nem “aparecimento” nem “sumiço” de produtos. Para isso, para um determinado produto, local e período, o volume existente em estoque no início



deste período, mais o que foi produzido (seja via degradação ou processamento), mais o que foi recebido de outros locais deve ser igual ao volume consumido (seja via degradação ou processamento), mais o que foi enviado para outros locais, mais o que foi estocado no final do período.

Esta restrição de balanço volumétrico pode ser escrita através de um único conjunto de equações aplicadas a todos os produtos, locais e períodos, conforme a equação I (para o local refinaria) no capítulo seguinte. Entretanto, visto que alguns termos da equação não fazem sentido para alguns produtos (existem produtos que são produzidos somente por degradação ou somente por processamento, que não são estocáveis, que não são transportáveis, etc.), aplicar um único conjunto de equações a todos os produtos resultaria, desnecessariamente, em um aumento do número de variáveis e restrições do problema. Desta forma, para a implementação computacional, as restrições de balanço foram escritas através de alguns conjuntos de equações (equações I a V no capítulo seguinte ou I a XIX mostradas em anexo), cada conjunto apenas com os termos que fazem sentido ao grupo de produtos ao qual está sendo aplicado.

### **3.2.5. Informações comerciais**

As informações relativas a volumes e preços de produtos consideradas neste trabalho foram geradas a partir de informações consideradas em um Plano de Abastecimento do Sistema Petrobras. Por questões de segurança da informação da empresa, não foram usadas as informações oficiais constantes no Plano de Abastecimento e sim valores resultantes da multiplicação dos números oficiais por dois fatores: um aplicado às informações de volume e outro às de preço/custo dos produtos comercializados. Desta forma pode-se trabalhar com um cenário equivalente ao real sem revelar os valores oficiais.

As tabelas 8.1 a 8.12, em anexo, apresentam os volumes demandados e ofertados de cada produto nos mercados interno e externo bem como seus respectivos preços, além dos custos de transporte, de utilização de unidades e de estocagem que foram considerados neste trabalho. Vale destacar que os custos de transporte<sup>8</sup>, de utilização de

---

<sup>8</sup> O custo de transporte de cada produto entre dois locais é o mesmo independente do sentido da movimentação.

unidades e de estocagem foram considerados atemporais, ou seja, independem do período. Já os preços de compra e venda dos produtos foram considerados variáveis de acordo com o período.

Considerando-se que o *lead time* entre a colocação do pedido de importação de um produto e a liberação deste produto para ser utilizado, normalmente, ultrapassa 20 dias foi considerado que as decisões quanto à importação dos produtos devem ser feitas com um período de antecedência, ou seja, um produto importado no período atual somente estará disponível para ser utilizado no período seguinte. Como neste trabalho o horizonte de tempo considerado é de quatro períodos, os volumes de produtos ofertados no exterior para serem importados bem como seus respectivos preços corresponderão aos períodos de 0 a 3 enquanto todos os outros valores corresponderão aos períodos de 1 a 4.

Foi também considerada uma possibilidade não convencional de importação de produtos (importação extra), permitindo-se a utilização do produto no mesmo período da compra. Entretanto, o custo da urgência do produto (utilização de modais mais rápidos, não otimização logística, etc.) é incorporado ao seu preço resultando em valores cerca de 30% mais altos, conforme pode ser percebido na Tabela 8.11 em anexo. Foi considerada apenas a possibilidade de importação extra a partir do terminal T9 (América do Sul), dada a proximidade.

Foi considerado que, em cada período, todo o volume de petróleo produzido pela área de E&P da empresa deve ser comprado pela área de Abastecimento, que decidirá qual o melhor destino a ser dado ao óleo: refinar internamente ou exportar. Os volumes de produção de cada tipo de petróleo considerados em cada período são os mostrados na Tabela 8.12 em anexo.

Nas tabelas 8.1 a 8.12, em anexo, os valores de volumes correspondem aos limites que as variáveis comerciais (importação, exportação e venda no mercado interno) e de produção de petróleos podem assumir, conforme escrito através das restrições XXI a XXIV, no próximo capítulo, ou das restrições LVI a LIX em anexo. Já os valores de preços e custos correspondem aos coeficientes das variáveis consideradas na função objetivo do modelo.

## 4. Modelagem

Nesta seção serão apresentadas as formulações matemáticas utilizadas para representar os modelos considerados neste trabalho. Para facilitar a compreensão será apresentada uma formulação matemática simplificada do problema. Em anexo é apresentada uma formulação matemática mais detalhada, com conjuntos mais específicos, e que foi utilizada para a implementação computacional com o intuito de se reduzir o número de variáveis do problema.

Primeiramente será descrito o modelo determinístico, que será utilizado como base de comparação para os modelos estocásticos, comentados na sequência. Para estes últimos também será comentada a metodologia utilizada para a estimativa dos possíveis valores dos parâmetros incertos.

Visto que a formulação matemática dos modelos determinístico e estocásticos é semelhante, ao se comentar sobre estes últimos serão apresentadas apenas as diferenças em relação ao determinístico, evitando-se, assim, repetições desnecessárias.

### 4.1. Modelo determinístico

#### 4.1.1. Formulação matemática simplificada

A seguir serão apresentados a terminologia empregada para os índices, os conjuntos, os parâmetros e as variáveis, bem como a formulação matemática simplificada e os comentários acerca das restrições e da função objetivo.

##### 4.1.1.1. Índices

|      |                                     |
|------|-------------------------------------|
| t    | Período                             |
| p, d | Produto                             |
| i, j | Local                               |
| u    | Unidade de processamento/tratamento |
| c    | Campanha                            |
| g    | Grupo estoque                       |

#### 4.1.1.2. Conjuntos

- P Conjunto de todos os produtos
- P<sub>1</sub> Conjunto dos produtos do tipo petróleo
- P<sub>2</sub> Conjunto dos produtos do tipo derivado
- P<sub>3</sub> Conjunto dos produtos do tipo nafta craqueada
- P<sub>4</sub> Conjunto dos produtos do tipo nafta de destilação
- P<sub>5</sub> Conjunto dos produtos do tipo gasolina
- P<sub>6</sub> Conjunto dos produtos do tipo diesel ou querosene
- P<sub>7</sub> Conjunto dos produtos instáveis
- P<sub>8</sub> Conjunto dos produtos do tipo resíduo craqueável
- L<sub>r</sub> Conjunto dos locais com refinaria
- L<sub>r1</sub> Conjunto dos locais com refinaria e terminal marítimo
- L<sub>p</sub> Conjunto dos locais com plataforma de produção de petróleo
- L<sub>x</sub> Conjunto dos locais com terminal marítimo no exterior
- L<sub>t</sub> Conjunto dos locais com terminal marítimo no país
- L<sub>k</sub> Conjunto dos locais com mercado a ser atendido
- U Conjunto de todas as unidades
- U<sub>h</sub> Conjunto das unidades do tipo HDT/HDS
- U<sub>f</sub> Conjunto das unidades do tipo FCC
- C Conjunto de todas as campanhas
- G Conjunto de todos os grupos de produtos para estoque
- T Conjunto de todos os períodos, exceto o inicial
- T<sub>0</sub> Conjunto de todos os períodos, inclusive o inicial

#### 4.1.1.3. Parâmetros

- Rend<sub>p,d,u,c,j</sub> Rendimento % do produto d ao processar o produto p na unidade u na campanha c no local j

|                     |   |
|---------------------|---|
| $Est\_max_{g,i}$    | Vol. (mil m3) máximo de estoque do grupo estoque g no local i                     |
| $Cap\_transp_{i,j}$ | Vol. (mil m3) máximo de transporte do grupo transporte h entre os locais i e j    |
| $Cap\_proc\_max_u$  | Vol. (mil m3) máximo de processamento da unidade u                                |
| $DI_{p,t}$          | Vol.(mil m3) demandado no mercado interno do produto p no período t               |
| $DE_{p,i,t}$        | Vol.(mil m3) demandado no mercado externo do produto p no local i no período t    |
| $OI_{p,i,t}$        | Vol.(mil m3) ofertado no mercado interno do produto p no local i no período t     |
| $OE_{p,i,t}$        | Vol.(mil m3) ofertado no mercado externo do produto p no local i no período t     |
| $ARC_{i,j}$         | Igual a 1 se existe arco entre i e j através do modal m e 0 c.c.                  |
| $PR_{p,u,c}$        | Igual a 1 se o produto p puder ser processado na unidade u na campanha c e 0 c.c. |
| $PE_{p,j,t}$        | Igual a 1 se o produto p puder ser estocado no local j no período t e 0 c.c.      |
| $PD_{p,d}$          | Igual a 1 se o produto p pode ser degradado para o produto d e 0 c.c.             |
| $L\_inst_{u,i}$     | % máximo de produtos instáveis totais na carga da unidade u no local i            |
| $SE_p$              | % de enxofre contido no produto p   |
| $RS_{u,i}$          | % de remoção de enxofre da unidade u (HDT/HDS) no local i                         |
| $RV\_máx_i$         | Limite % máximo de RV na carga do FCC no local i                                  |
| $NDD\_máx_i$        | % máximo de nafta dd no pool de gasolina no local i                               |

|                 |   |
|-----------------|---|
| $c_{p,i,t}^i$   | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de importação do produto p no local i no período t               |
| $c_{-Xp,i,t}^i$ | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de importação extra do produto p no local i no período t         |
| $c_u^u$         | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de utilização da unidade u                                       |
| $c_i^d$         | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de degradação no local i   |
| $c_{p,i,j}^t$   | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de transporte do produto p do local i para o local j             |
| $c_p^e$         | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de estoque do produto p  |
| $p_{p,t}^i$     | Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de venda no mercado interno do produto p no período t            |
| $p_{p,i,t}^e$   | Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de venda no mercado externo do produto p no local i no período t |
| $S_{máx_d}$     | % máximo de enxofre permitido no produto d  |
| $Dens_d$        | Densidade (Ton/m <sup>3</sup> ) do produto d  |
| $Visc_d$        | Índice linear de viscosidade do produto d   |
| $Visc_{mín_d}$  | Índice mínimo de viscosidade permitido para o produto d                                       |

#### 4.1.1.4. Variáveis

|                  |  |
|------------------|--|
| $ES_{p,g,i,t}$   | Vol.(mil m <sup>3</sup> ) estocado do produto p no grupo estoque g no local i no final do período t          |
| $CG_{p,u,c,j,t}$ | Vol.(mil m <sup>3</sup> ) do produto p, carga da unidade u na campanha c no local j no período t             |
| $DG_{p,d,i,t}$   | Vol.(mil m <sup>3</sup> ) do produto p que degradada para o produto d no local i no período t                |
| $FX_{p,i,j,t}$   | Vol.(mil m <sup>3</sup> ) do produto p movimentado do local i para o local j através do modal m no período t |
| $SS_{p,u,c,i,t}$ | Massa (mil Ton) de enxofre no produto p que sai da unidade u na campanha c no local i no período t           |

|                  |  |
|------------------|--|
| $SD_{p,i,t}$     | Massa (mil Ton) de enxofre no produto p produzido por degradação no local i no período t |
| $VD_{p,t}$       | Volume (mil m3) vendido no mercado interno do produto p no período t                     |
| $EXP_{p,i,t}$    | Volume (mil m3) vendido no mercado externo do produto p no local i no período t          |
| $IMP_{p,i,t}$    | Volume (mil m3) importado do produto p proveniente do local i no período t               |
| $IMP\_X_{p,i,t}$ | Volume (mil m3) extra importado do produto p proveniente do local i no período t         |
| $PRD_{p,i,t}$    | Volume (mil m3) produzido do petróleo p no local i no período t                          |
| $PP_{p,i,t}$     | Volume (mil m3) do produto p produzido por processamento no local i no período t         |

#### 4.1.1.5. Restrições

##### 4.1.1.5.1. Restrições de Balanço

- I.  $ES_{p,j,t-1} + PP_{p,j,t} + \sum_{d \in P_1} DG_{d,p,j,t} + \sum_{i \in L_t} FX_{p,i,j,t} - \sum_{i \in L_t} FX_{p,j,i,t} - \sum_{u \in U} CG_{p,u,c,j,t} - \sum_{d \in P_2} DG_{p,d,j,t} - ES_{p,j,t} = 0$   
 $\forall p \in P, j \in L_r, t \in T$
- II.  $\sum_{i \in L_t} FX_{d,i,j,t} - EXP_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P, j \in L_x, t \in T$
- III.  $\sum_{j \in L_t} FX_{d,i,j,t} - IMP_{d,i,t-1} - IMP\_X_{d,i,t} = 0 \quad \forall d \in P, i \in L_x, t \in T$
- IV.  $\sum_{j \in L_t} FX_{d,i,j,t} - PRD_{d,i,t} = 0 \quad \forall d \in P_1, i \in L_p, t \in T$
- V.  $\sum_{i \in L_t} \sum_{j \in L_k} FX_{d,i,j,t} - VD_{d,t} = 0 \quad \forall d \in P_2, t \in T$

##### 4.1.1.5.2. Restrições de Qualidade

- VI.  $NDD\_máx_j * \sum_{p \in P_3} DG_{p,d,j,t} - (1 - NDD\_máx_j) * \sum_{p \in P_4} DG_{p,d,j,t} \geq 0 \quad \forall d \in P_5, j \in L_r, t \in T$
- VII.  $\sum_{p \in P} (CG_{p,u,c,j,t} * Rend_{p,d,u,c,j} * Dens_p * SE_p) * (1 - RS_{u,j}) - SS_{d,u,c,j,t} = 0$   
 $\forall d \in P_2, c \in C, u \in U_h, j \in L_r, t \in T$

- viii.  $[\sum_{p \in P_2} (DG_{p,d,j,t} * Dens_p * SE_p)] - SD_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_2, j \in L_r, t \in T$
- ix.  $\sum_{u \in U_h} \sum_{c \in C} SS_{d,u,c,j,t} + SD_{d,j,t} - S_{\text{máx}_d} * \left[ PP_{d,j,t} + \sum_{p \in P_2} DG_{p,d,j,t} \right] * Dens_d \leq 0 \quad \forall d \in P_2, j \in L_r, t \in T$
- x.  $\sum_{p \in P_2} (DG_{p,d,j,t} * Visc_p) - \left( \sum_{p \in P_2} DG_{p,d,j,t} \right) * Visc_{\text{mín}_d} \geq 0 \quad \forall d \in P_2, j \in L_r, t \in T$

#### 4.1.1.5.3. Restrições de Estoque

- xi.  $ES_{d,g,j,t} \leq PE_{d,j} * PG_{d,g} * 1000000 \quad \forall d \in P, g \in G, j \in L, t \in T$
- xii.  $\sum_{d \in P} ES_{d,g,j,t} \leq Est_{\text{máx}_{g,j}} \quad \forall g \in G, j \in L, t \in T$

#### 4.1.1.5.4. Restrições de Transporte / Fluxo

- xiii.  $\sum_{d \in P} FX_{d,i,j,t} \leq Cap_{\text{transp}_{i,j}} \quad \forall i \in L_{r1}, j \in L_{r1}, t \in T$
- xiv.  $FX_{d,i,j,t} \leq ARC_{i,j} * 1000000 \quad \forall d \in P, i \in L, j \in L, t \in T$

#### 4.1.1.5.5. Restrições de Processamento

- xv.  $CG_{p,u,c,j,t} \leq PR_{p,u,c} * 1000000 \quad \forall p \in P, u \in U, c \in C, j \in L_r, t \in T$
- xvi.  $\sum_{p \in P} CG_{p,u,c,j,t} \leq Cap_{\text{proc}_{\text{máx}_u}} \quad \forall u \in U, c \in C, j \in L_r, t \in T$
- xvii.  $L_{\text{inst}_{u,j}} * \sum_{p \in P_6} \sum_{c \in C} CG_{p,u,c,j,t} - (1 - L_{\text{inst}_{u,j}}) * \sum_{p \in P_7} \sum_{c \in C} CG_{p,u,c,j,t} \geq 0 \quad \forall u \in U_h, j \in L_r, t \in T$
- xviii.  $RV_{\text{máx}_j} * \sum_{p \in P_2} CG_{p,u,j,t} - (1 - RV_{\text{máx}_j}) * \sum_{p \in P_8} CG_{p,u,j,t} \geq 0 \quad \forall u \in U_f, j \in L_r, t \in T$
- xix.  $\sum_{p \in P} \sum_{u \in U} \sum_{c \in C} CG_{p,u,c,j,t} * Re_{nd_{p,d,u,c,j}} - PP_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_2, j \in L_r, t \in T$
- xx.  $DG_{p,d,j,t} \leq PD_{p,d} * 1000000 \quad \forall p \in P_2, d \in P_2, j \in L_r, t \in T$

#### 4.1.1.5.6. Restrições de Comercialização

- xxi.  $VD_{d,t} = DI_{d,t} \quad \forall d \in P_2, t \in T$
- xxii.  $EXP_{d,j,t} \leq DE_{d,j,t} \quad \forall d \in P, j \in L_x, t \in T$
- xxiii.  $IMP_{d,i,t} + IMP_{\text{x}_{d,i,t}} \leq OE_{d,i,t} \quad \forall d \in P, i \in L_x, t \in T_0$
- xxiv.  $PRD_{d,i,t} = OI_{d,i,t} \quad \forall d \in P_1, i \in L_p, t \in T$

#### 4.1.1.5.7. Restrições de Não-negatividade

Todas as variáveis devem ser maior ou igual a zero.



#### 4.1.1.5.8. Função Objetivo

$$\begin{aligned}
& \text{Min } \sum_{d \in P} \sum_{i \in L_x} \sum_{t \in T_0} c_{d,i,t}^i * \text{IMP}_{d,i,t} + \sum_{d \in P} \sum_{i \in L_x} \sum_{t \in T} c_{-x_{d,i,t}}^i * \text{IMP}_{d,i,t} + \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{u \in U} \sum_{c \in C} \sum_{j \in L_r} \sum_{t \in T} c_{p,u,c,j,t}^u * \text{CG}_{p,u,c,j,t} + \sum_{p \in P_1} \sum_{d \in P_2} \sum_{j \in L_r} \sum_{t \in T} c_j^d * \text{DG}_{p,d,j,t} + \\
& + \sum_{d \in P} \sum_{i \in L} \sum_{j \in L} \sum_{t \in T} c_{d,i,j}^t * \text{FX}_{d,i,j,t} + \sum_{d \in P} \sum_{g \in G} \sum_{j \in L_r} \sum_{t \in T_0} c_d^e * \text{ES}_{d,g,j,t} + \\
& - \sum_{d \in P} \sum_{t \in T} p_{d,t}^i * \text{VD}_{d,t} - \sum_{d \in P} \sum_{j \in L_x} \sum_{t \in T} p_{d,j,t}^e * \text{EXP}_{d,j,t}
\end{aligned}$$

#### 4.1.2. Comentários sobre as restrições

A seguir será comentada cada restrição que compõe o modelo determinístico. Como foi considerado apenas um único local (BR) para o grupo de locais com refinaria (Lr)<sup>9</sup>, para evitar repetições, não será mencionado o local quando se tratar do grupo Lr nos comentários a seguir, ficando implícito que se trata do único local BR.

##### 4.1.2.1. Restrições de Balanço

- i. Para cada período e produto, o estoque inicial do produto na refinaria mais o volume produzido por processamento mais o volume produzido por degradação mais o volume recebido na refinaria deve ser igual ao volume enviado ao terminal mais o volume consumido por processamento mais o volume consumido por degradação mais o estoque final do produto na refinaria.
- ii. Para cada período, cada local no exterior com demanda de produtos e cada produto final demandado no exterior, o volume de produto enviado do terminal para o local externo deve ser igual ao volume exportado.
- iii. Para cada período, cada local no exterior com oferta de produtos e cada produto final ofertado no exterior, o volume de produto enviado do local externo para o terminal deve ser igual ao volume importado no período anterior (a decisão de importação ocorre com um período de antecedência) mais o volume extra importado no período atual.

---

<sup>9</sup> Para simplificar o modelo, todas as refinarias foram consolidadas em uma única, em um único local (BR).

- iv. Para cada período e cada produto tipo petróleo, o volume produzido de petróleo deve ser igual ao volume de produto enviado da plataforma de produção para o terminal.
- v. Para cada período e cada produto com demanda no mercado interno, o total de produto enviado do terminal para o mercado interno deve ser igual ao volume vendido no mercado interno.

#### **4.1.2.2. Restrições de Qualidade**

- vi. Para cada período, o volume total degradado de nafta DD ao pool de gasolina dividido pelo volume total de produto (nafta DD + nafta craqueada) degradado ao pool de gasolina deve ser menor que o teor (%) máximo de nafta DD no pool de gasolina. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- vii. Para cada período, unidade do tipo tratamento, campanha e derivado, o total de enxofre equivalente em massa (somatório de: volume de carga multiplicado pela sua densidade, pelo seu teor (%) de enxofre e pelo rendimento do derivado em questão) que entra na carga da unidade de tratamento multiplicado por 100% menos o teor (%) de remoção de enxofre é igual à massa (mil ton) de enxofre que sai com o derivado da unidade de tratamento.
- viii. Para cada período e derivado produzido por degradação, o volume total de produto degradado para o derivado em questão multiplicado pela densidade do produto consumido por degradação e pelo seu teor de enxofre é igual à massa (mil ton) de enxofre no derivado produzido por degradação.
- ix. Para cada período e produto, o total de enxofre em massa que sai com o produto da unidade de tratamento mais o total de enxofre em massa no produto produzido por degradação dividido pela massa total de produto produzido (via unidade de tratamento e/ou via degradação) deve ser menor que ou igual ao teor (%) máximo de enxofre permitido no produto em questão. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- x. Para cada período e derivado, o somatório do volume de produto consumido por degradação multiplicado pelo seu respectivo índice de viscosidade, dividido pelo volume total de produto degradado para o derivado em questão deve ser maior que o índice mínimo de viscosidade para o derivado em questão. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.

#### **4.1.2.3. Restrições de Estoque**

- xI. Esta restrição impede que haja estoque de produto considerado como não estocável e/ou em locais sem possibilidade de estocagem. Se o produto pertencer a um grupamento de estoques e estiver em local com tancagem, o limite superior para o estoque de produtos é bastante grande, não representando, na verdade, uma restrição. Caso contrário, o limite superior passa a ser zero.
- xII. Para cada período, grupo de estoque de produtos e local, o total estocado no final do período deve ser inferior ao volume máximo permitido para o grupo em questão.

#### **4.1.2.4. Restrições de Transporte / Fluxo**

- xIII. Para cada período, o somatório de volume dos produtos movimentados entre o terminal e o local com refinaria não pode superar o limite máximo entre esses dois locais.
- xIV. Esta restrição impede que haja fluxo de produto entre dois locais sem arco de ligação. Se existir arco entre dois locais quaisquer, o limite superior para o fluxo de produtos é bastante grande, não representando, na verdade, uma restrição. Caso não haja arco, o limite superior passa a ser zero.

#### **4.1.2.5. Restrições de Processamento**

- xV. Esta restrição impede que um produto seja utilizado como carga de unidade inadequada ou em campanha inadequada. Se um produto puder ser processado em determinada unidade durante uma certa campanha, o limite superior para o processamento do produto é bastante grande, não representando, na verdade, uma restrição. Caso contrário, o limite superior passa a ser zero.
- xVI. Para cada período, campanha e unidade, o volume total processado não deve superar a capacidade máxima da unidade em questão.
- xVII. Para cada período e unidade do tipo tratamento, o volume total de produto do tipo instável que entra como carga na unidade dividido pela carga total da unidade não deve superar o teor (%) máximo de instáveis na carga da unidade. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- xVIII. Para cada período e unidade do tipo FCC, o volume total de produto do tipo RV que entra como carga na unidade dividido pela carga total da unidade não deve superar o

teor (%) máximo de RV na carga da unidade. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.

- xix. Para cada período, unidade e derivado, o volume total de produto que entra como carga na unidade multiplicado pelo respectivo rendimento do derivado é igual ao volume produzido por processamento do derivado em questão.
- xx. Esta restrição impede que haja degradações incompatíveis entre dois produtos. Se um produto puder ser degradado para outro, o limite superior para a degradação de produtos é bastante grande, não representando, na verdade, uma restrição. Caso contrário, o limite superior passa a ser zero.

#### **4.1.2.6. Restrições de Comercialização**

- xxi. Para cada período e produto, o volume vendido no mercado interno deve ser exatamente igual ao volume demandado (atendimento pleno do mercado é obrigatório).
- xxii. Para cada período e produto, o volume de produto exportado não deve superar o volume demandado externamente.
- xxiii. Para cada período e produto, o volume de produto importado não deve superar o volume ofertado externamente.
- xxiv. Para cada período e petróleo, o volume de petróleo produzido deve ser igual ao volume máximo ofertado pela área de E&P.

Com relação à função objetivo se quer minimizar o prejuízo, ou seja, minimizar a diferença entre os custos (de importação, de utilização das unidades, de degradação, de transporte e de estoques) e receitas (com venda de produtos no mercado interno e com exportações).

## **4.2. Modelos Estocásticos**

A fim de se incorporar algumas incertezas ao Plano de Abastecimento foram construídos, utilizando-se programação estocástica, alguns modelos a partir do modelo base determinístico recém apresentado, sendo que nesses modelos um ou mais parâmetros, que antes tinham a eles associados um único valor, agora podem assumir três diferentes valores, todos com a mesma probabilidade de ocorrência, ou seja, 1/3 cada.

Os parâmetros considerados incertos foram: a demanda no mercado interno por diesel, gasolina e óleo combustível; os preços internacionais dos mesmos três produtos; e a disponibilidade das unidades de destilação, FCC, coque e de tratamento.

A escolha da demanda, preço e disponibilidade das unidades para serem tratados como parâmetros aleatórios está relacionada aos significativos desvios verificados na realidade quando comparados aos valores esperados e também por tais parâmetros terem influência direta no Plano de Abastecimento.

A escolha de se associar os parâmetros incertos “demanda” e “preço” ao diesel está relacionada ao seu elevado preço no mercado internacional e também elevado volume consumido no mercado interno, tendo forte influência, então, no Plano de Abastecimento. Já a gasolina e óleo combustível, apesar de um menor preço, têm também significativo impacto na solução pelo alto volume de produção, visto que grande parte do petróleo nacional apresenta expressivos rendimentos destes produtos.

A seguir será explicada a metodologia utilizada para se estimar os três possíveis valores que cada parâmetro incerto pode assumir e, na seção posterior, será apresentado o procedimento realizado para a elaboração dos modelos estocásticos através do programa XPRESS-SP.

#### **4.2.1. Estimativa dos possíveis valores dos parâmetros aleatórios**

Mensalmente, a gerência de Planejamento da Logística, pertencente à área de Abastecimento da Petrobras, elabora um Plano de Abastecimento com indicações quanto à operação da cadeia de suprimentos para um horizonte de doze meses a frente. A cada mês, portanto, diversas informações necessárias à elaboração deste plano são fornecidas pelas áreas responsáveis. Esse conjunto de informações é, então, alimentado em um modelo de programação linear determinístico (conhecido como PlanAb) que, após otimizado, resultará no Plano de Abastecimento para os próximos doze meses.

No PlanAb, a unidade de tempo é o mês e, por se tratar de um modelo determinístico, os parâmetros informados pelas áreas responsáveis correspondem à expectativa de realização em cada um dos doze meses do plano. Assim, por exemplo, a demanda de diesel no mercado interno é representada no PlanAb por doze valores, ou seja, a expectativa da área comercial de realização de demanda deste produto em cada mês.

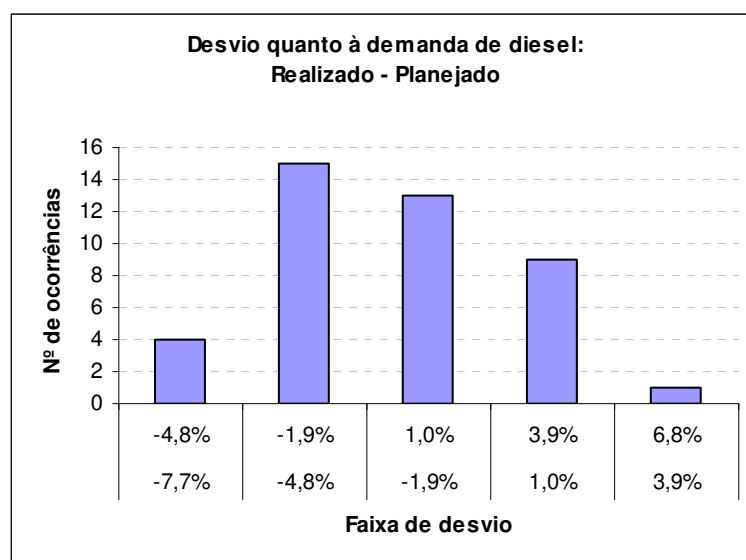
Por melhor que seja o modelo de previsão de vendas da área comercial, é difícil não haver desvios entre os valores previstos e realizados para a demanda de diesel. Esta mesma idéia se estende aos muitos outros parâmetros informados pelas várias outras áreas responsáveis.

Ao se utilizar programação estocástica é necessário conhecer a distribuição de probabilidade associada aos coeficientes aleatórios. Para uma boa representação da variação do parâmetro incerto é desejável se trabalhar com a distribuição contínua de probabilidade deste parâmetro ou com uma distribuição de probabilidade discreta considerando-se muitos pontos. Por outro lado, representar a incerteza através de distribuições de probabilidades contínuas ou discretas com muitos pontos pode tornar o problema intratável computacionalmente, visto que a complexidade e tamanho do problema aumenta bastante, inviabilizando-se a sua solução, seja por questões do elevado tempo necessário para a solução, seja por questões de *hardware* insuficiente para a otimização.

Neste trabalho, para a representação da incerteza foram considerados três possíveis valores para cada parâmetro incerto. A metodologia utilizada para se estimar estes valores consistiu, primeiramente, em se comparar as realizações históricas verificadas para cada parâmetro incerto com os respectivos valores informados pelas áreas responsáveis, ou seja, foi feito um levantamento histórico<sup>10</sup> dos desvios relacionados a cada parâmetro. Para ilustrar este tipo de levantamento é mostrado abaixo, no Gráfico 4.1, para o período entre fev/2005 e jul/2008, os desvios entre as vendas realizadas de diesel e as previsões feitas pela área comercial um mês antes da realização.

---

<sup>10</sup> Para os parâmetros “demanda” e “disponibilidade de unidades” os desvios foram calculados comparando-se os dados realizados com aqueles previstos em 42 Planos de Abastecimento, elaborados entre fev/05 e jul/08. Já para o parâmetro “preço” foram utilizados 51 Planos de Abastecimento, compreendidos entre jun/04 e ago/08. A diferença na quantidade de planos utilizados decorreu da disponibilidade de dados realizados.



**Gráfico 4.1 – Desvios entre as demandas realizada e planejada de diesel**

Após o levantamento dos desvios, estes foram organizados em ordem decrescente e divididos em três classes (A, B e C), cada classe com a mesma quantidade de dados. Isto foi feito para 1, 2, 3 e 4 meses antes da realização da demanda.

Para cada classe, então, calculou-se a média dos desvios, resultando, assim, em três valores para cada parâmetro e cada período antes da realização da demanda. Estes três desvios médios aplicados aos parâmetros considerados no caso determinístico resultarão nos três possíveis valores considerados nos modelos estocásticos. Como em cada classe existe a mesma quantidade de dados, a probabilidade de ocorrência de cada desvio médio é a mesma, isto é, 1/3. As tabelas 4.1 a 4.10 a seguir resumem os desvios calculados para cada parâmetro incerto e que serão utilizados nos modelos estocásticos.

**Tabela 4.1 – Desvios na demanda de diesel para cada período que antecede sua realização**

| Classe | Nº de meses antes da realização da demanda de diesel |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1  |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor  | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 3,5%   | 33,3% | 4,4%  | 33,3% | 4,9%  | 33,3% | 5,5%  | 33,3% |
| B      | -0,8%  | 33,3% | -0,7% | 33,3% | -0,5% | 33,3% | 0,2%  | 33,3% |
| C      | -4,9%  | 33,3% | -5,0% | 33,3% | -4,7% | 33,3% | -5,2% | 33,3% |

**Tabela 4.2 – Desvios na demanda de gasolina para cada período que antecede sua realização**

| Classe | Nº de meses antes da realização da demanda de gasolina |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1  |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor  | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 4,0%   | 33,3% | 4,1%  | 33,3% | 6,1%  | 33,3% | 7,3%  | 33,3% |
| B      | 0,4%   | 33,3% | 0,6%  | 33,3% | 1,6%  | 33,3% | 2,2%  | 33,3% |
| C      | -4,0%  | 33,3% | -3,3% | 33,3% | -2,8% | 33,3% | -2,5% | 33,3% |

Tabela 4.3 – Desvios na demanda de óleo combustível para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização da demanda de OC |       |        |       |       |       |       |       |
|--------|--|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1  |       | 2      |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor  | Prob. | Valor  | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 9,6%   | 33,3% | 12,7%  | 33,3% | 8,9%  | 33,3% | 9,2%  | 33,3% |
| B      | -0,4%  | 33,3% | 1,0%   | 33,3% | -1,5% | 33,3% | -1,4% | 33,3% |
| C      | -7,4%  | 33,3% | -10,3% | 33,3% | -9,7% | 33,3% | -9,1% | 33,3% |

Tabela 4.4 - Desvios no preço internacional de diesel para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização do preço internacional de diesel |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1  |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor  | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 6,2%   | 33,3% | 7,0%  | 33,3% | 8,6%  | 33,3% | 10,2% | 33,3% |
| B      | 0,2%   | 33,3% | 0,7%  | 33,3% | 1,5%  | 33,3% | 1,8%  | 33,3% |
| C      | -4,7%  | 33,3% | -4,5% | 33,3% | -4,8% | 33,3% | -4,1% | 33,3% |

Tabela 4.5 - Desvios no preço internacional de gasolina para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização do preço internacional de gasolina |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1  |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor  | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 13,0%  | 33,3% | 14,8% | 33,3% | 14,9% | 33,3% | 14,6% | 33,3% |
| B      | 1,7%   | 33,3% | 0,7%  | 33,3% | 0,8%  | 33,3% | 0,8%  | 33,3% |
| C      | -6,7%  | 33,3% | -6,4% | 33,3% | -6,2% | 33,3% | -6,6% | 33,3% |

Tabela 4.6 - Desvios no preço internacional de óleo combustível para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização do preço internacional de OC |       |        |       |        |       |        |       |
|--------|--|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|
|        | 1  |       | 2      |       | 3      |       | 4      |       |
|        | Valor  | Prob. | Valor  | Prob. | Valor  | Prob. | Valor  | Prob. |
| A      | 7,5%   | 33,3% | 8,1%   | 33,3% | 7,7%   | 33,3% | 5,8%   | 33,3% |
| B      | -2,5%  | 33,3% | -4,0%  | 33,3% | -4,7%  | 33,3% | -5,2%  | 33,3% |
| C      | -11,8%   | 33,3% | -15,3% | 33,3% | -18,3% | 33,3% | -19,7% | 33,3% |

Tabela 4.7 - Desvios na disponibilidade da destilação para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização da disponibilidade da destilação |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1  |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor  | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 0,2%   | 33,3% | 0,0%  | 33,3% | 4,0%  | 33,3% | 3,8%  | 33,3% |
| B      | -1,8%  | 33,3% | -2,3% | 33,3% | 0,6%  | 33,3% | 1,3%  | 33,3% |
| C      | -4,3%  | 33,3% | -5,3% | 33,3% | -2,3% | 33,3% | -2,7% | 33,3% |



Tabela 4.8 - Desvios na disponibilidade do FCC para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização da disponibilidade do FCC |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1   |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor   | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 1,3%  | 33,3% | 0,6%  | 33,3% | 4,0%  | 33,3% | 5,9%  | 33,3% |
| B      | -2,6%   | 33,3% | -3,9% | 33,3% | 0,1%  | 33,3% | 0,4%  | 33,3% |
| C      | -7,0%   | 33,3% | -7,8% | 33,3% | -4,6% | 33,3% | -5,1% | 33,3% |

Tabela 4.9 - Desvios na disponibilidade do coque para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização da disponibilidade do coque |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1   |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor   | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 5,6%  | 33,3% | 5,3%  | 33,3% | 8,8%  | 33,3% | 8,7%  | 33,3% |
| B      | 0,6%  | 33,3% | -0,4% | 33,3% | 2,3%  | 33,3% | 2,5%  | 33,3% |
| C      | -5,1%   | 33,3% | -8,6% | 33,3% | -5,8% | 33,3% | -7,3% | 33,3% |

Tabela 4.10 - Desvios na disponibilidade das unidades de tratamento para cada período que antecede sua realização

| Classe | Nº de meses antes da realização da disponibilidade do HDT e HDS |       |       |       |       |       |       |       |
|--------|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|        | 1   |       | 2     |       | 3     |       | 4     |       |
|        | Valor   | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. | Valor | Prob. |
| A      | 11,9%   | 33,3% | 8,8%  | 33,3% | 8,5%  | 33,3% | 8,5%  | 33,3% |
| B      | 3,1%  | 33,3% | 1,1%  | 33,3% | 2,8%  | 33,3% | 2,2%  | 33,3% |
| C      | -6,2%   | 33,3% | -9,0% | 33,3% | -6,9% | 33,3% | -8,2% | 33,3% |

Devido à existência de três possíveis realizações para cada parâmetro incerto e à existência de quatro períodos, decorrem 81 diferentes cenários resultantes de todas as possíveis combinações de realizações do parâmetro incerto, os quais podem ser representados pela árvore de cenários apresentada na Ilustração 4.1.

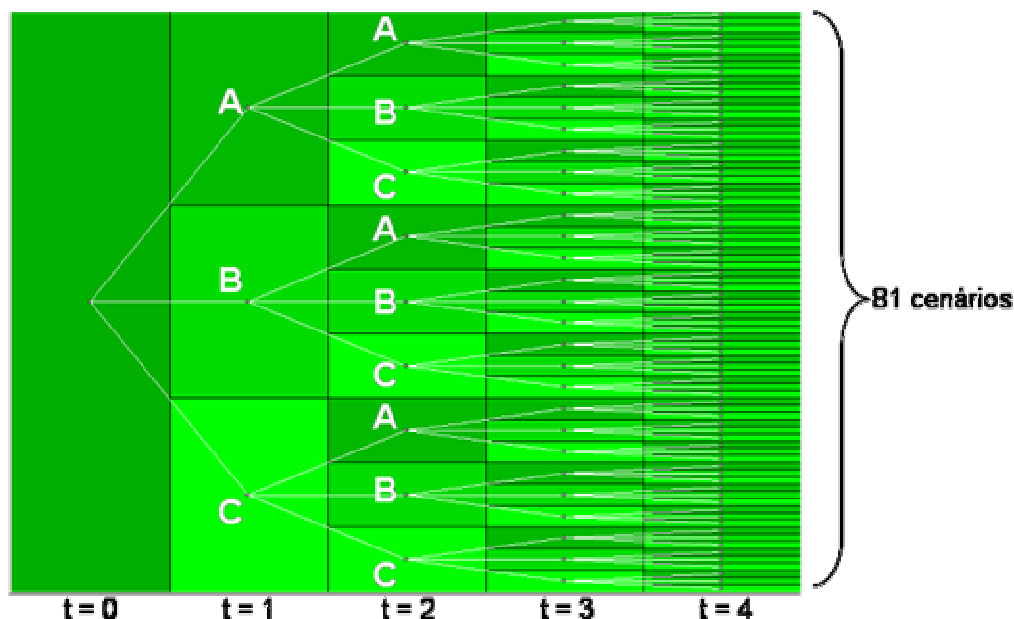


Ilustração 4.1- Árvore de possíveis cenários de realização para cada parâmetro incerto

Na árvore acima, o período  $t = 0$  corresponde ao momento atual, em que não se têm incertezas quanto a parâmetro algum. Um mês à frente ( $t = 1$ ), três possíveis valores poderão acontecer. Dois meses à frente ( $t = 2$ ) este número sobe para nove, já que para cada um dos três possíveis valores de realização no primeiro mês, novos três valores poderão acontecer no segundo mês. Pode-se perceber o crescimento exponencial na quantidade de possíveis cenários<sup>11</sup> conforme aumenta o número de períodos. A quantidade de cenários segue a fórmula abaixo:

$$\text{N}^\circ \text{ cenários} = (\text{N}^\circ \text{ de possíveis realizações})^{(\text{N}^\circ \text{ parâmetros incertos})^{(\text{N}^\circ \text{ de períodos})}}$$

A partir desta fórmula pode-se chegar aos 81 cenários mostrados acima, ou seja,  $\text{N}^\circ \text{ cenários} = (3)^{(1)^{(4)}} = 81$ .

#### **4.2.2. Construção dos modelos estocásticos**

Conforme mencionado no capítulo 2, neste trabalho foi utilizado o programa XPRESS-SP para a construção e otimização dos modelos estocásticos, o que se dá através de um procedimento seqüencial.

Primeiramente (após definidos os conjuntos, parâmetros, variáveis de decisão e variáveis aleatórias) são atribuídas as variáveis de decisão e as variáveis aleatórias aos estágios. Vale destacar que, apesar de os estágios não necessariamente terem que acompanhar a divisão temporal do problema, neste trabalho foi considerado que eles acompanham.

Em seguida define-se o tipo de árvore de cenários a ser criada (extensa, simétrica ou explícita)<sup>12</sup>.

Na próxima etapa define-se a distribuição de probabilidades discreta de cada variável aleatória (VA), atribuindo-se a cada nó da árvore o valor da VA e a respectiva probabilidade de ocorrência (ver seção anterior).

Finalmente, um comando ordena a geração da árvore de cenários.

---

<sup>11</sup> Cada galho desta árvore corresponde a um cenário, ou seja, um cenário é uma combinação de realizações (uma por período) do parâmetro incerto.

<sup>12</sup> Neste trabalho foram criadas árvores simétricas.

A seqüência seguinte de entradas no XPRESS-SP é idêntica ao caso determinístico, definindo-se as restrições e função objetivo do problema, com a diferença que no caso estocástico alguns parâmetros foram definidos como variável aleatória.

Uma vez inseridas as informações no XPRESS-SP, chama-se a rotina de otimização (maximização ou minimização) para a geração automática do problema estocástico. Internamente, o problema estocástico é transformado em um problema determinístico extenso, da mesma forma como mostrado nas seções 2.2.2.1 e 2.2.2.2.

### **4.2.3. Considerações sobre os modelos estocásticos**

Em todos os modelos estocásticos utilizados neste trabalho considerou-se como variáveis de primeiro estágio (ou variáveis associadas ao estágio anterior à realização do parâmetro incerto, no caso dos modelos multi estágios) apenas aquelas associadas às importações (de petróleo e derivados). Dado que o período de tempo entre a colocação do pedido e recebimento dos produtos pode ser grande, muitas vezes não sendo possível receber o produto no mesmo mês em que foi feito o pedido, foi considerado que as decisões de importação dos produtos deveriam ser realizadas antes mesmo de se conhecer a real disponibilidade das unidades operacionais, demanda e preço dos produtos. Todas as outras decisões (estoques, carga das unidades, degradações, exportações, etc.) foram consideradas como possíveis de serem tomadas no mesmo mês em que a incerteza deixa de existir, servindo para corrigir as decisões de importação tomadas *a priori*. Inclusive a decisão quanto à importação extra de produto (daí, neste caso, exigindo a utilização de modais mais rápidos e aceitando-se pagar preços mais altos pela urgência da compra) foi considerada também como possível alternativa de correção para as decisões tomadas no estágio anterior.

Foram desenvolvidos para este trabalho onze modelos estocásticos sendo dez multi estágios (5 estágios) e um de dois estágios. Os estágios foram diretamente associados aos períodos, sendo o primeiro estágio correspondente ao período  $t = 0$ , o segundo ao período  $t = 1$  e assim por diante até o quinto estágio, associado ao período  $t = 4$ .

Nos dez modelos de cinco estágios trabalhou-se com apenas um parâmetro aleatório de cada vez, o que significou 81 ( $3^{14}$ ) possíveis cenários a serem

considerados na otimização. No único modelo de dois estágios, optou-se por reduzir o número de períodos para possibilitar trabalhar com um maior número de parâmetros aleatórios simultaneamente. Neste caso, foram considerados sete parâmetros aleatórios e o número de cenários a serem levados em conta aumentou para  $3^7 = 2187$ . Vale destacar que em todos os casos, considerou-se independência entre os cenários.

A tabela abaixo apresenta, para cada caso (modelo estocástico) em que incertezas são levadas em consideração, a descrição do(s) parâmetro(s) incerto(s). Para um dado caso, todos os outros parâmetros não citados abaixo continuam sendo considerados determinísticos.

**Tabela 4.11 – Descrição dos parâmetros incertos associados a cada modelo estocástico**

| <b>Caso</b> | <b>Descrição do(s) parâmetro(s) incerto(s)</b>   |
|-------------|--|
| DEM_DSL     | Volume de DSL500 e DSL2000 demandado no mercado interno.   |
| DEM_GSL     | Volume de gasolina demandado no mercado interno.   |
| DEM_OC      | Volume de OC1% e OC3% demandado no mercado interno.  |
| PRC_DSL     | Custo de importação de DSL500 e DSL200 em todos os locais com oferta do produto.   |
| PRC_GSL     | Preço de exportação de Gas.Exp. para todos os locais com demanda do produto.   |
| PRC_OC      | Preço de exportação de OC1% e OC3% para todos os locais com demanda do produto.  |
| UNI_HDT_HDS | Volume máximo de processamento das unidades de HDT e HDS.  |
| UNI_FCC     | Volume máximo de processamento da unidade de FCC.  |
| UNI_Coque   | Volume máximo de processamento da unidade de coque.  |
| UNI_DEST    | Volume máximo de processamento da unidade de destilação.   |
| VA = 7      | Volume de diesel (DSL500 e DSL2000) e óleo combustível (OC1% e OC3%) demandado no mercado interno; Custo de importação de diesel (DSL500 e DSL200) em todos os locais com oferta do produto; Preço de exportação de óleo combustível (OC1% e OC3%) para todos os locais com demanda do produto; Volume máximo de processamento das unidades de tratamento (HDT e HDS), de destilação e de coque. |

Doravante, as referências aos modelos estocásticos serão feitas de acordo com o nome mostrado na coluna “caso” da tabela acima. Vale destacar que, nos casos em que os parâmetros incertos estão associados a mais de um produto ou unidade, foi considerado que o produto ou unidade em questão possuem a mesma distribuição de probabilidades, de modo que para o modelo conta-se como um único parâmetro aleatório.

## 5. Resultados

Conforme já mencionado anteriormente, o objetivo principal deste trabalho é a incorporação de incertezas ao Plano de Abastecimento. Para isso, partiu-se de um modelo base determinístico e, utilizando-se programação estocástica, alguns parâmetros que antes assumiam um único valor, passaram a assumir três diferentes valores, cada um com 1/3 de chance de ocorrência. Nesta seção serão, então, analisados alguns impactos ocasionados por incertezas associadas aos parâmetros incertos demanda, preço e disponibilidade de unidades, ressaltando as diferenças com relação às indicações apresentadas no modelo determinístico.

Com o intuito de se comparar as soluções encontradas em cada caso estocástico e no caso determinístico foram escolhidas quatro informações para serem analisadas: nível percentual de utilização das unidades de processo e tratamento, indicação de formação de estoques e comercialização dos principais derivados, e resultado econômico. Vale destacar que nem todas essas informações são variáveis de decisão do modelo, mas foram calculadas a partir das soluções atribuídas às variáveis de decisão após as otimizações.

Para a análise dos impactos nos estoques e comercializações, foram escolhidos os produtos diesel, gasolina e óleo combustível. Novamente, a escolha de se analisar o diesel está relacionada ao seu elevado preço no mercado internacional e também elevado volume consumido no mercado interno, tendo forte peso, então, na solução. Já a gasolina e óleo combustível, apesar de um menor preço, têm também significativo impacto na solução pelo alto volume de produção, visto que grande parte do petróleo nacional disponível é pesado, ou seja, apresenta expressivos rendimentos destes produtos.

Vale destacar que, deste ponto em diante, “diesel” corresponde à soma dos produtos DSL500 e DSL2000 e “óleo combustível”, à soma dos produtos OC1% e OC3%.

Em um modelo determinístico, a solução encontrada é a ótima para aquele determinado cenário, entretanto não é possível saber se tal solução permanecerá válida caso haja uma variação em algum parâmetro. Já em um modelo estocástico, as incertezas são representadas em diversos possíveis cenários de realização para os parâmetros incertos e a otimização é feita levando-se em conta a chance de ocorrência

de cada um desses cenários. A solução obtida é a melhor dada todas as possíveis ocorrências. O grande ganho em se trabalhar com um modelo estocástico ao invés do determinístico é, então, a obtenção de soluções mais robustas.

Para cada variável de decisão em um dado período existirá tantas soluções quantas forem a quantidade de cenários, já que para se resolver o problema estocástico devem ser considerados todos os possíveis cenários de realização da variável aleatória. Por exemplo, a solução do modelo em que se considerou apenas a incerteza quanto à demanda de diesel apresenta 81 indicações de volume a ser importado de petróleo em cada período, cada uma correspondendo a um possível cenário de realização da demanda de diesel.

Se por um lado a solução de um modelo em que se consideram várias possíveis realizações para um dado parâmetro incerto é mais robusta, por outro se torna mais difícil a tomada de decisão. Quando se tem apenas uma solução (modelo determinístico), não se tem dúvidas quanto ao que fazer. Quando ao invés de uma se tem 81 soluções, a decisão a ser tomada não é trivial. Mesmo assim é possível se identificar algumas soluções robustas (que se verificam em grande parte dos cenários) a serem tomadas. Por exemplo, considerando-se apenas a incerteza quanto à demanda de diesel, em 78 dos 84 possíveis cenários, a indicação de importação de diesel é maior ou igual a 450 mil m<sup>3</sup>/mês. Ou seja, existe cerca de 93% de chance da indicação de importação de diesel não ser menor que este volume, uma informação bastante robusta quanto ao mínimo a ser importado de diesel e que tem grande valor para quem terá que tomar a decisão quanto à importação.

Uma vez que a otimização leva em conta diversos cenários, é bastante útil poder analisar as soluções atribuídas às variáveis de decisão de cada um desses cenários e, através de análise estatística, estimar um valor robusto para cada variável. Saber que dadas as possíveis variações na demanda de diesel, as indicações de importação desse derivado supera na maior parte dos casos 450 mil m<sup>3</sup>/mês permite se pensar em firmar um contrato de suprimento desse volume a um preço mais baixo do que o conseguido no mercado *spot*, por exemplo.

Para auxiliar a análise das diversas soluções, associadas aos possíveis cenários de realização do coeficiente incerto, foram construídos gráficos com a curva de probabilidade acumulada para cada uma das quatro informações escolhidas para serem analisadas, permitindo-se assim verificar o espectro de variação das soluções bem como

estimar a probabilidade da solução indicada ficar abaixo ou acima de determinado valor, e assim, verificar a robustez da indicação.

Antes de se passar para a análise dos impactos das incertezas será mostrado, na seção seguinte, os resultados obtidos no cenário determinístico, que servirá de base de comparação para os cenários estocásticos.

## 5.1. Resultados do cenário determinístico

A fim de se poder comparar os resultados, são mostrados na Tabela 5.1 a seguir, para o caso determinístico, as mesmas quatro informações que foram escolhidas para serem comparadas com os modelos estocásticos: nível percentual de utilização das unidades de processo e tratamento, indicação de formação de estoques e comercialização de diesel, gasolina e óleo combustível, e sumário econômico.

**Tabela 5.1 – Resumo dos resultados do cenário determinístico**

| Informações Analisadas       |   | Cenário Determinístico |
|------------------------------|---|------------------------|
| Utilização de Unidades (%)   | Destilação                                | 95,0%                  |
|                              | FCC                                       | 100,0%                 |
|                              | Desasfaltação                             | 100,0%                 |
|                              | Coque                                     | 100,0%                 |
|                              | HDS                                       | 96,2%                  |
|                              | HDT                                       | 100,0%                 |
| Estoques (mil m3/mês)        | Diesel                                    | 0,0                    |
|                              | Gasolina                                  | 29,5                   |
|                              | OC + Bunker                               | 0,0                    |
| Comercialização (mil m3/mês) | Imp. Diesel                               | 417,3                  |
|                              | Exp. Gasolina                             | 373,8                  |
|                              | Exp. OC + Bunker                          | 601,0                  |
| Sumário Econômico            | Resultado Econômico (Milhões US\$/mês)    | 5.684,3                |
|                              | Balanço Operações Externas (Mil US\$/mês) | 279.157,9              |

## 5.2. Impactos de incertezas no nível de utilização das unidades

O nível percentual de utilização das unidades de processo é um indicador bastante utilizado nas indústrias e, dentre outros, é diretamente impactado por incertezas relacionadas à demanda e preço dos produtos e por incertezas quanto à confiabilidade de operação de outras unidades de processo, tanto à montante quanto à jusante no processo produtivo.

O nível percentual de utilização apresentado nos gráficos, nas seções seguintes, foi calculado para cada unidade dividindo-se a carga total (somando-se todos os produtos e campanhas) indicada para aquela unidade pela carga de referência (capacidade máxima). Para os casos em que a disponibilidade das unidades é incerta, a capacidade máxima varia de acordo com o cenário. Caso contrário é constante.

Nas próximas seções serão apresentados os impactos nas indicações de utilização de cada uma dos seis tipos de unidades de processo, ocasionados, respectivamente, por incertezas quanto à demanda de produtos, preço de produtos e disponibilidade de unidades.

### 5.2.1. Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos

Nos gráficos a seguir são mostradas, para cada caso<sup>13</sup> de incerteza na demanda, curvas de probabilidade acumulada para o nível indicado de utilização da unidade de processo em questão, ou seja, é mostrada a probabilidade da indicação de utilização de uma determinada unidade ficar abaixo de um dado valor.

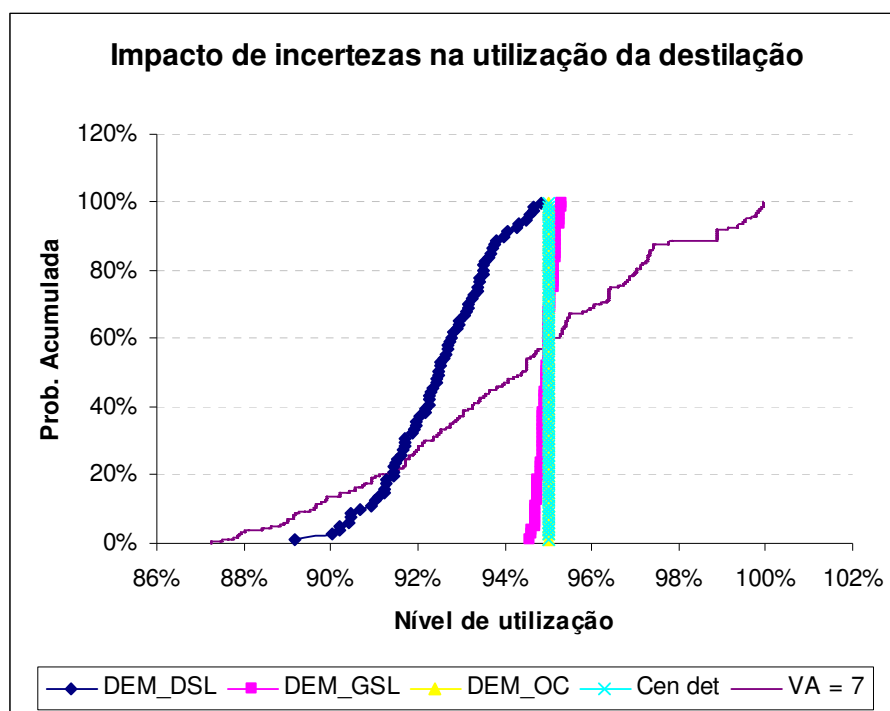


Gráfico 5.1 – Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de destilação

<sup>13</sup> Ver na seção 4.2.3 os diferentes casos considerados.



De acordo com o Gráfico 5.1 acima, tanto a incerteza quanto à demanda de gasolina (DEM\_GSL) quanto à demanda de óleo combustível (DEM\_OC) causam pequeno impacto na indicação de utilização de destilação. Em ambos os casos a faixa de variação da indicação de utilização da destilação é bastante estreita, com uma média bem próxima dos 95% indicado no cenário determinístico. Como tanto a gasolina quanto o óleo combustível são produtos superavitários no sistema e a diferença de preço entre as frentes demandantes de cada produto não é grande, a variação na demanda destes produtos é amortecida pelas exportações. Quando a demanda diminui, a exportação aumenta, e vice-versa. O impacto na destilação seria maior caso não houvesse frente de venda disponível ou se os preços oferecidos pelos produtos fossem muito baixos, a ponto de ser mais interessante economicamente reduzir carga na destilação do que exportar o produto a um preço aviltado.

Já quando a incerteza é quanto à demanda de diesel, a indicação de carga na destilação varia entre 89,2% (para o cenário com a menor demanda) e 94,8% (para o cenário com a maior demanda), com uma indicação bastante robusta (99% de chance) de superar os 90% de utilização. Mesmo no cenário mais otimista quanto à demanda de diesel, quando a demanda é cerca de 4,6% acima da considerada no cenário determinístico, o nível de utilização da destilação fica abaixo dos 95% indicado no cenário determinístico. Ocorre que no cenário determinístico, em que se sabe com 100% de certeza qual será a demanda e todos os parâmetros são conhecidos, fica fácil encontrar a indicação ótima de importação, a mais econômica.

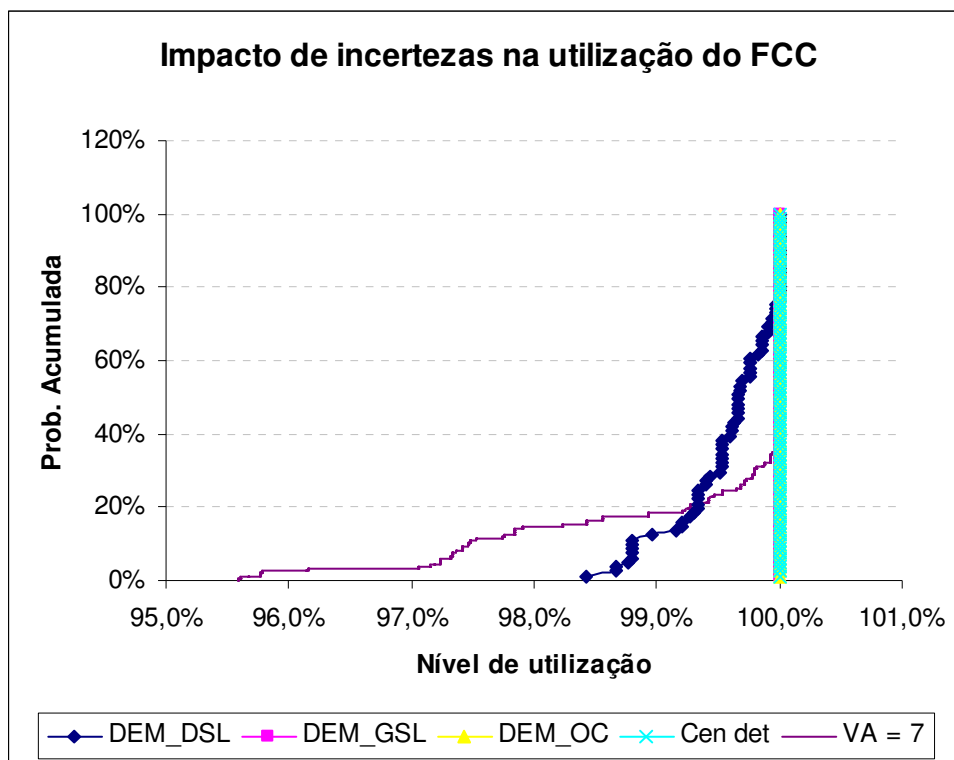
No cenário estocástico, visto que existe uma incerteza quanto à demanda, não existe uma solução que seja ótima para todos os três possíveis cenários de realização da demanda. No entanto, os custos em contornar uma decisão de compra excessiva (que corresponde a reduzir produção e/ou fazer estoque) são mais baixos que o custo de contornar uma compra abaixo do necessário (que corresponde a uma importação extra muito cara). Sendo assim, a solução que minimiza a soma dos custos esperados aponta para uma importação maior de diesel do que no cenário determinístico. A importação maior de diesel leva a uma menor necessidade de utilização da unidade de destilação, que passa a operar em um nível mais baixo do que no cenário determinístico. Poderíamos pensar em, ao invés de aumentar a importação de diesel, aumentar a carga na destilação, principalmente processando um maior volume de petróleo leve, que tem maior rendimento em diesel. No entanto, visto que todo o volume ofertado do petróleo

com o maior rendimento em diesel já foi comprado e o segundo petróleo com maior rendimento rende cerca de 36% do derivado, seria preciso processar deste petróleo um volume cerca de três vezes maior do que o volume requerido de diesel, o que significaria uma solução mais custosa. Além disso, essa solução levaria à necessidade de se estocar e ou vender, a preços depreciados, os outros derivados produzidos além da necessidade, o que também contribui para encarecer a solução.

A título de comparação, também foi plotado no mesmo gráfico a curva de probabilidade acumulada para o caso em que se consideram não apenas incertezas quanto à demanda de diesel, mas também quando outros seis parâmetros são considerados incertos<sup>14</sup> (VA = 7). Com um maior número de incertezas consideradas, aumenta a faixa de variação da utilização da destilação, que passa a ser de 87,2% a 100%. Os principais fatores influenciadores nesta faixa mais ampla é a demanda de diesel e a disponibilidade de unidade de coque. O nível mais baixo de utilização (87,2%) ocorre no cenário com a menor demanda de diesel (5% abaixo do cenário determinístico) e disponibilidade de coque equivalente ao cenário determinístico, ao passo que a indicação de 100% de utilização de destilação acontece quando a demanda de diesel é 3% maior e a disponibilidade de coque, 6% maior que no cenário determinístico. Enquanto existia uma probabilidade de 99% da utilização de destilação superar os 90% quando apenas a demanda de diesel era incerta, ao se considerar as outras seis incertezas essa probabilidade cai para 86%.

---

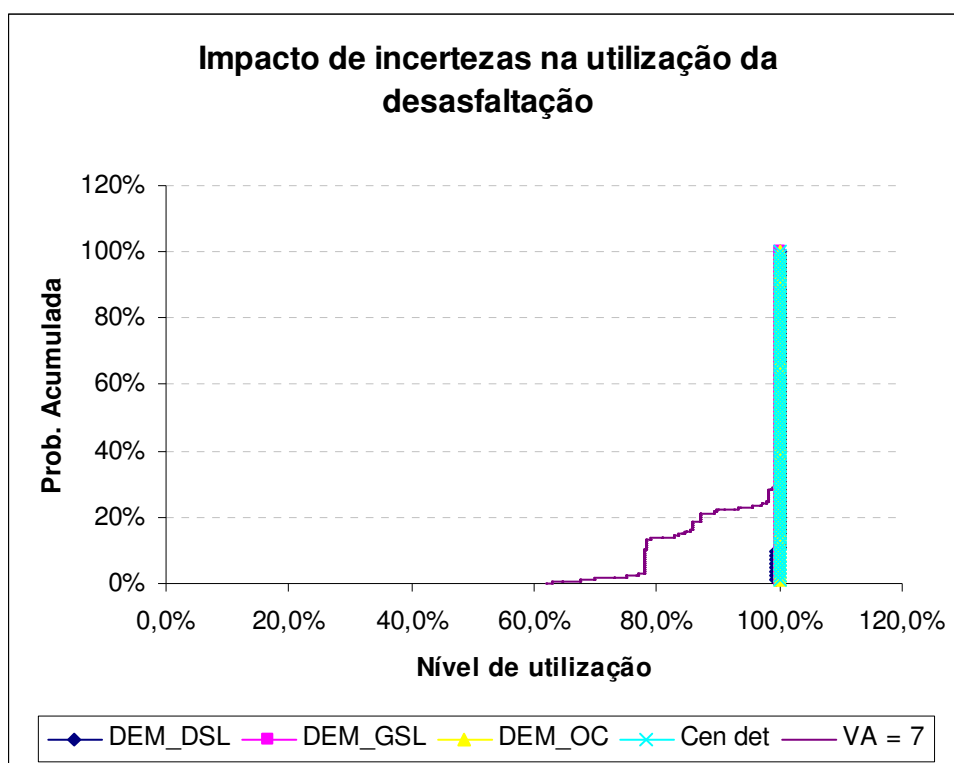
<sup>14</sup> Ver este caso em detalhe na seção 4.2.3.



**Gráfico 5.2 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de FCC**

A indicação de utilização da unidade de FCC é menos sensível às incertezas consideradas que a destilação, conforme pode ser percebido, no Gráfico 5.2 acima, pela faixa de variação mais estreita. Da mesma forma como na primeira ilustração, as incertezas quanto à demanda de óleo combustível e gasolina são as que menos impacto causam, apontando em ambos os casos a utilização plena (100%) da unidade em todos os cenários de realização da demanda considerados.

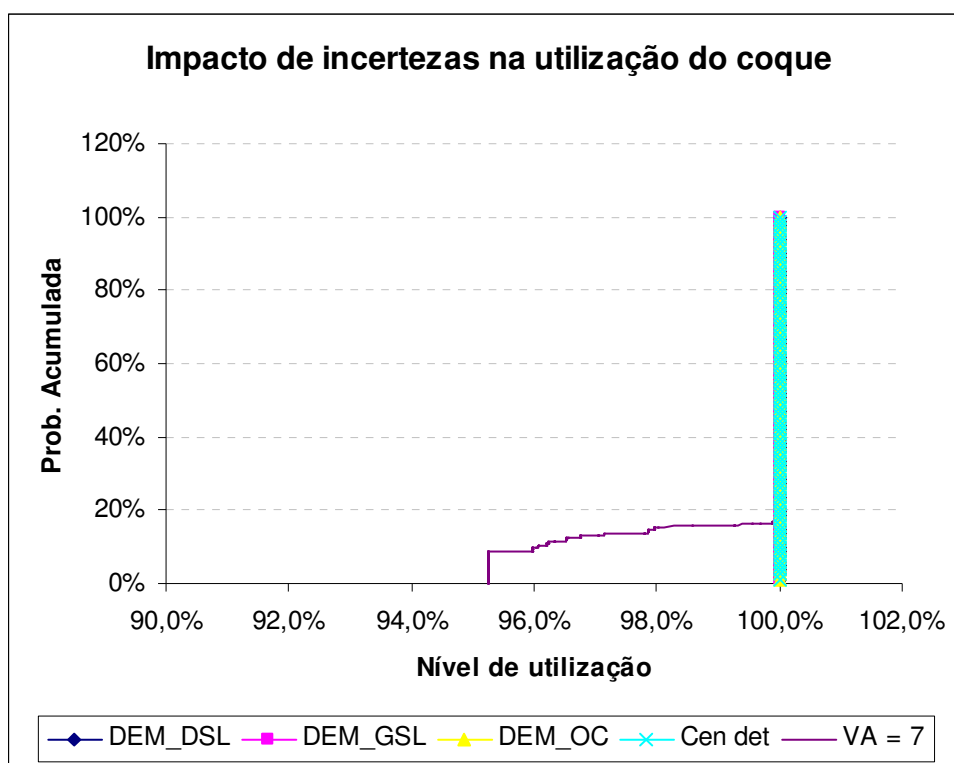
Já para os casos em que há incertezas na demanda de diesel (DEM\_DSL) e também em outros seis parâmetros ( $VA = 7$ ), a indicação de utilização de FCC varia um pouco. Como a carga utilizada no FCC é um dos produtos da destilação, o nível de utilização da primeira é diretamente impactado pela ociosidade da segunda unidade. Ainda assim, o nível indicado de utilização de FCC é bastante alto, superando o índice de 97% em cerca de 96% dos cenários considerando o caso com o maior número de incertezas.



**Gráfico 5.3 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de desasfaltação**

Em todos os três casos em que as incertezas relacionadas à demanda foram consideradas individualmente, a indicação para a desasfaltação foi de carga máxima, da mesma forma que no cenário determinístico. Já ao se considerar sete coeficientes incertos, o Gráfico 5.3 mostra que o nível de utilização varia entre 62% e 100%, ficando em mais de 15% dos cenários abaixo de 85% de utilização. Como tanto o coque quanto a desasfaltação são unidades processadoras de resíduo e o apelo econômico do coque é maior que o da desasfaltação por gerar produtos de maior valor agregado<sup>15</sup>, em cenários em que a disponibilidade de carga do coque aumenta, ele acaba “roubando” carga da desasfaltação. Aliado a isso, outro fator que leva a desasfaltação ao menor nível de utilização é o maior preço de óleo combustível no mercado externo, que é, no cenário mais pessimista para esta unidade, cerca de 7% maior que no cenário determinístico.

<sup>15</sup> Enquanto os produtos da desasfaltação são incorporados ao pool de produtos de baixo valor como óleo combustível e asfalto, cerca de 45% dos produtos do coque, após ser tratado, pode ser incorporado ao diesel (produto de alto valor agregado) e cerca de 30% é carga de unidade de FCC, grande produtora de gasolina.



**Gráfico 5.4 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de coque**

A unidade de coque, associada às unidades de tratamento, é a de maior rentabilidade, por processar resíduo e produzir produtos de alto valor agregado, como o diesel. A indicação de utilização desta unidade é, portanto, máxima na grande maioria dos casos, conforme o Gráfico 5.4. A indicação de não saturação ocorre em cenários em que se combinam elevação da demanda interna de óleo combustível, valorização do óleo combustível frente ao petróleo e a outros derivados médios e leves, e redução na disponibilidade de unidades de tratamento. Como a carga da unidade de coque também é utilizada para a produção de óleo combustível, cenários favoráveis ao óleo combustível podem impactar a carga do coque. Também a disponibilidade menor de unidades de tratamento tendem a reduzir o apelo econômico da unidade de coque, já que reduz a capacidade de se tratar correntes desta unidade para se incorporar ao pool de diesel, o grande impulsionador da rentabilidade da unidade de coque.

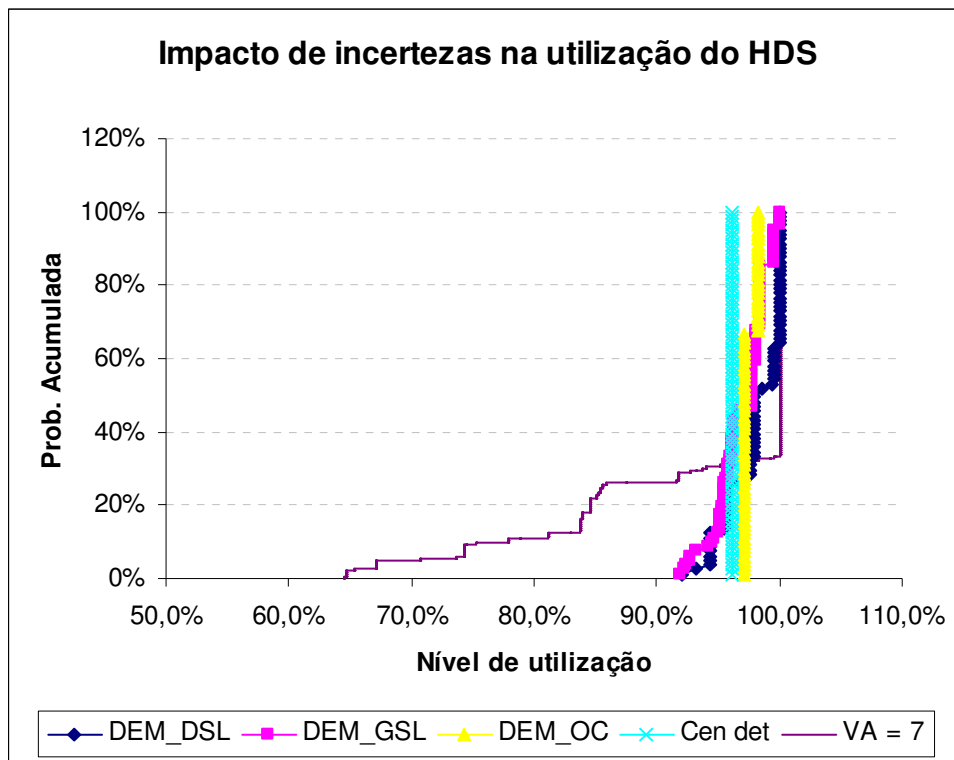


Gráfico 5.5 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de HDS

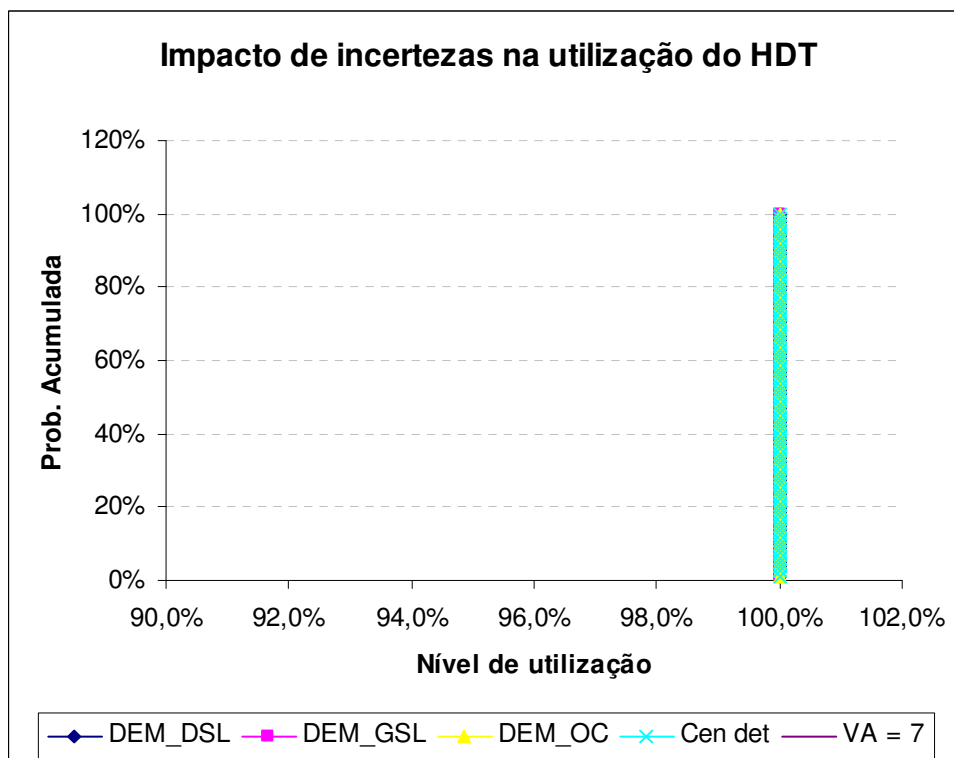


Gráfico 5.6 - Impacto de incertezas de demanda no nível indicado de utilização de HDT

Nos gráficos 5.5 e 5.6 são mostrados os impactos das incertezas nas unidades de tratamento – HDS e HDT. Comparando-se as duas unidades, o HDT admite um maior

volume de produtos instáveis (GOLK e LCO) e possui um maior índice de remoção de enxofre que o HDS. O uso alternativo para os produtos instáveis consiste na incorporação ao pool de óleo combustível, ou seja, um uso pouco interessante economicamente se comparada à possibilidade de ser tratado e incorporado ao diesel. Daí a grande importância das unidades de tratamento, em especial o HDT. Também o fato de remover uma maior quantidade de enxofre, permitindo a mistura de correntes de elevado teor de enxofre que seriam alternativamente usadas como diluentes de óleo combustível garante ao HDT uma maior importância se comparado ao HDS. Conforme esperado, então, tem-se a indicação de saturação do HDT em 100% dos cenários considerados. Independentemente da incerteza, a indicação de saturação do HDT é bastante robusta.

Já a indicação de utilização do HDS varia dependendo da incerteza considerada. Para o caso em que a demanda de óleo combustível é incerta, a variação da indicação de utilização da unidade é bem pequena, entre 97% e 98%, maior que os 96% indicados no cenário determinístico. Quando se considera como incerta a demanda de gasolina ou de diesel, esta faixa se amplia um pouco mais, ficando entre 92% e 100%. Os extremos destas faixas coincidem com os cenários também extremos (menor e maior respectivamente) de demanda dos produtos e de carga nas destilações. Sendo assim, conforme aumenta a demanda pelos produtos, aumenta-se a indicação de utilização de destilação, aumentando-se conseqüentemente o volume de produto a ser tratado e, assim, resultando em uma maior indicação de utilização do HDS.

Já ao se considerar as sete incertezas, a amplitude da indicação de utilização cresce razoavelmente, passando para algo entre 65% e 100%. Aliados a menor disponibilidade de destilação, outros fatores que levam à indicação de utilização mais baixa de HDS são a menor disponibilidade de unidade de coque e menor demanda por diesel.

### **5.2.2. Impactos de incertezas quanto aos preços de produtos**

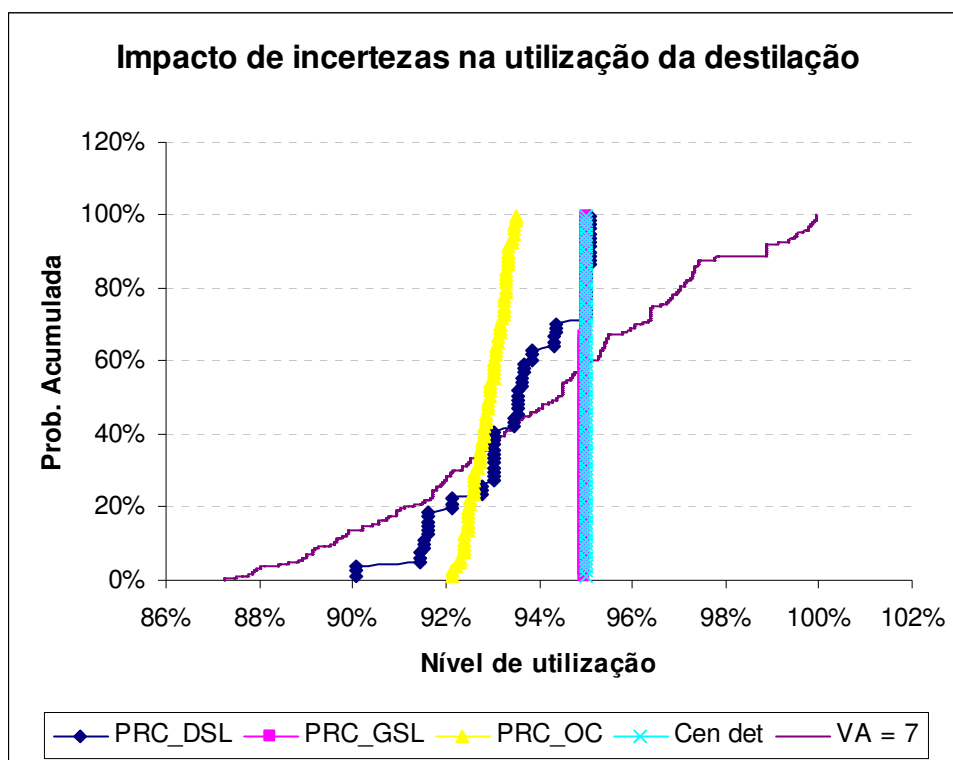
Nos gráficos a seguir são mostradas, para cada caso<sup>16</sup> de incerteza quanto aos preços dos produtos, curvas de probabilidade acumulada para o nível indicado de

---

<sup>16</sup> Ver na seção 4.2.3 os diferentes casos considerados.

utilização da unidade de processo em questão, ou seja, é mostrada a probabilidade da indicação de utilização de uma determinada unidade ficar abaixo de um dado valor.

Novamente, a título de comparação, são mostradas as curvas referentes ao cenário determinístico (Cen det) e ao cenário em que sete incertezas são consideradas simultaneamente (VA = 7). Para estes casos, as curvas nos gráficos abaixo são as mesmas mostradas anteriormente. Visto que já foram feitos comentários sobre estes casos, a seguir as explicações serão concentradas nas novas curvas.



**Gráfico 5.7- Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de destilação**

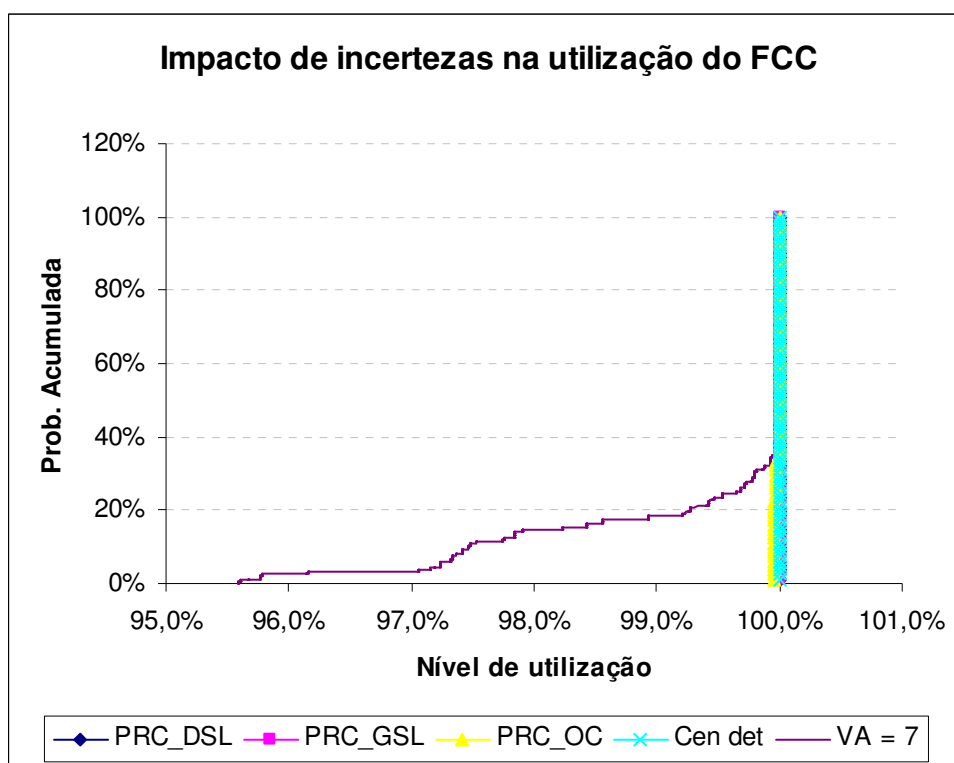
Da mesma forma como ocorrido quando se considerou incerteza na demanda, a incerteza quanto ao preço de exportação da gasolina causa pouco impacto na indicação de carga da destilação, permanecendo a indicação de cerca de 95% de utilização, parecido com o cenário determinístico.

Já a incerteza quanto ao preço de óleo combustível causa mais impacto na destilação que a variação em sua demanda. O Gráfico 5.7 mostra que a faixa de variação para a utilização da destilação que variava em torno de 95% quando a incerteza era na demanda, agora varia entre 92% e 94% com a incerteza quanto ao preço. O nível mais baixo de utilização de destilação (92%) está associado ao cenário de menor preço enquanto que os 94% está associado ao caso de melhor preço. Mesmo neste caso, a



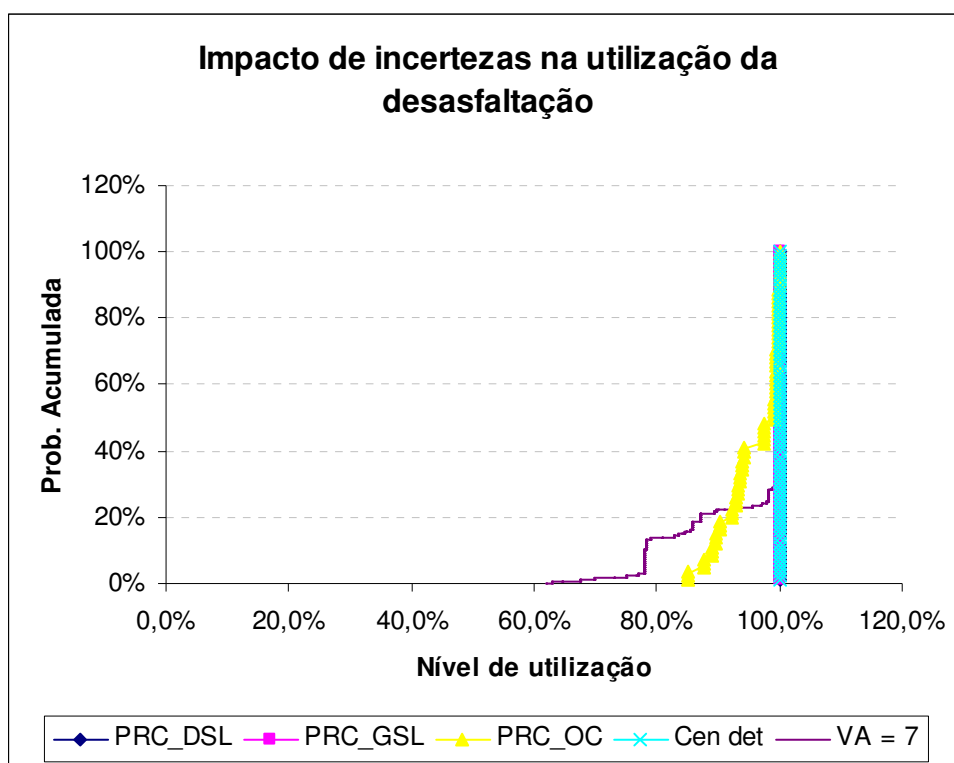
indicação de carga na unidade é mais baixa que os 95% indicados anteriormente. Ocorre que, com a valorização do óleo combustível no mercado externo, aumenta a atratividade econômica em se processar petróleos mais pesados, ricos em resíduos (matéria-prima para produção de óleo combustível). O maior processamento de petróleos pesados faz, então, com que unidades que consomem estes resíduos (FCC, desasfaltação e coque) atinjam sua carga ótima com uma menor utilização da destilação. Além disso, o aumento no preço do óleo combustível não é grande o suficiente para estimular uma produção muito maior do derivado, o que poderia puxar para cima a carga da destilação.

Já o efeito na destilação em virtude de incerteza quanto ao preço de diesel é parecido com o ocorrido quando a incerteza era na demanda. A faixa de variação de carga na destilação fica entre 90% e 95%. Da mesma forma como na seção anterior, a indicação de menor utilização da destilação está associada à maior importação de diesel. A importação de diesel aumenta conforme diminui o seu preço no mercado externo. No entanto, o preço do derivado é em cerca de 30% dos cenários mais baixos e em 70% mais altos que no cenário determinístico, já a indicação de importação de diesel é, em 70% dos cenários, maior que a importação no cenário determinístico, e em apenas cerca 30% dos cenários mais baixa. Ocorre que ao longo do tempo (ao longo dos quatro períodos considerados) o valor esperado do preço do diesel é crescente. Como a decisão de compra deve ser feita sempre com um período de antecedência, e espera-se que no período seguinte o preço seja maior, existe uma indicação de maior importação em um dado mês se comparado ao cenário determinístico, mesmo a um preço mais elevado, para formação de estoque para o período seguinte, diminuindo a necessidade de maior importação no futuro, quando o preço estará maior ainda. Essa maior importação afeta a carga da destilação.



**Gráfico 5.8 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de FCC**

O Gráfico 5.8 mostra que incertezas quanto ao preço da gasolina, óleo combustível e diesel têm pouco impacto na carga do FCC, que mantém indicação robusta de saturação. Visto que o FCC é um grande produtor de nafta craqueada (principal matéria-prima para a produção de gasolina), preços muito aviltados de gasolina tendem a impactar na economicidade de operação desta unidade. No entanto, as variações consideradas para baixo no preço da gasolina não foram suficientes para desestimular a operação da unidade. Da mesma forma, o aumento do preço também tem pequeno impacto, visto que o efeito esperado seria uma maior produção de gasolina para exportação, elevando-se a carga do FCC. Entretanto, a utilização da unidade já é máxima.



**Gráfico 5.9 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de desasfaltação**

O Gráfico 5.9 mostra que, com relação à utilização da unidade de desasfaltação, apenas a incerteza quanto ao preço de óleo combustível faz com que a indicação de utilização difira dos 100%. Um dos efeitos desta incerteza, já visto anteriormente, e que contribui diretamente para uma menor utilização da desasfaltação é a redução da utilização da destilação (unidade produtora de carga para a desasfaltação). Outro fator responsável são os preços mais elevados de óleo combustível no mercado externo, o que estimula uma maior produção deste derivado em detrimento da carga de unidades processadoras de resíduos. Como a rentabilidade da unidade de coque é maior que a da desasfaltação, o efeito de um menor volume disponível de resíduo é percebido apenas na utilização desta última unidade. Conforme mostrado no Gráfico 5.10, a indicação de utilização da unidade de coque não sofre nenhum abalo, consideradas individualmente as incertezas quanto ao preço do diesel, gasolina e óleo combustível, e assim permanece no nível máximo.

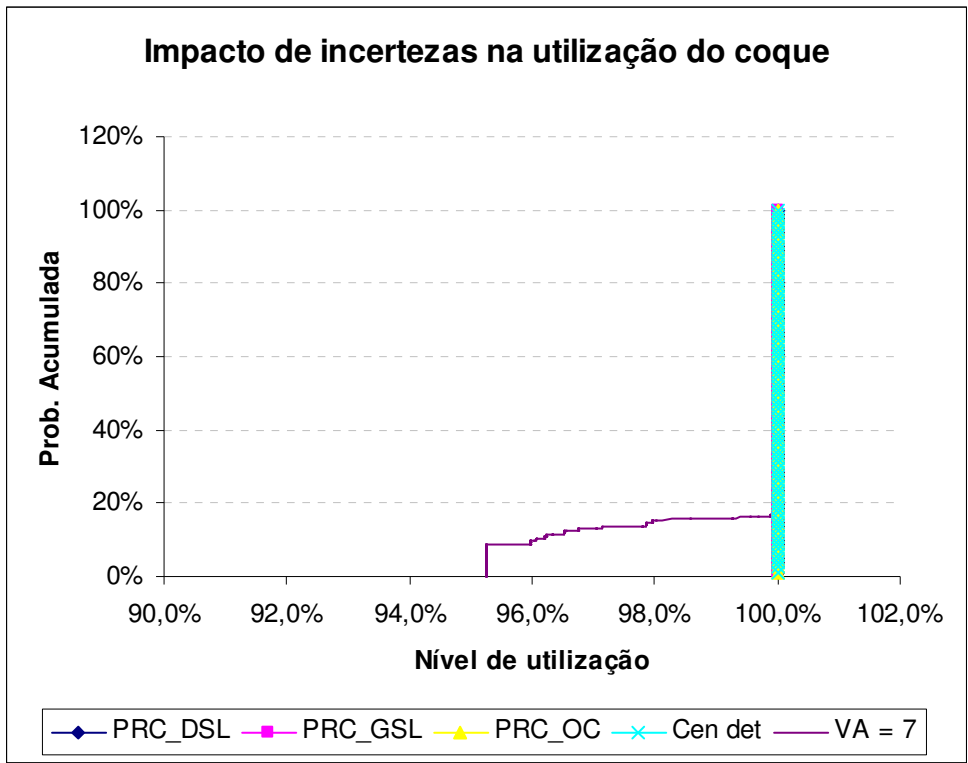


Gráfico 5.10 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de coque

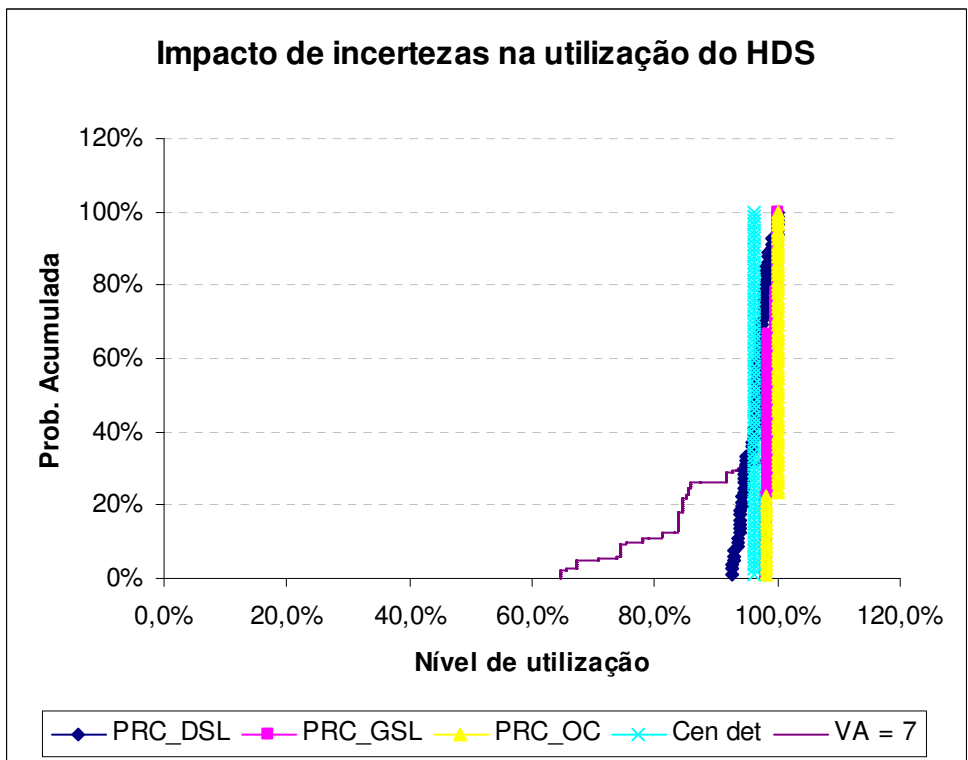
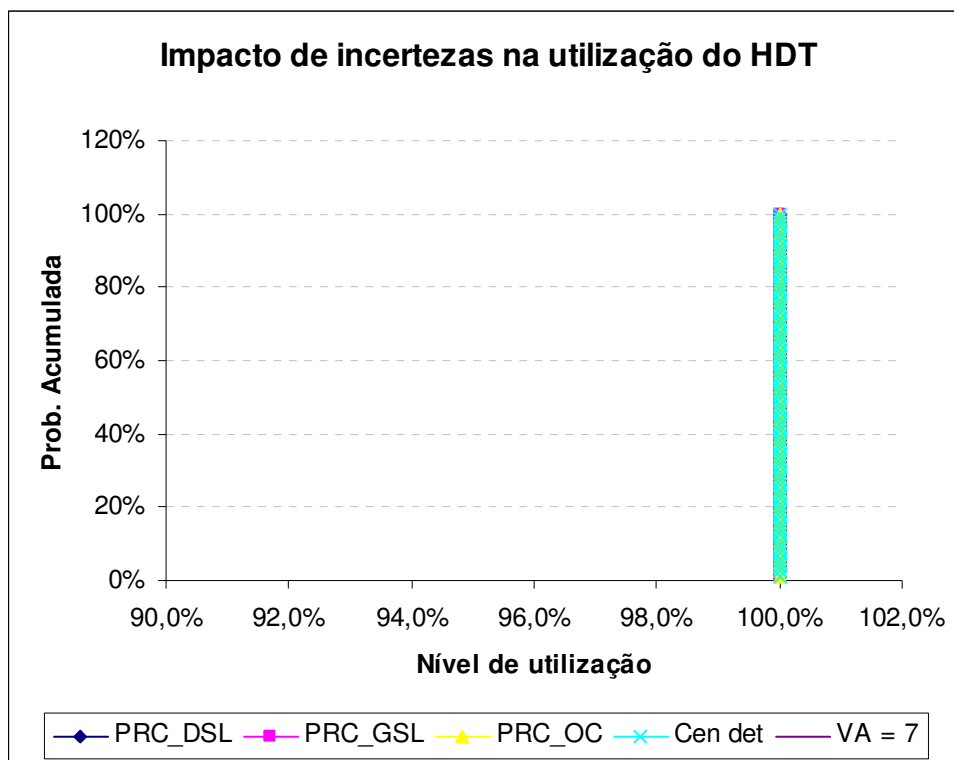


Gráfico 5.11 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de HDS



**Gráfico 5.12 - Impacto de incertezas quanto a preços na indicação de utilização de HDT**

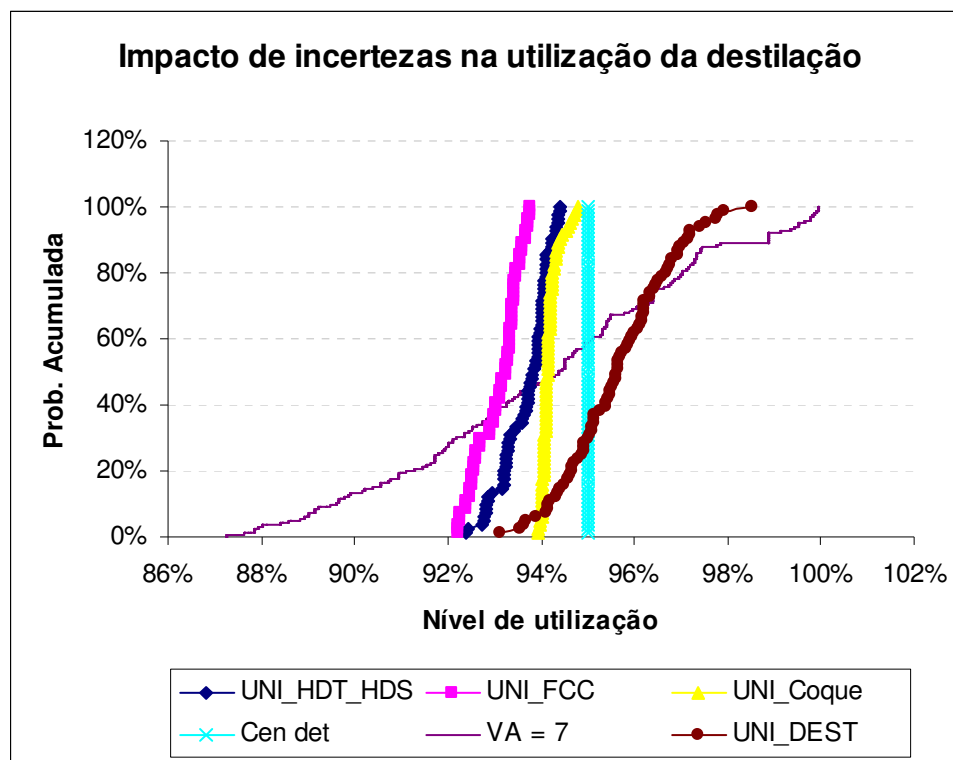
Conforme comentado anteriormente, das duas unidades de tratamento, a rentabilidade do HDT é superior à do HDS e o efeito disso pode ser visto nos gráficos 5.11 e 5.12. Enquanto o HDT se mantém sempre com indicação de saturação, independente da incerteza considerada, a indicação de carga no HDS sofre algumas oscilações. Incertezas quanto ao preço do diesel e do óleo combustível, são as principais responsáveis pela redução de carga no HDS, consequência da menor utilização da unidade de destilação.

### **5.2.3. Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades**

Da mesma forma como nas seções anteriores, os gráficos a seguir apresentam, para cada caso<sup>17</sup> de incerteza quanto à disponibilidade de unidades, curvas de probabilidade acumulada para o nível indicado de utilização da unidade de processo em questão, ou seja, é mostrada a probabilidade da indicação de utilização de uma determinada unidade ficar abaixo de um dado valor.

<sup>17</sup> Ver na seção 4.2.3 os diferentes casos considerados.

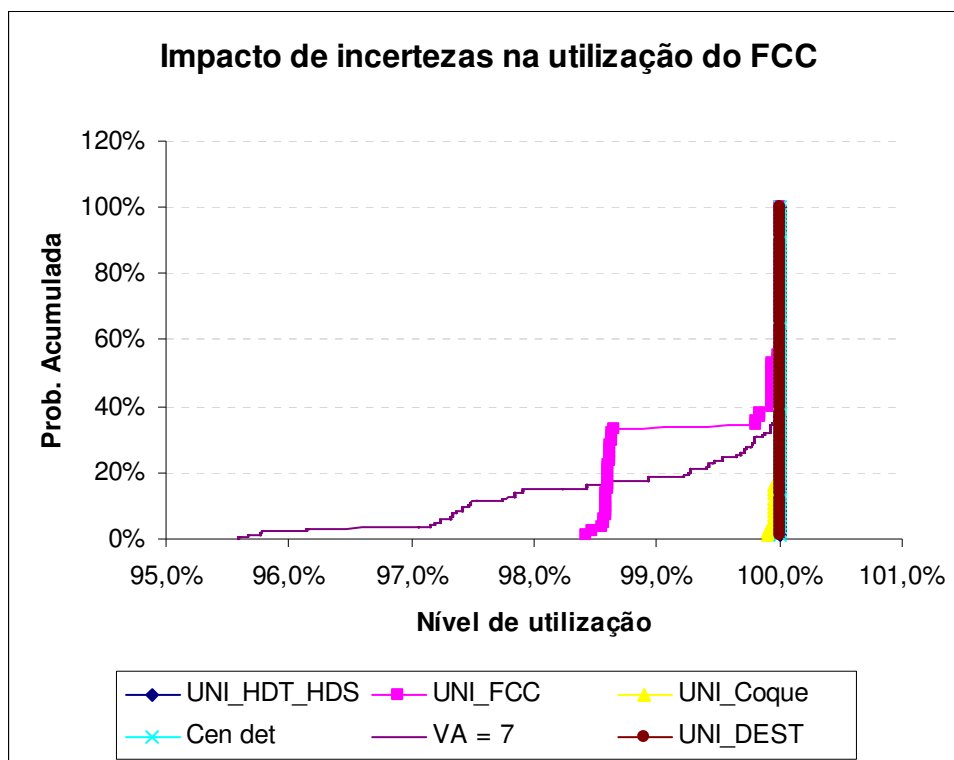
Novamente, a título de comparação, são mostradas as curvas referentes ao cenário determinístico (Cen det) e ao cenário em que sete incertezas são consideradas simultaneamente (VA = 7). Para estes casos, as curvas nos gráficos abaixo são as mesmas mostradas anteriormente. Visto que já foram feitos comentários sobre estes casos, a seguir as explicações serão concentradas nas novas curvas.



**Gráfico 5.13 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização da destilação**

O Gráfico 5.13 mostra que a indicação de utilização da unidade de destilação no cenário determinístico é, na média dos quatro meses considerados, de 8.176 mil m<sup>3</sup>/mês, ou ainda, cerca de 95% da carga máxima de 8.610 mil m<sup>3</sup>/mês. No caso em que se considera incerteza quanto à disponibilidade de destilação, a carga de referência desta unidade passa a variar entre 8.297 mil m<sup>3</sup>/mês e 8.780 mil m<sup>3</sup>/mês. Mesmo no pior dos cenários, a carga máxima é ainda superior aos 8.176 mil m<sup>3</sup>/mês indicado no cenário determinístico, de modo que não há, então, influência nenhuma na carga ótima indicada, que permanece sendo os mesmos 8.176 mil m<sup>3</sup>/mês. Assim, apesar de estocástico, o caso em que se considera variação na disponibilidade da destilação apresenta solução idêntica ao cenário determinístico. No entanto, percentualmente há variação na utilização por variar a carga de referência.

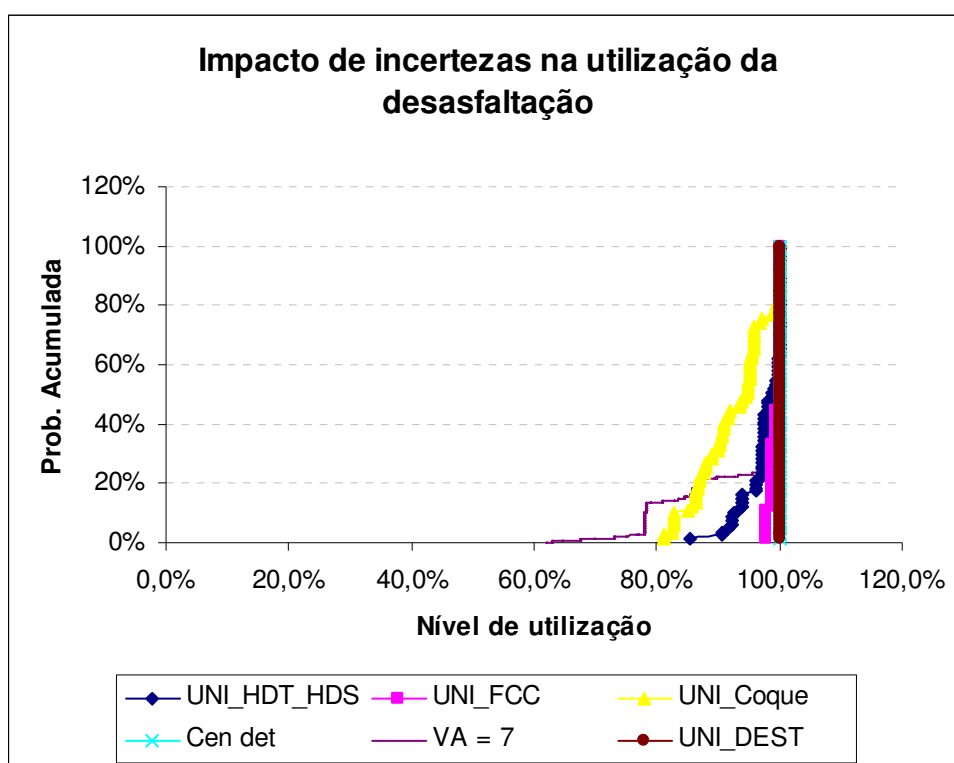
Já as incertezas quanto à disponibilidade das outras unidades têm real impacto na carga da destilação. Como a unidade de destilação envia produtos tanto para o FCC, quanto para as unidades de tratamento e coque, uma redução na disponibilidade de carga destas últimas três unidades tem impacto direto sobre a carga da destilação. Daí entende-se o limite inferior das curvas mostradas no último gráfico ficar abaixo dos 95% indicados no cenário determinístico. No entanto, mesmo nos cenários em que a disponibilidade das unidades de FCC, tratamento e coque aumenta, a indicação de carga na destilação também é menor que os 95%. Isto está associado ao tipo de petróleo que passa a ser processado. Conforme aumenta a disponibilidade de unidades de conversão (FCC e coque) e tratamento (HDS e HDT), aumenta a economicidade do processamento de petróleos mais pesados, visto que se eleva a capacidade de consumo de resíduos e de tratamento de correntes com teores de enxofre mais altos. Por outro lado, o processamento de elenco mais pesado faz aumentar o rendimento de resíduos na destilação e, assim, unidades que consomem estes resíduos (FCC, desasfaltação e coque) passam a atingir sua carga ótima com uma menor utilização da destilação.



**Gráfico 5.14 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do FCC**

Visto que a carga do FCC depende da destilação e o impacto da incerteza quanto à disponibilidade da destilação é praticamente nenhum, conforme já visto, permanece a

indicação de saturação do FCC para o caso de incerteza na carga da destilação, conforme o Gráfico 5.14. O mesmo ocorre quando a incerteza está relacionada às cargas de coque e unidades de tratamento. Apesar de resultar em menor utilização da destilação, o impacto no FCC é quase nulo visto que aquela unidade passa a operar com elenco mais pesado, aumentando, assim, o rendimento de gasóleo e mantendo a carga do FCC próximo dos 100% de utilização. Já a indicação de não saturação do FCC associado à incerteza de disponibilidade do próprio FCC ocorre em cenários em que a carga de referência desta unidade passa a ser maior que a carga ótima indicada, resultando assim em folga na utilização da unidade.

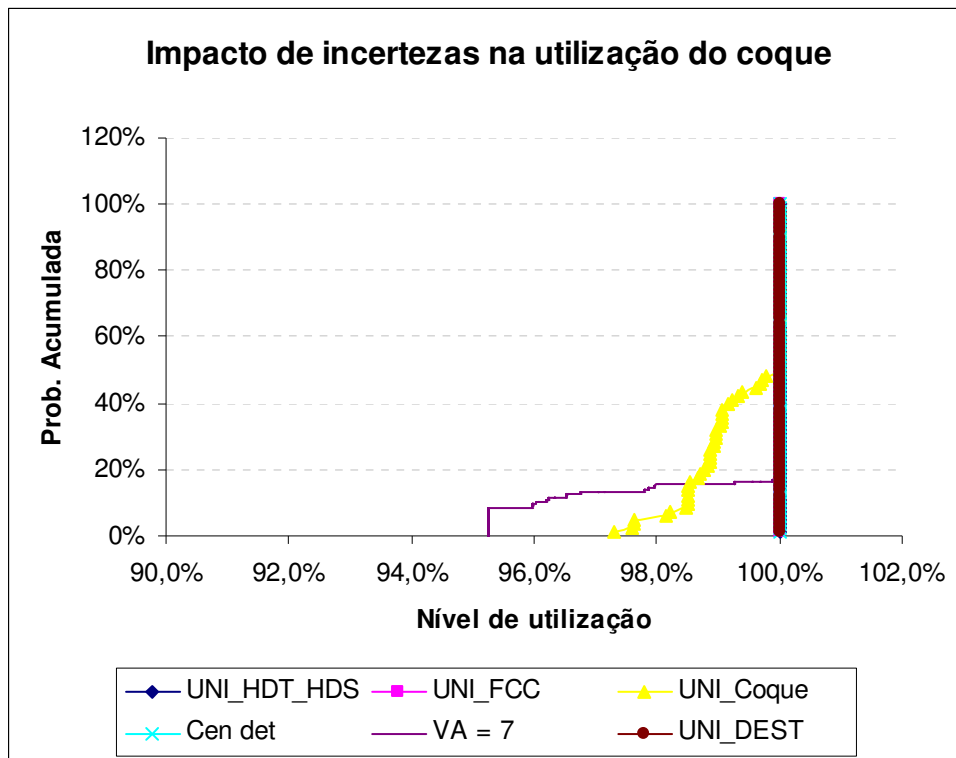


**Gráfico 5.15 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização da desasfaltação**

De acordo com o Gráfico 5.15, as unidades que mais impactam na carga da desasfaltação são o coque e as unidades de tratamento. O coque impacta negativamente a carga da desasfaltação na medida em que sua disponibilidade aumenta. Como a rentabilidade do coque é maior que a da desasfaltação e ambas as unidades consomem resíduos, com um aumento de capacidade o coque “rouba” carga da desasfaltação, que passa a operar em um nível mais baixo. O coque também impacta na desasfaltação uma vez que leva a menor utilização da destilação, como já mencionado.



Já o impacto das unidades de tratamento, reduzindo-se a carga da desasfaltação, ocorre conforme baixa a disponibilidade das unidades de HDT e HDS. Quando isso acontece, diminui a atratividade econômica do processamento de petróleos pesados na destilação, reduzindo a produção de resíduos e impactando diretamente as unidades que os consomem. Como a rentabilidade do coque é superior a da desasfaltação, esta é a que mais sofre.



**Gráfico 5.16 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do coque**

O Gráfico 5.16 mostra que a indicação de saturação da unidade de coque não é abalada por incertezas quanto à disponibilidade das outras unidades. Apenas quando a carga de referência do coque aumenta, passando a superar a carga ótima indicada, é que passa a haver folga na unidade. Neste caso a folga está relacionada a excesso de capacidade.

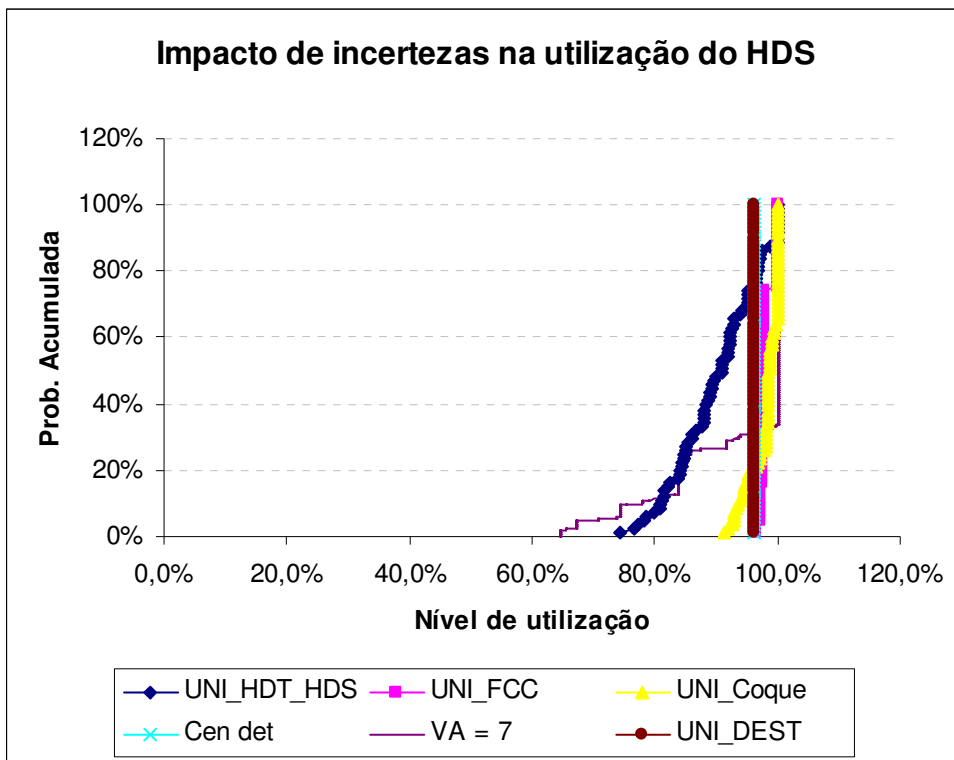


Gráfico 5.17 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do HDS

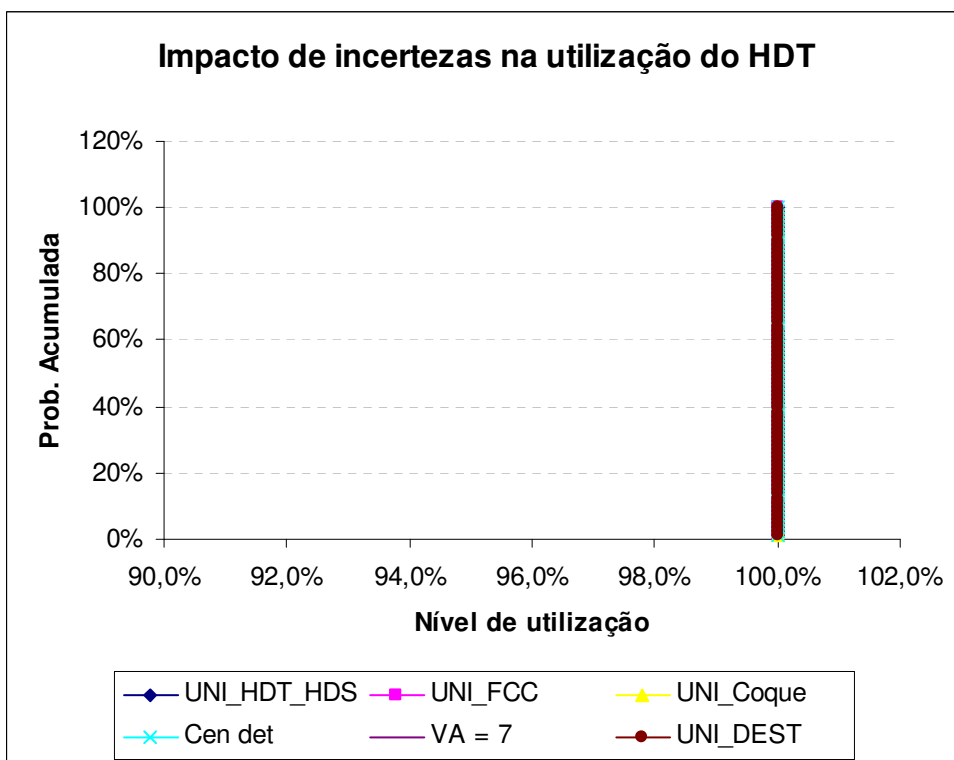


Gráfico 5.18 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de utilização do HDT

Com o aumento da disponibilidade de unidades como FCC e coque, eleva-se o processamento de petróleos pesados, e, então, aumenta a demanda por tratamento de correntes com alto teor de enxofre. Como a unidade de HDT encontra-se sempre saturada (Gráfico 5.18), independente da incerteza considerada, aumenta-se a utilização da unidade de HDS, que passa a superar o nível de 96% indicado no cenário determinístico e atinge os 100%, conforme pode ser visto no Gráfico 5.17.

Da mesma forma como ocorreu com o FCC e coque, a indicação de baixa utilização de HDS (em torno de 80%) ocorre em cenários em que se tem excesso de capacidade.

### **5.3. Impactos de incertezas na formação de estoques de derivados**

A formação de estoques é uma forma de se resguardar contra incertezas futuras. Diferentemente da utilização de unidades, que foi calculada a partir da carga atribuída a cada unidade após a otimização, a informação de formação de estoques corresponde a uma variável de decisão do modelo: o estoque de um determinado produto ao final de cada período. Conforme já comentado, serão analisados apenas os estoques dos produtos diesel, gasolina e óleo combustível.

Os gráficos a seguir apresentam, para cada caso<sup>18</sup> de incerteza quanto à demanda de produtos, preço de produtos e disponibilidade de unidades, curvas de probabilidade acumulada para o nível de estoque médio mensal dos derivados gasolina, diesel e óleo combustível, ou seja, é mostrada a probabilidade da indicação do estoque médio mensal de um dado produto ficar abaixo de um dado valor.

A título de comparação, são mostradas também as curvas referentes ao cenário determinístico (Cen det) e ao cenário em que sete incertezas são consideradas simultaneamente (VA = 7). Neste último, como foi otimizado apenas um único mês, dada a grande quantidade de cenários resultante das várias incertezas, não existe nenhuma indicação de formação de estoques para nenhum produto em nenhum cenário, já que o modelo não enxerga a necessidade de se conectar a nenhum período à frente.

---

<sup>18</sup> Ver na seção 4.2.3 os diferentes casos considerados.

### **5.3.1. Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos**

O Gráfico 5.19 mostra as indicações de formação de estoques de gasolina nos casos em que há incertezas quanto à demanda de diesel, óleo combustível e da própria gasolina. Aos preços ofertados, a exportação de gasolina se mostra bastante interessante economicamente de modo que a indicação de formação de estoque de gasolina cresce conforme aumenta a demanda interna pelo produto, minimizando-se, assim, a perda das exportações do derivado. No caso, então, em que se consideram incertezas quanto à demanda de gasolina, a faixa indicada de estoques vai de 8 mil m<sup>3</sup>/mês (em um cenário em que a demanda de gasolina é 3% menor que no cenário determinístico) a até 34 mil m<sup>3</sup>/mês, quando a demanda é cerca de 5% superior àquela do cenário base. No entanto, em apenas 10% dos cenários a indicação supera os 29,5 mil m<sup>3</sup>/mês do cenário determinístico. Esta indicação de estoque está associada à projeção crescente dos preços de exportação de gasolina, o que estimula a formação de estoques para auferir maiores ganhos com vendas em períodos à frente.

A variação do excedente de gasolina é menos sensível às demandas dos outros produtos e, assim, a indicação de formação de estoques de gasolina oscila pouco nos casos em que há incerteza quanto à demanda de óleo combustível (mantém-se uma indicação de estoque de gasolina de 28 mil m<sup>3</sup>/mês, próximo do indicado no cenário determinístico e também com o intuito de se aproveitar a elevação do preço de venda nos períodos futuros) e de diesel. Como a capacidade de estocagem é limitada e o custo de falta de diesel é muito alto, ao se considerar incertezas quanto à demanda de diesel a indicação econômica é de se utilizar a tancagem disponível para se estocar principalmente diesel, nafta e querosene, produtos que podem vir a ser incorporados ao pool de diesel caso necessário. Daí a não indicação de formação de estoques de gasolina, conforme o Gráfico 5.19.

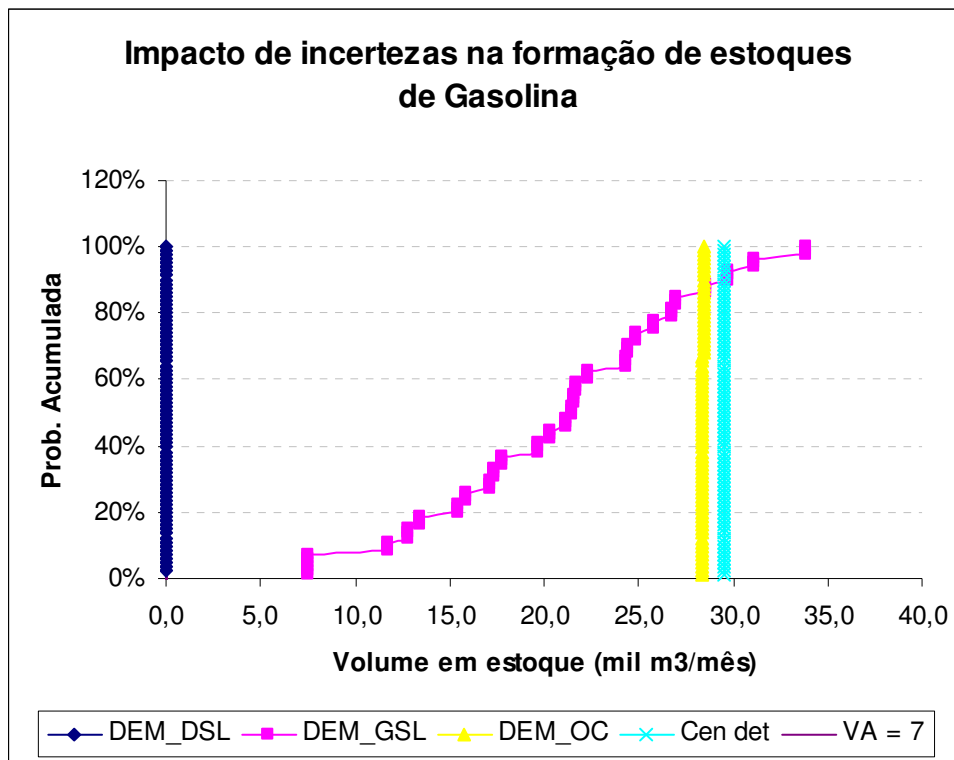


Gráfico 5.19 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de formação de estoques de gasolina

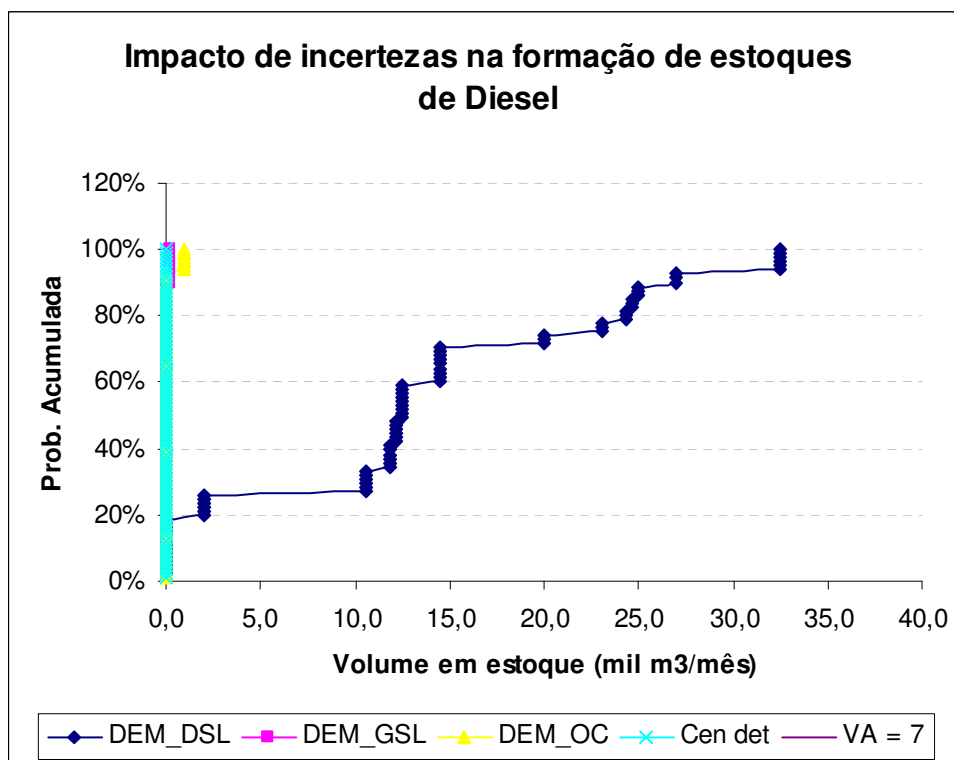
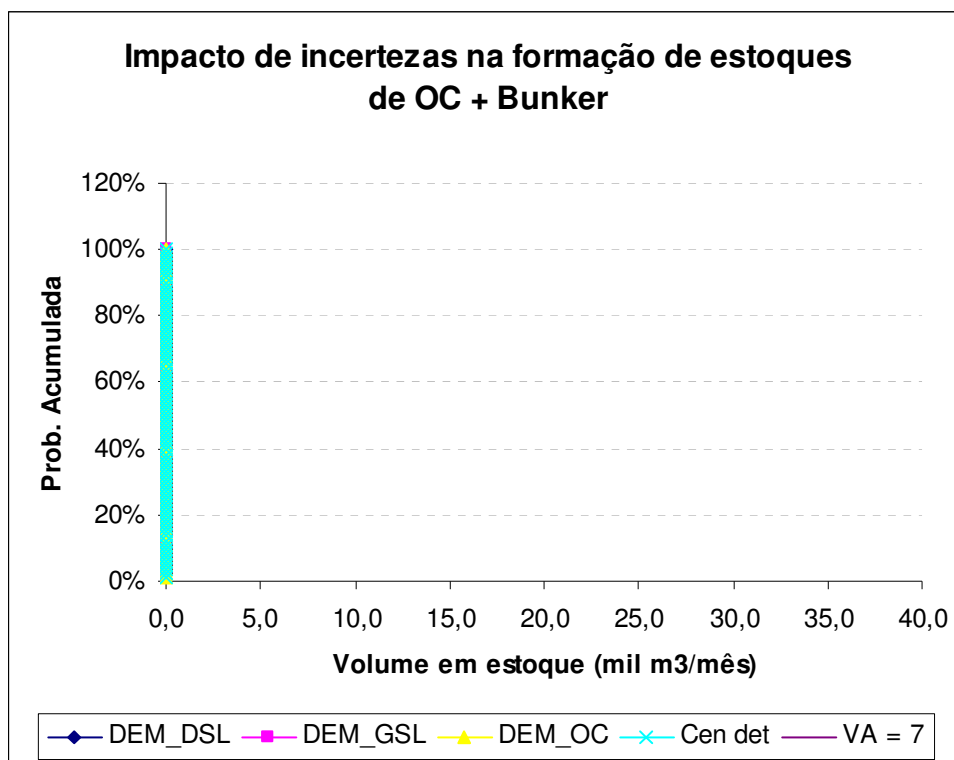


Gráfico 5.20 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de formação de estoques de diesel

Conforme comentado anteriormente, quando há incertezas quanto à demanda de diesel, passa a haver oscilação na indicação de formação de estoque, sendo os maiores volumes indicados nos cenários com maior incremento na demanda, e vice-versa. Isto está relacionado à minimização do risco de falta do diesel, que tem custo bastante elevado. Incertezas relacionadas às demandas dos outros produtos têm, praticamente, nenhum impacto na formação de estoques de diesel, da mesma forma como ocorre no cenário determinístico, conforme o Gráfico 5.20.



**Gráfico 5.21 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de formação de estoques de óleo combustível e bunker**

Os baixos preços de exportação de óleo combustível e os excedentes do produto desestimulam a formação de estoques deste produto, seja qual for a incerteza, conforme o Gráfico 5.21.

### 5.3.2. Impactos de incertezas quanto aos preços de produtos

No cenário determinístico existe a indicação econômica de se estocar, em média, cerca de 29,5 mil m3/mês de gasolina. Conforme passa a haver incertezas quanto ao preço dos produtos, e como há limitações de estocagem, a indicação de quanto se estocar de cada produto se altera. Assim, conforme mostrado nos gráficos 5.22 e 5.23, quando passa a haver incertezas quanto ao preço do diesel, passa a haver uma maior

indicação de estoque deste produto (visto que com a elevação do preço, o custo de falta que já era alto aumenta ainda mais e, então, a necessidade de maior segurança quanto ao suprimento do produto aumenta) e, conseqüentemente, reduz-se o espaço para gasolina. Por outro lado, o maior preço da gasolina estimula um maior estoque do produto, dada a expectativa de maiores ganhos com as exportações futuras, reduzindo, conseqüentemente, a indicação de estoque de diesel. Incertezas no preço do óleo combustível também afetam a indicação de estoques e é o único caso em que passa a haver indicação de formação de estoques deste produto, também com a expectativa de obtenção de melhores preços com as exportações futuras (vide Gráfico 5.24).

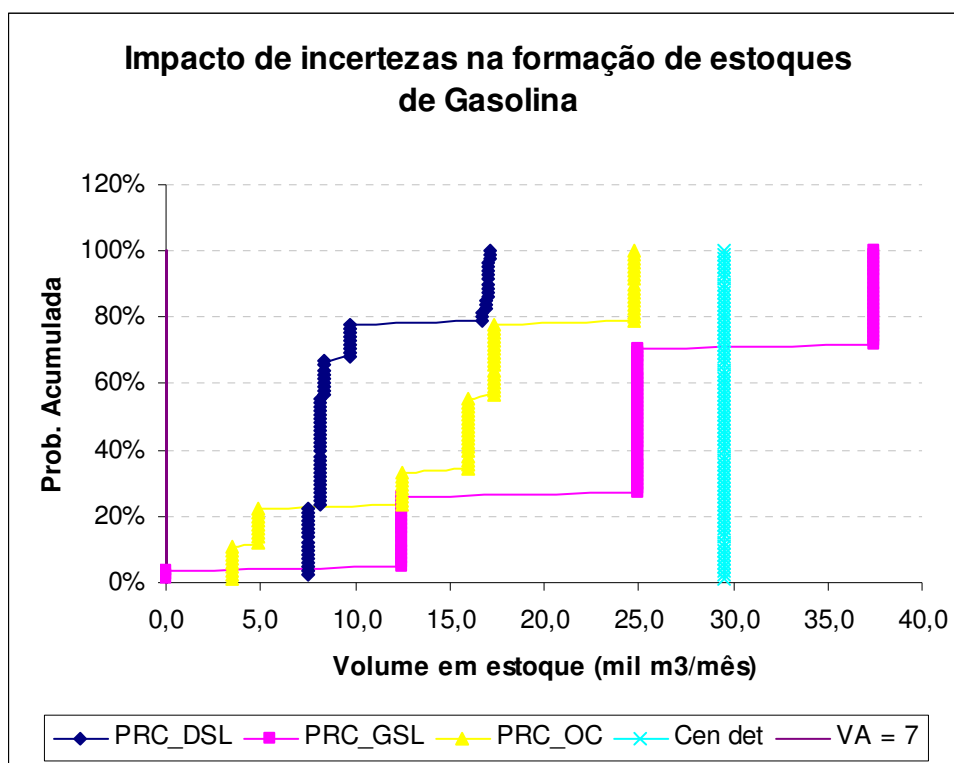


Gráfico 5.22 - Impacto de incertezas quanto ao preço de produtos na indicação de formação de estoques de gasolina

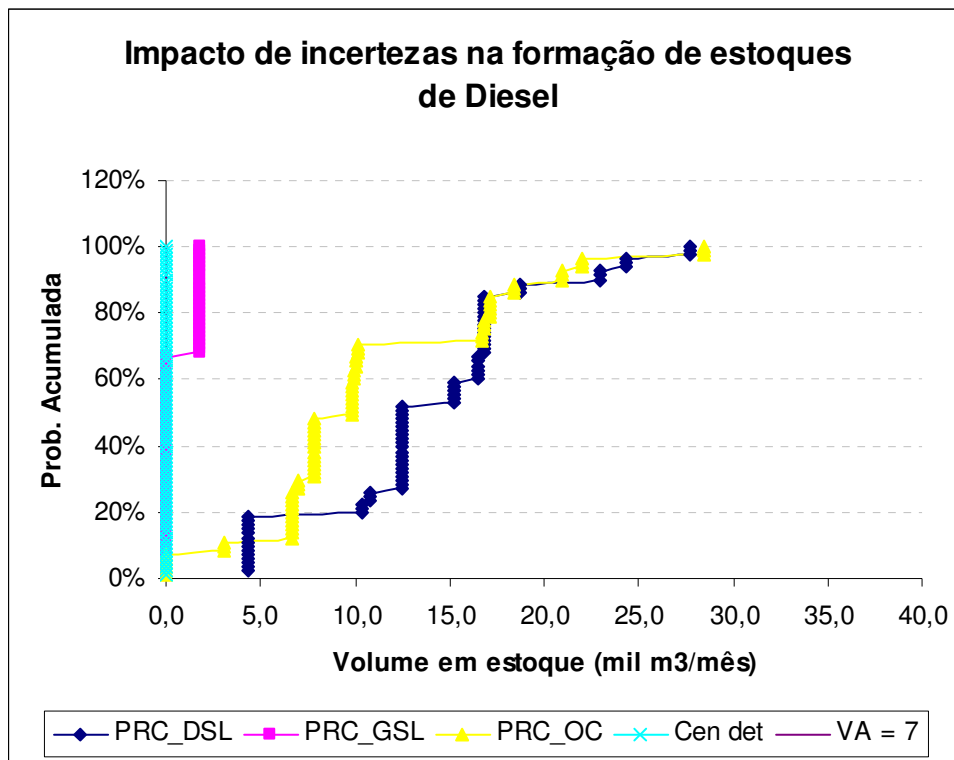


Gráfico 5.23 - Impacto de incertezas quanto ao preço de produtos na indicação de formação de estoques de diesel

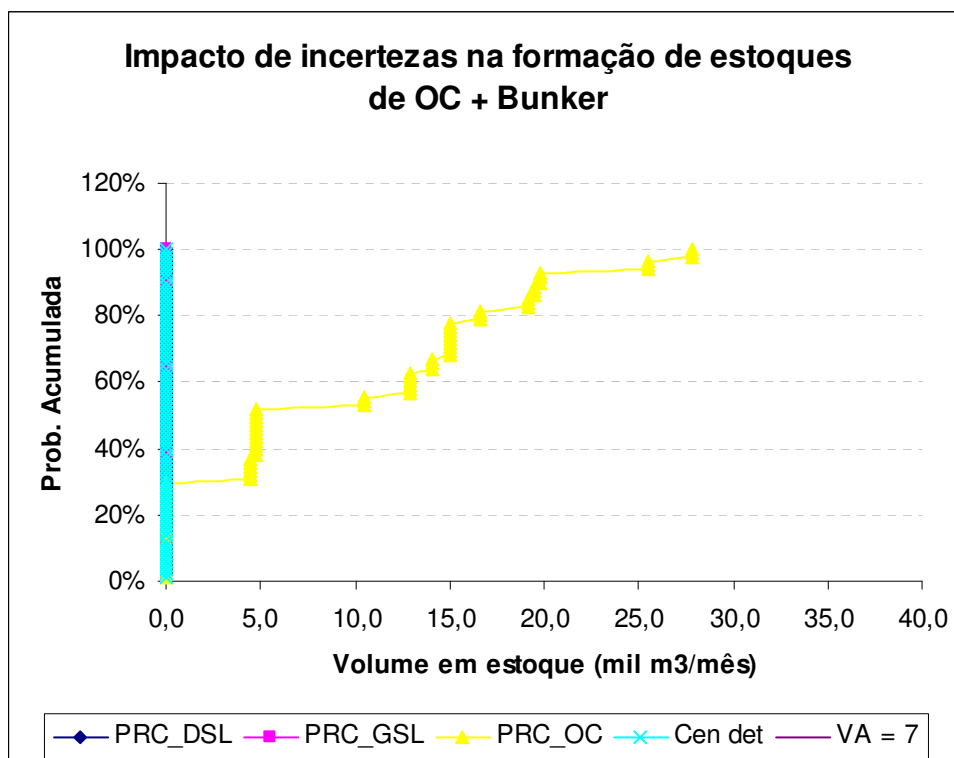


Gráfico 5.24 - Impacto de incertezas quanto ao preço de produtos na indicação de formação de estoques de óleo combustível e bunker



### 5.3.3. Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades

No cenário determinístico, bem como no caso de incerteza quanto à disponibilidade de destilação que, conforme já comentado, apresenta solução muito próxima da determinística, a indicação de estoque médio mensal de gasolina é de 29,5 mil m<sup>3</sup>. Conforme se consideram incertezas em outras unidades e dado o limite de estoque total de produtos claros, torna-se necessário a redução do estoque de gasolina (conforme mostrado no Gráfico 5.25 abaixo) para aumentar o de outros produtos como, por exemplo, o de diesel (vide Gráfico 5.26 a seguir). Neste gráfico, podemos perceber a indicação de se fazer estoque de diesel nos casos de incerteza quanto à disponibilidade do FCC, coque e HDT. Isto está associado há redução de carga ocorrida na destilação (já comentado anteriormente), que passa a processar um petróleo mais pesado, com menor rendimento em diesel. Como a projeção de preços de diesel é crescente com o tempo e o custo de estocagem não é tão alto, a indicação de formação de estoque deste produto é no sentido de garantir o suprimento com mínimo custo.

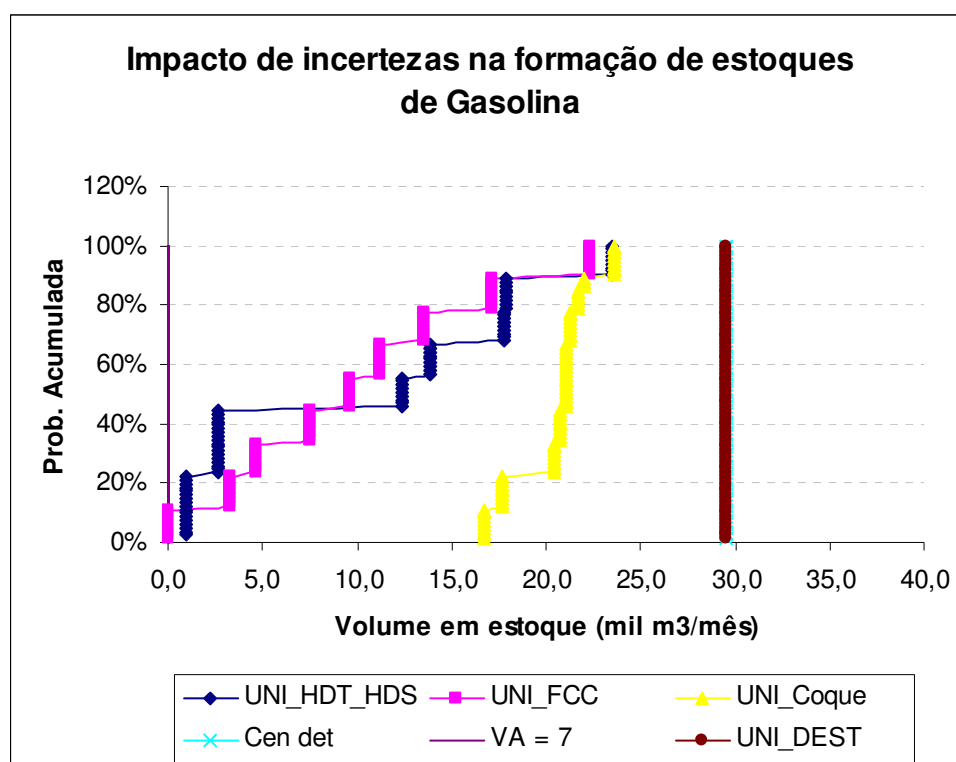


Gráfico 5.25 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de formação de estoques de gasolina

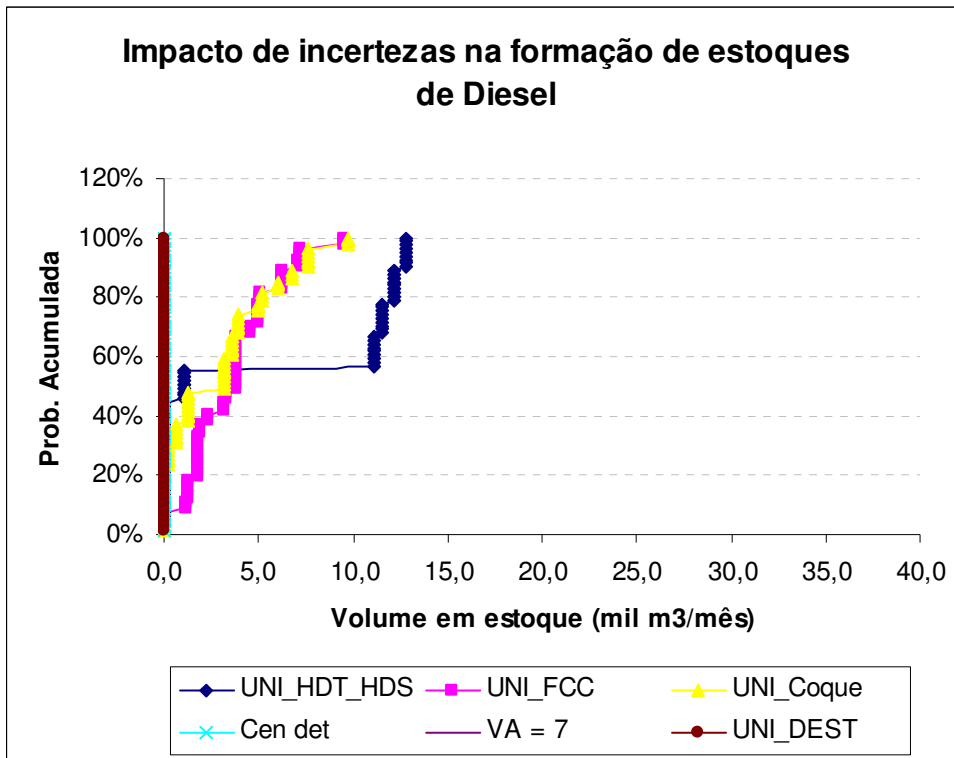


Gráfico 5.26 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de formação de estoques de diesel

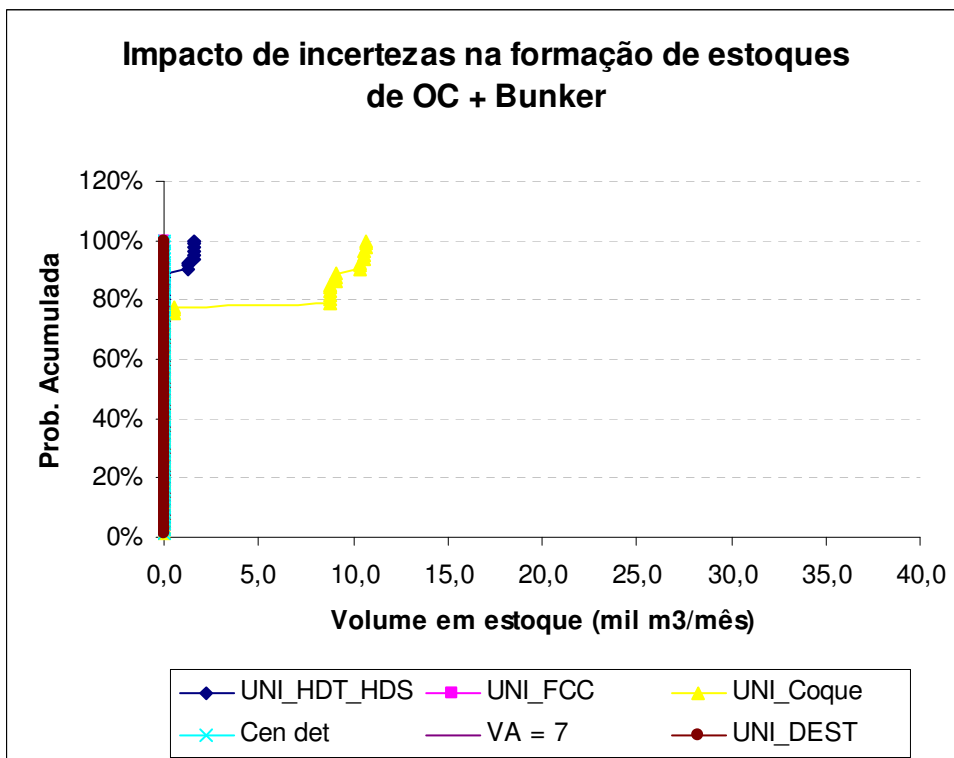


Gráfico 5.27 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de formação de estoques de óleo combustível e bunker

O pequeno volume indicado de estoque de óleo combustível e bunker, conforme o Gráfico 5.27, ocorre em cenários em que se aumenta a disponibilidade da unidade de coque, processadora de resíduos, que é matéria-prima para a produção dos óleos combustíveis. Como o preço de venda dos óleos combustíveis aumenta ao longo do tempo, bem como a disponibilidade da unidade de coque, é mais interessante economicamente se ter guardado algum deste derivado para o período seguinte para não se perder vendas do derivado no momento em que o preço está mais alto nem se deixar de usar a disponibilidade adicional da unidade de conversão.

#### **5.4. Impactos de incertezas na comercialização de derivados**

Seguindo a mesma idéia das seções anteriores, a seguir são apresentados, para cada caso<sup>19</sup> de incerteza quanto à demanda de produtos, preço de produtos e disponibilidade de unidades, curvas de probabilidade acumulada para as indicações de importação de diesel e exportação de gasolina e de óleo combustível, ou seja, é mostrada a probabilidade da indicação média mensal de compra ou venda de um dado produto ficar abaixo de um dado valor.

A título de comparação, são mostradas também as curvas referentes ao cenário determinístico (Cen det) e ao cenário em que sete incertezas são consideradas simultaneamente (VA = 7).

Também serão comentadas as ocorrências de indicações de importação extra, aquela realizada no mesmo período da realização da incerteza e é uma das formas de se corrigir uma decisão tomada anteriormente.

##### **5.4.1. Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos**

No Gráfico 5.28 é mostrada a influência das incertezas relacionadas às demandas dos produtos nas indicações de importação de diesel.

Em todos os cenários em que se considera incerteza quanto à demanda de diesel a indicação de importação do produto é superior aos 417 mil m<sup>3</sup>/mês indicados no cenário determinístico. Enfatizando-se o que já foi dito anteriormente, os custos em contornar uma decisão de compra excessiva (que corresponde a reduzir produção e/ou

---

<sup>19</sup> Ver na seção 4.2.3 os diferentes casos considerados.

fazer estoque) são mais baixos que o custo de contornar uma compra abaixo do necessário (que corresponde a uma importação extra muito cara). Sendo assim, a solução que minimiza a soma dos custos esperados aponta para uma importação maior de diesel que no cenário determinístico. Mesmo com esse nível mais alto de importação, em mais da metade dos cenários foi necessário a importação extra de diesel e em mais de 30% dos cenários essa importação superou 40 mil m<sup>3</sup>/mês, em média.

Quando a incerteza é com relação à demanda de gasolina ou óleo combustível, o impacto não é tão grande, condizente também com o pequeno impacto causado na carga da destilação, e oscila em torno dos 417 mil m<sup>3</sup>/mês do cenário determinístico.

Já quando aumenta a quantidade de incertezas, a indicação de importação de diesel é menor que o caso determinístico, no entanto, a indicação de importação extra do derivado aumenta, chegando a cerca de 95 mil m<sup>3</sup>/mês em 8% dos cenários.

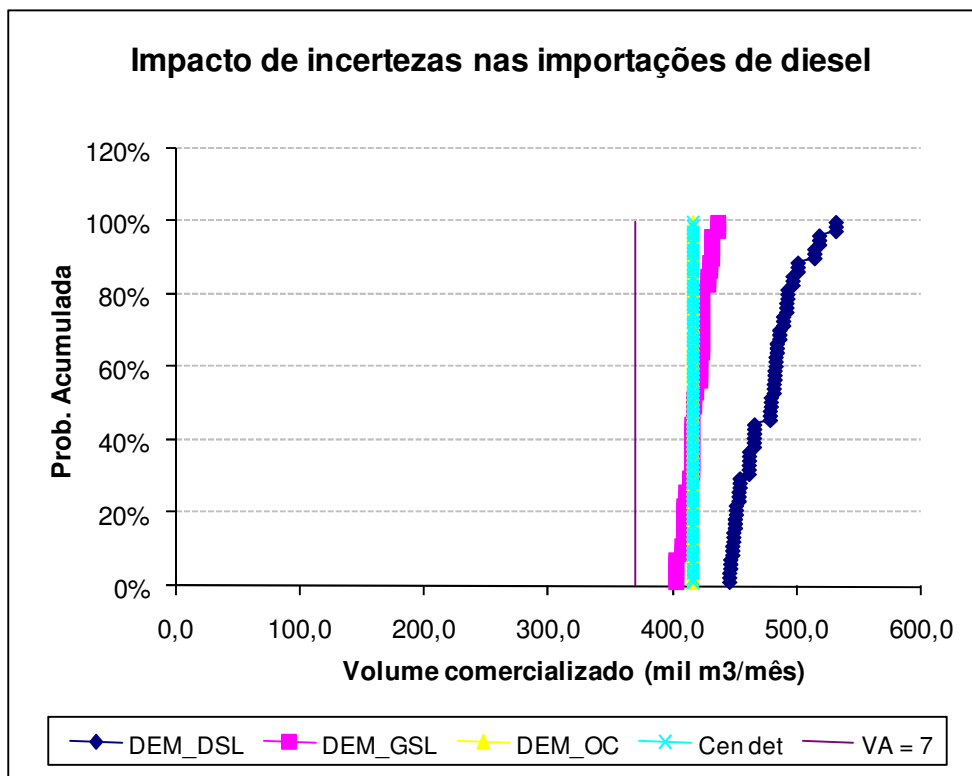
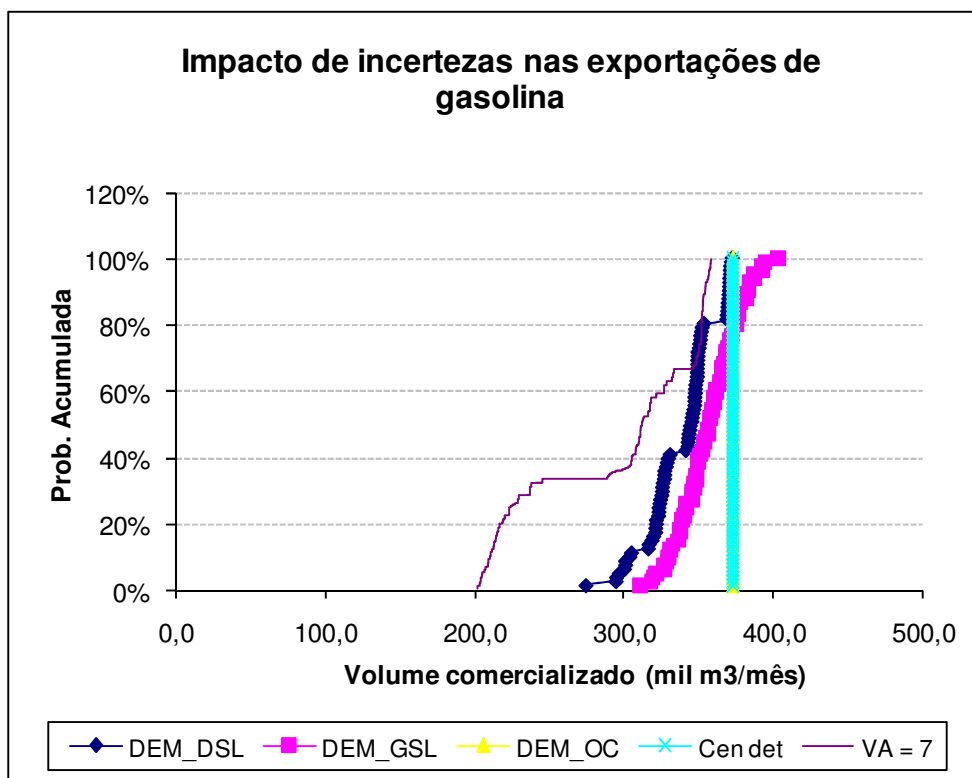


Gráfico 5.28 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de importação de diesel



**Gráfico 5.29 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de exportação de gasolina**

O Gráfico 5.29 ilustra o impacto nas exportações de gasolina em virtude de incertezas quanto à demanda de óleo combustível, diesel e gasolina. As variações consideradas de ocorrer na demanda de óleo combustível causam pequeno impacto na utilização de unidades de destilação e FCC, de modo que o impacto na produção e, conseqüentemente, nas exportações de gasolina são praticamente nulas, no mesmo nível indicado no cenário determinístico. Já as incertezas na demanda de diesel, por causar reduções de carga destas unidades, resultam em menores indicações de venda de gasolina. Da mesma forma como ocorre no caso dos óleos combustíveis, incertezas quanto à demanda de gasolina também causam pequenos impactos na utilização das unidades de destilação e FCC. Por outro lado, diferentemente do caso anterior, variações na demanda de óleo combustível são diretamente percebidas no excedente exportado. Em cerca de 20% dos cenários as indicações de exportação de gasolina superam a indicação dos cerca de 375 mil m<sup>3</sup>/mês indicados de se exportar no cenário determinístico, coerente com a chance também próxima a 20% da demanda ser menor que no cenário base.

Com um maior número de incertezas consideradas (VA = 7), a faixa de variação para as exportações de gasolina também se amplia para algo entre 200 e 360 mil m3/mês, condizente com os impactos causados nas cargas das unidades produtoras.

Da mesma forma, a menor utilização da unidade de destilação verificada nos cenários VA = 7 e no de incertezas quanto à demanda de diesel é a principal responsável pela menor exportação de óleo combustível e bunker (vide Gráfico 5.30), visto o impacto causado na produção destes derivados. Já as incertezas na demanda de gasolina e óleo combustível causam pequeno impacto na destilação, mas no caso deste último produto, variações na demanda são absorvidas diretamente nas exportações do produto, que oscilam entre 560 e 635 mil m3/mês, sendo de cerca de 55% a chance das exportações superarem os 600 mil m3/mês indicados no cenário determinístico, coerente com a expectativa de demanda um pouco menor.

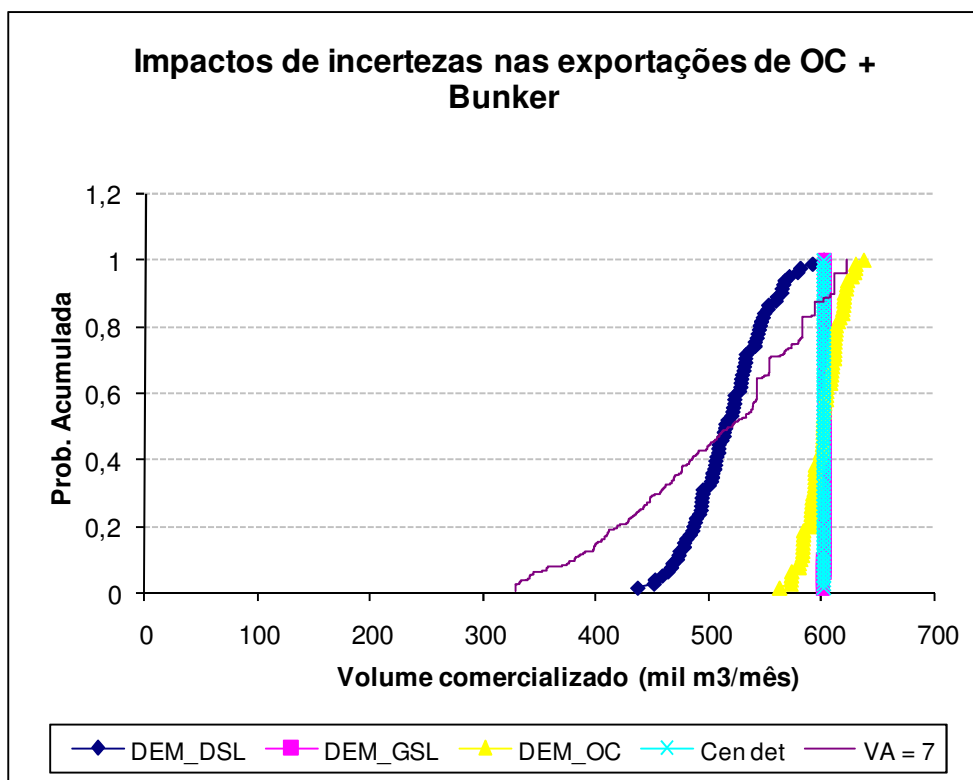


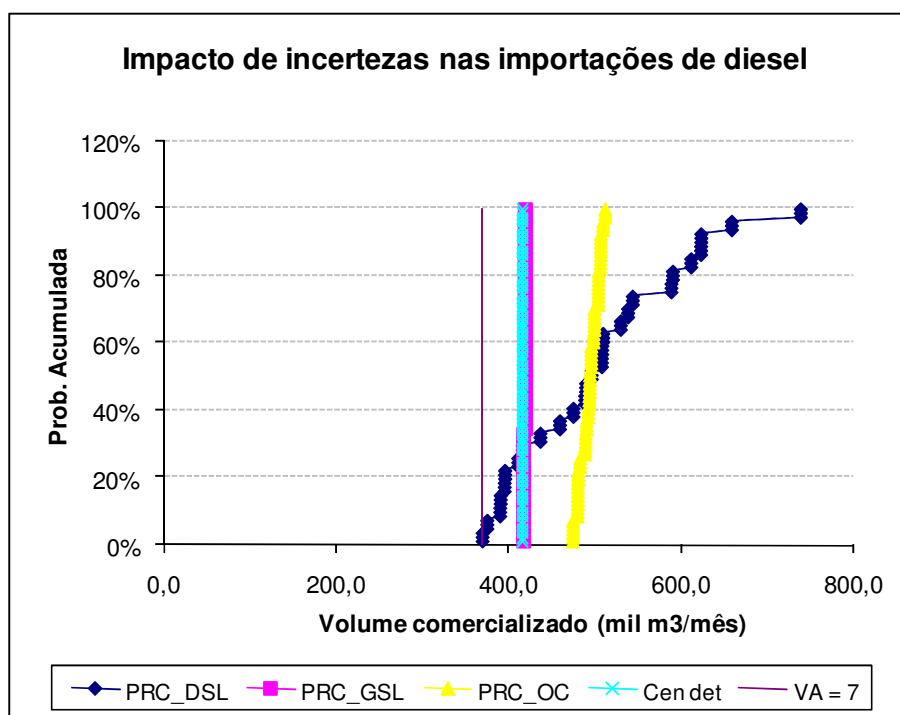
Gráfico 5.30 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos na indicação de exportação de óleo combustível e bunker

#### 5.4.2. Impactos de incertezas quanto aos preços dos produtos

Comparado ao caso de incertezas na demanda de diesel, as variações no preço do derivado causam até maior impacto nas indicações de importação do produto. De acordo com o Gráfico 5.31, a faixa de variação para as importações de diesel se amplia,

ficando em 30% dos cenários abaixo do indicado no caso base e, em cerca de, 70% acima. Conforme já dito, a maior indicação de importação do produto está associado ao maior custo de se corrigir uma decisão anterior (o custo da importação extra fica ainda maior) e ao valor esperado crescente para o preço do diesel ao longo do tempo, levando a uma indicação de maior importação em um dado mês se comparado ao cenário determinístico, mesmo a um preço mais elevado, para formação de estoque para o período seguinte, diminuindo a necessidade de maior importação no futuro, quando o preço estará ainda mais alto. Se por um lado o volume importado passa a ser maior que no caso de incerteza de demanda (em mais de 30% dos cenários a indicação de importação supera o volume máximo indicado no caso de incerteza de demanda), por outro deixa de haver necessidade de importações extra.

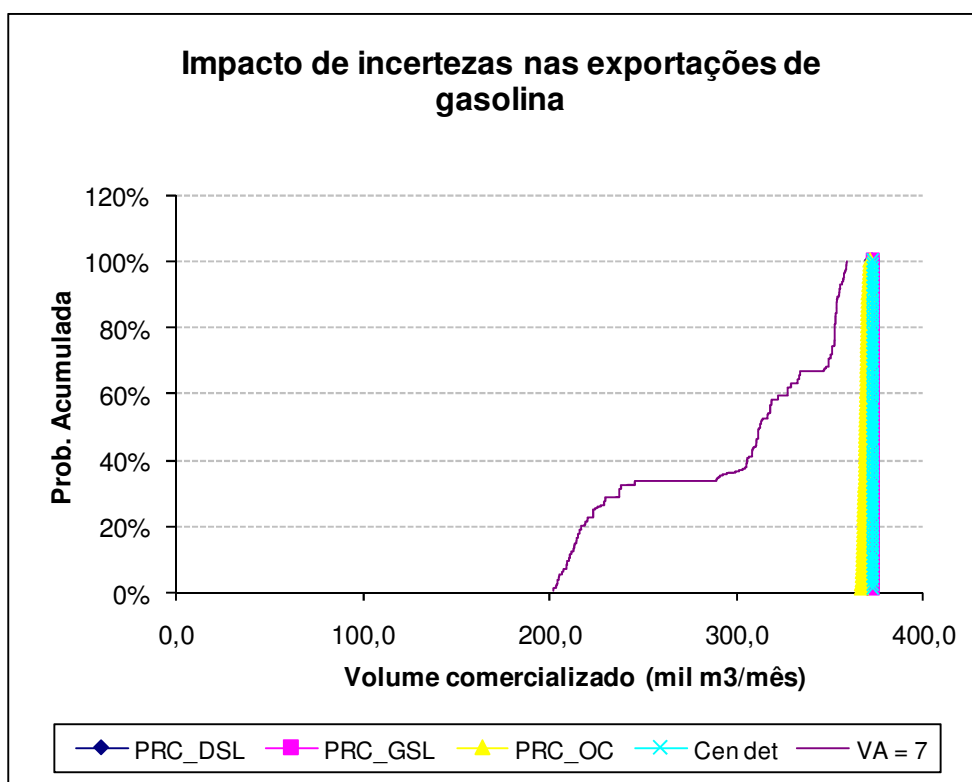
O Gráfico 5.31 mostra que o impacto da variação do preço do óleo combustível nas importações de diesel é maior que aquele causado pela variação da demanda e está associado ao efeito causado na utilização da destilação e tipo de petróleo processado. Como já visto, a incerteza quanto ao preço de óleo combustível leva a uma indicação de menor utilização de destilação e ao maior processamento de petróleos pesados (com menor rendimento em diesel), levando ao aumento do déficit de diesel e, conseqüentemente, ao aumento das importações do derivado.



**Gráfico 5.31 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos na indicação de importação de diesel**

O impacto quase imperceptível das incertezas quanto a preços na utilização do FCC (principal unidade produtora de gasolina), conforme já visto, traz também praticamente nenhuma alteração nas indicações de exportação de gasolina, que se mantém próximas do valor indicado no cenário determinístico, conforme o Gráfico 5.32.

Já as diferenças em relação ao cenário base para as exportações de óleos combustíveis e bunker (vide Gráfico 5.33) são percebidas quando há incertezas nos preços de diesel (reflexo da menor carga da destilação) e, principalmente, quando há variações no preço dos óleos combustíveis, que conforme baixam, reduzem também a atratividade econômica de se exportar o produto.



**Gráfico 5.32 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos na indicação de exportação de gasolina**



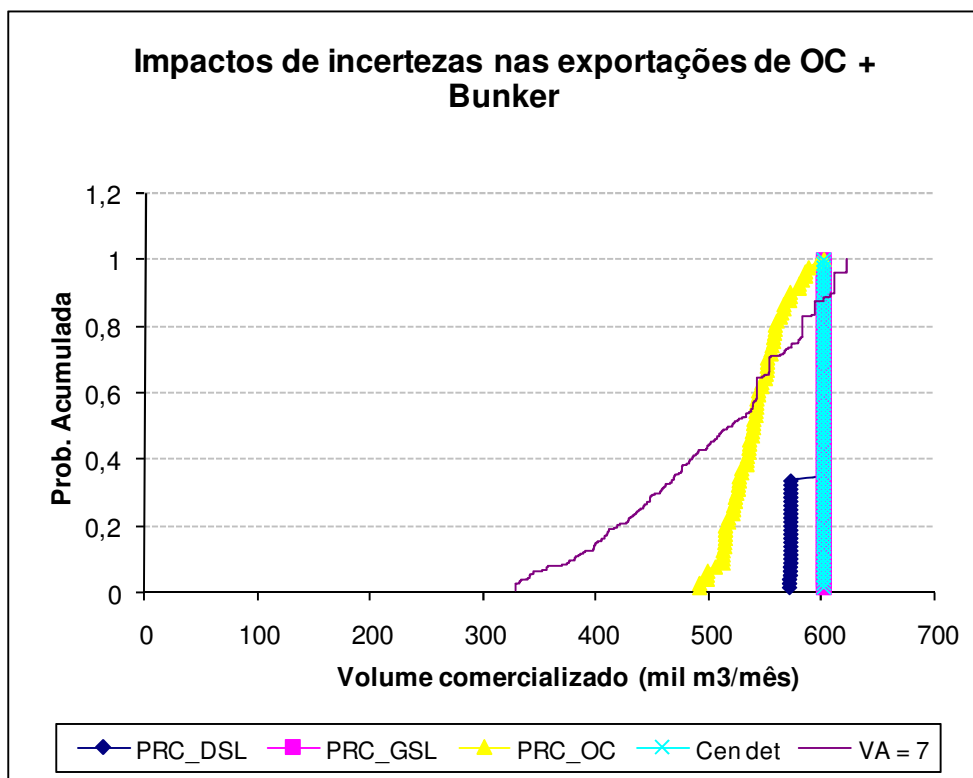


Gráfico 5.33 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos na indicação de exportação de óleo combustível e bunker

### 5.4.3. Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades

Enfatizando-se o que já foi dito, a redução da disponibilidade de unidades de FCC, coque e HDT tem impacto direto sobre a carga da destilação por estarem aquelas à jusante desta no processo produtivo. Da mesma forma, o aumento da disponibilidade daquelas unidades também tem impacto negativo na indicação de carga da destilação, que passa a processar um elenco mais pesado, saturando-se as unidades de conversão mesmo com uma carga mais baixa. Assim sendo, esta indicação de menor utilização da unidade de destilação tem consequência direta na também menor produção de diesel, levando-se a indicações de importações sempre maiores que no cenário determinístico nos casos em que a disponibilidade de unidades de tratamento, FCC e coque são incertas, conforme gráfico abaixo. Vale destacar que para o caso VA = 7, quando foi considerado apenas um período, tem-se um único valor indicado de importação (daí a linha reta no Gráfico 5.34) que corresponde à decisão tomada no primeiro estágio. Esta indicação menor de importação, quando comparada aos outros casos em que foram considerados quatro períodos, está relacionada à demanda média cerca de 230 mil m<sup>3</sup> a menos que a média dos três períodos seguintes.

O efeito causado pela incerteza de disponibilidade de unidades de tratamento, FCC e coque também é sentido nas indicações de exportação de óleos combustíveis e bunker, conforme o Gráfico 5.36. Apenas em cerca de 30% dos cenários em que se considera incerteza quanto à disponibilidade de coque é que as exportações superam o volume de 600 mil m<sup>3</sup>/mês indicados no cenário determinístico. Isso ocorre porque, apesar do impacto negativo na carga da destilação, em cenários em que a disponibilidade do coque se reduz muito, baixa a capacidade de consumo de resíduos no sistema, fazendo aumentar a produção, e conseqüentemente, as exportações de óleos combustíveis.

Já o maior impacto nas exportações de gasolina (Gráfico 5.35) é verificado quando há variações na disponibilidade de FCC. Comparado ao cenário determinístico, a expectativa de menores disponibilidades de cargas da principal unidade produtora de gasolina, em grande parte dos cenários, faz com que a produção do derivado seja menor, refletindo em mais baixas indicações de exportação. Em apenas 10% dos cenários, com uma maior disponibilidade de FCC, a indicação de exportação ultrapassa o volume indicado no caso base.

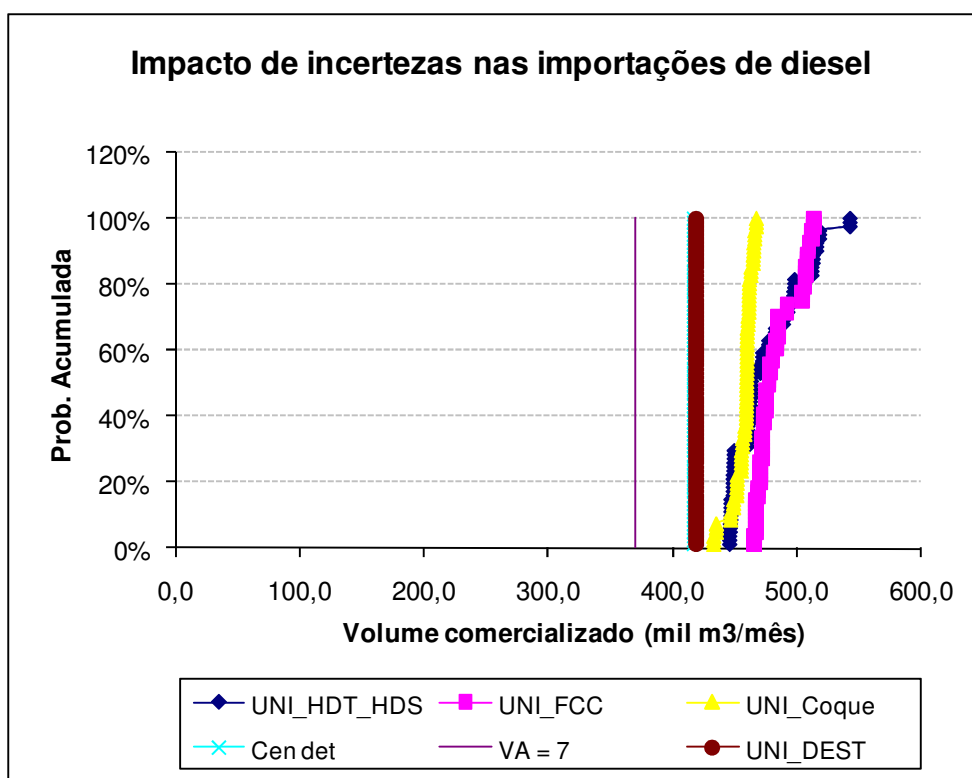


Gráfico 5.34 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de importação de diesel

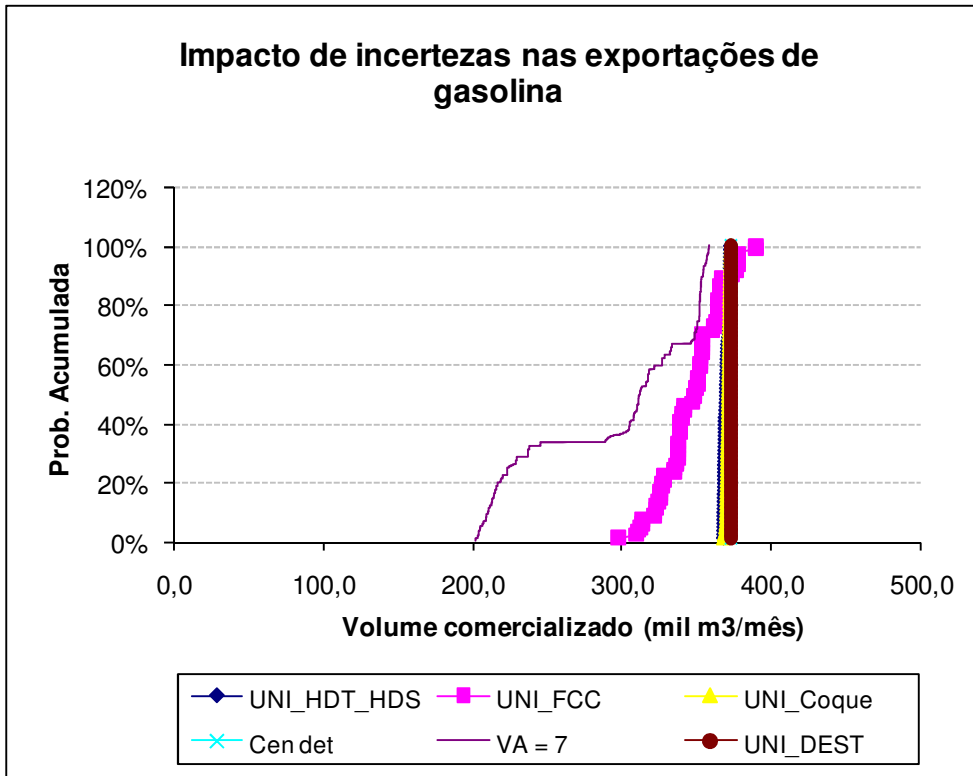


Gráfico 5.35 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de exportação de gasolina

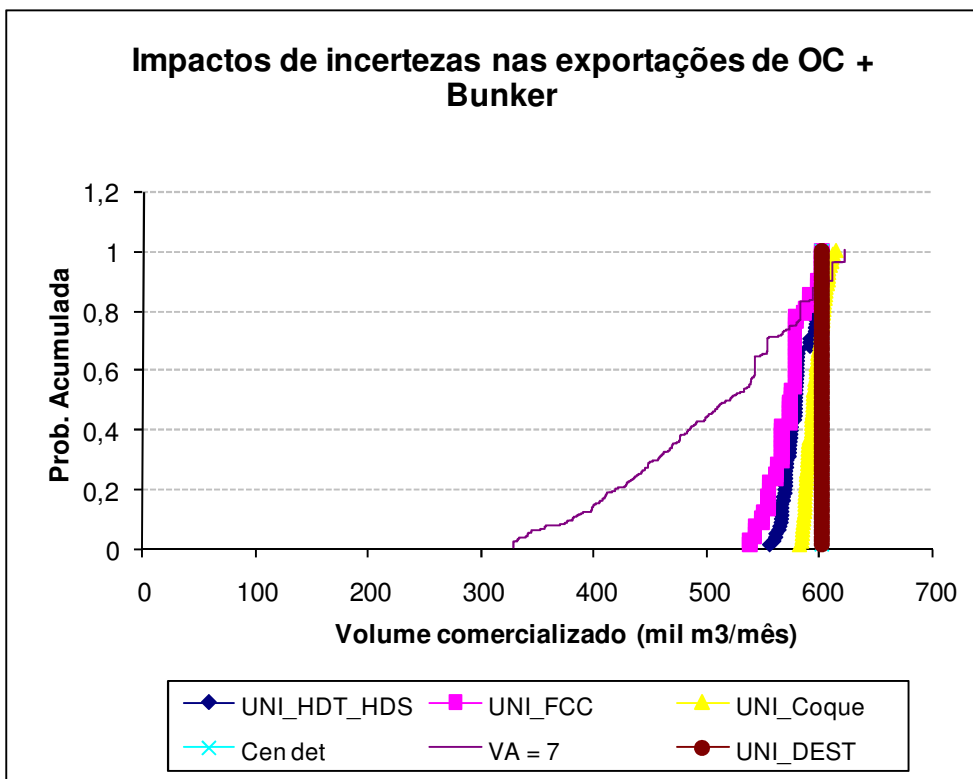


Gráfico 5.36 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades na indicação de exportação de óleo combustível e bunker

## **5.5. Impactos de incertezas no resultado econômico**

A seguir serão analisados os impactos de incertezas no resultado econômico (total de receitas com vendas de derivados no mercado interno e exportações de derivados e petróleo menos os custos com importações de petróleo e derivados e custos operacionais de utilização de unidades, degradações, estoques e transportes) e no balanço de operações externas, que corresponde à diferença entre as receitas com as exportações (considerando-se preço FOB<sup>20</sup>) e custos com importações dos produtos (considerando-se preço CIF<sup>21</sup>), de cada cenário.

Como no caso VA = 7 foi considerado um único período a frente, enquanto que para todos os outros foram considerados quatro períodos futuros, e existem diferenças significativas nos preços e custos em cada período, fica difícil a comparação do resultado econômico do caso com um único período com os outros casos com quatro períodos. Por isso, nos gráficos a seguir (5.37 a 5.42) não será mostrado o resultado associado ao caso VA = 7. Entretanto, a grande dispersão dos resultados dos 2187 cenários deste caso pode ser verificada na tabela resumo da seção seguinte (Tabela 5.2).

### **5.5.1. Impactos de incertezas quanto à demanda de produtos**

Analisando-se os dois gráficos a seguir (Gráfico 5.37 e Gráfico 5.38), as incertezas associadas à demanda de diesel, são as que mais impactam economicamente o resultado. Em cerca de 75% dos cenários, as incertezas quanto à demanda do derivado levaram a um resultado econômico pior que o obtido no cenário determinístico. Um fator que tem grande responsabilidade neste resultado são as importações extras. Considerando-se as incertezas na demanda de diesel, o balanço de operações externas sofre ainda maior variação que o resultado econômico. Esse balanço para o cenário mais pessimista quanto à demanda de diesel (que corresponde ao menor déficit do derivado, ou seja, à menor necessidade de importação) é cerca de cinco vezes maior que o do mais otimista (que corresponde ao maior déficit e, conseqüentemente, maior necessidade de

---

<sup>20</sup> Preço no país, desconsiderando-se o acréscimo no preço em virtude do frete para se transportar até o cliente.

<sup>21</sup> Preço no país, considerando-se o acréscimo no preço em virtude do frete para se transportar do fornecedor até o país.

importação). O impacto da incerteza na demanda dos outros produtos é menor, ficando mais próximo do resultado obtido no cenário determinístico

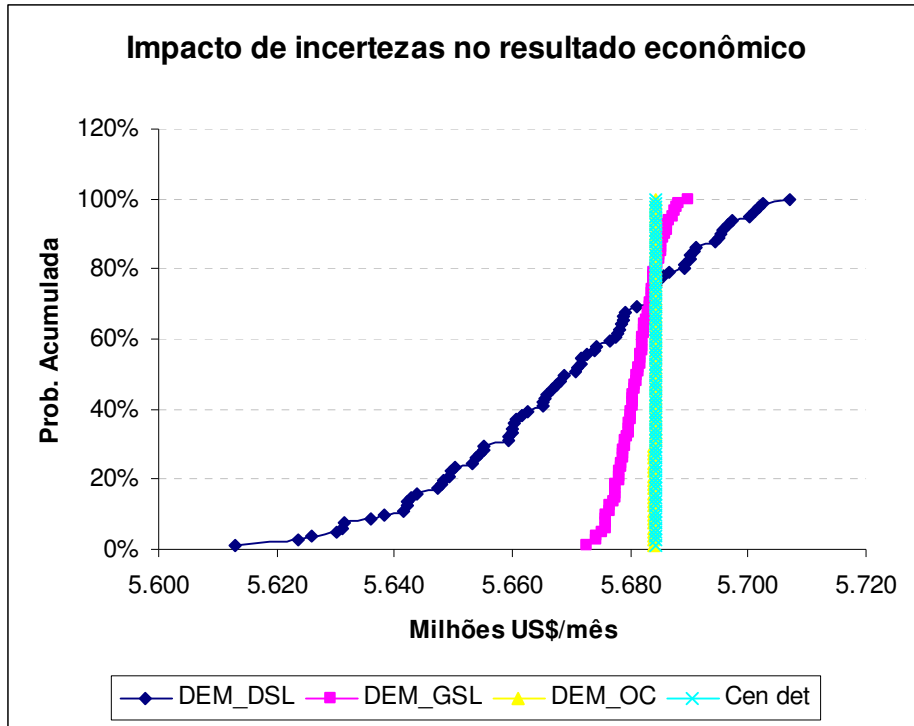


Gráfico 5.37 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos no resultado econômico

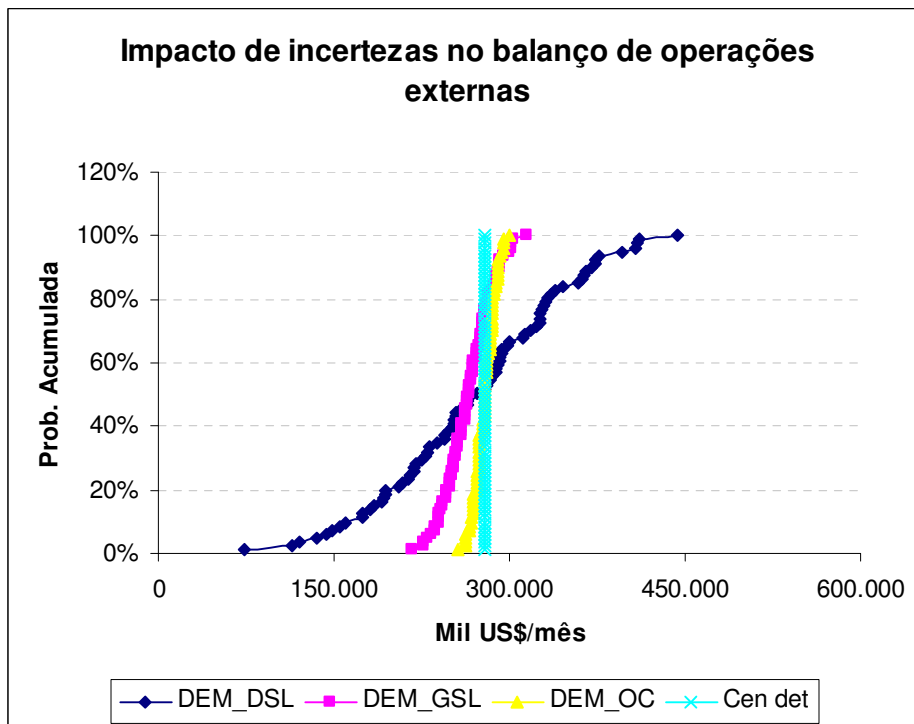


Gráfico 5.38 - Impacto de incertezas quanto à demanda de produtos no balanço de operações externas

### 5.5.2. Impactos de incertezas quanto aos preços de produtos

A expectativa de dois terços dos cenários considerados, no caso em que há incerteza na demanda de gasolina, ter um melhor preço de exportação que no cenário base contribui para que o resultado econômico obtido em 75% dos cenários seja melhor que o do caso base, conforme o Gráfico 5.39. Já com o óleo combustível ocorre o contrário. A maior expectativa de preços de exportação mais baixos que no caso base faz com que o resultado econômico seja pior em 75% dos cenários. As incertezas quanto ao preço do diesel fazem o resultado econômico oscilar em torno daquele resultante do caso determinístico, ficando em cerca de 50% dos cenários acima e em 50%, abaixo.

Analisando-se os balanços de operações externas, o impacto de incertezas quanto ao preço é menor que aquele em virtude de incertezas nas demandas de produtos, o que pode ser verificado pela pequena amplitude de variação dos resultados em cada caso no Gráfico 5.40, todos próximos entre si e do caso determinístico.

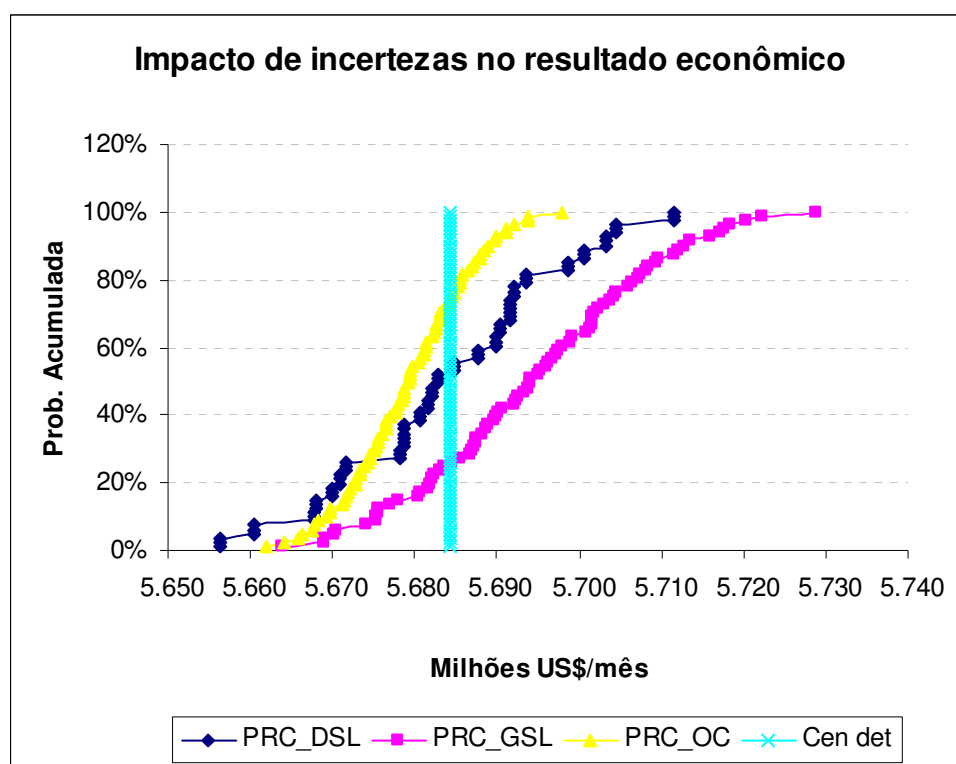
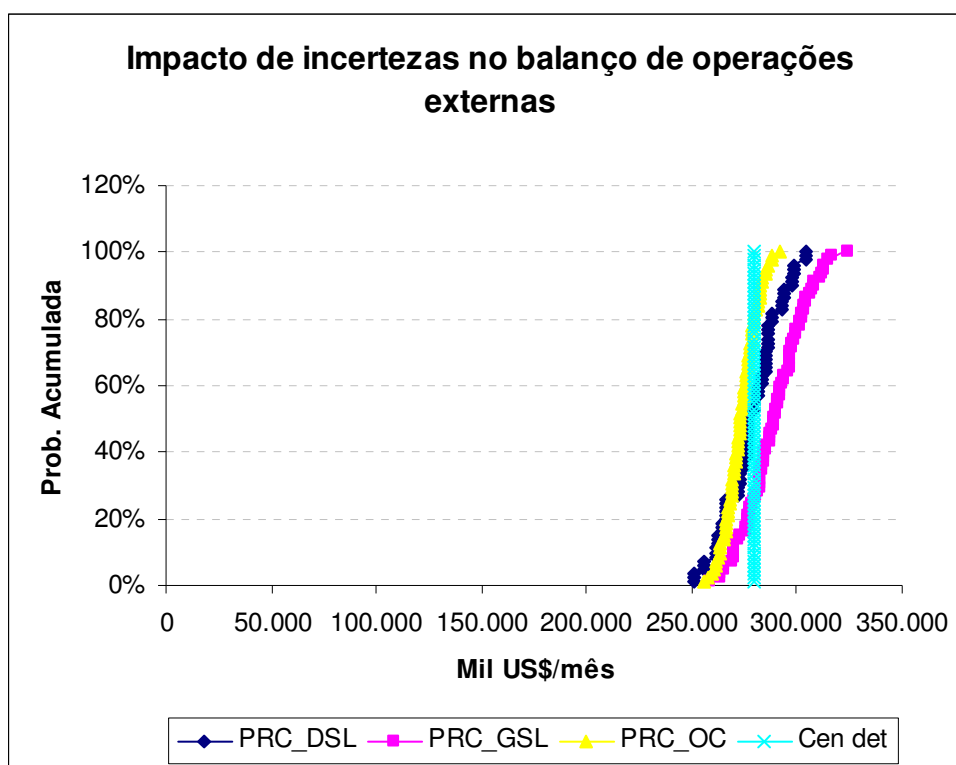


Gráfico 5.39 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos no resultado econômico



**Gráfico 5.40 - Impacto de incertezas quanto aos preços de produtos no balanço de operações externas**

### 5.5.3. Impactos de incertezas quanto à disponibilidade de unidades

Dos três tipos de incertezas consideradas, aquela associada à disponibilidade de unidades parece ser a que causa menos impacto na variação do resultado econômico. Considerando-se todos os cenários de incertezas quanto à disponibilidade de unidades, tanto a variação no resultado econômico quanto no balanço de operações externas apresenta pequena amplitude, todos muito próximos do resultado do cenário determinístico (vide gráficos 5.41 e 5.42 a seguir).

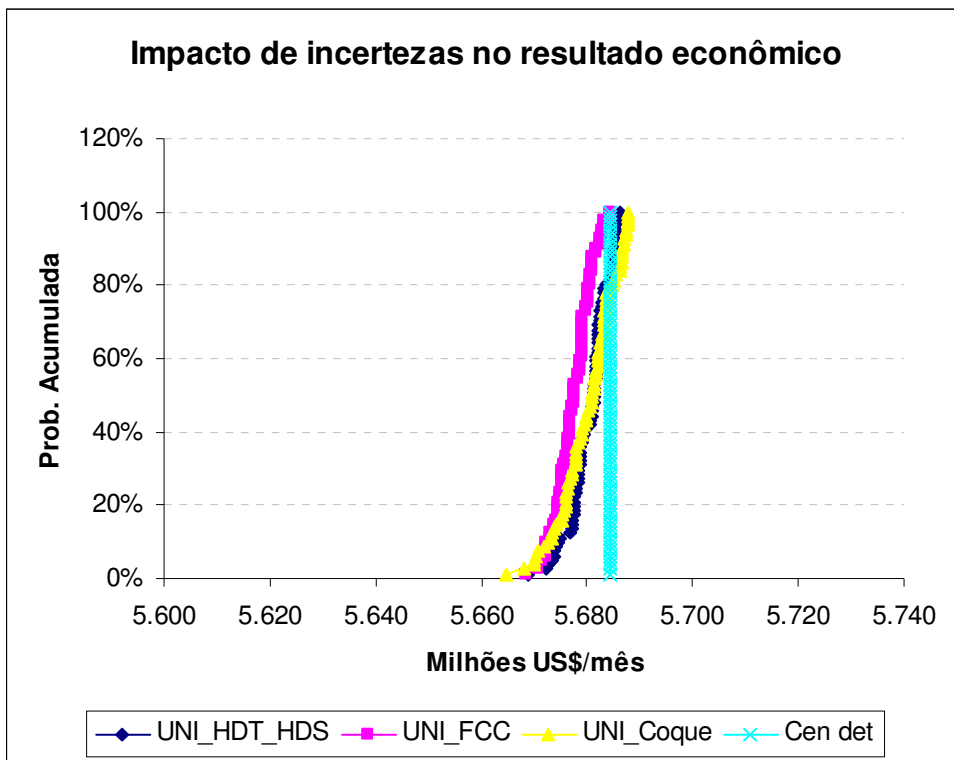


Gráfico 5.41 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades no resultado econômico

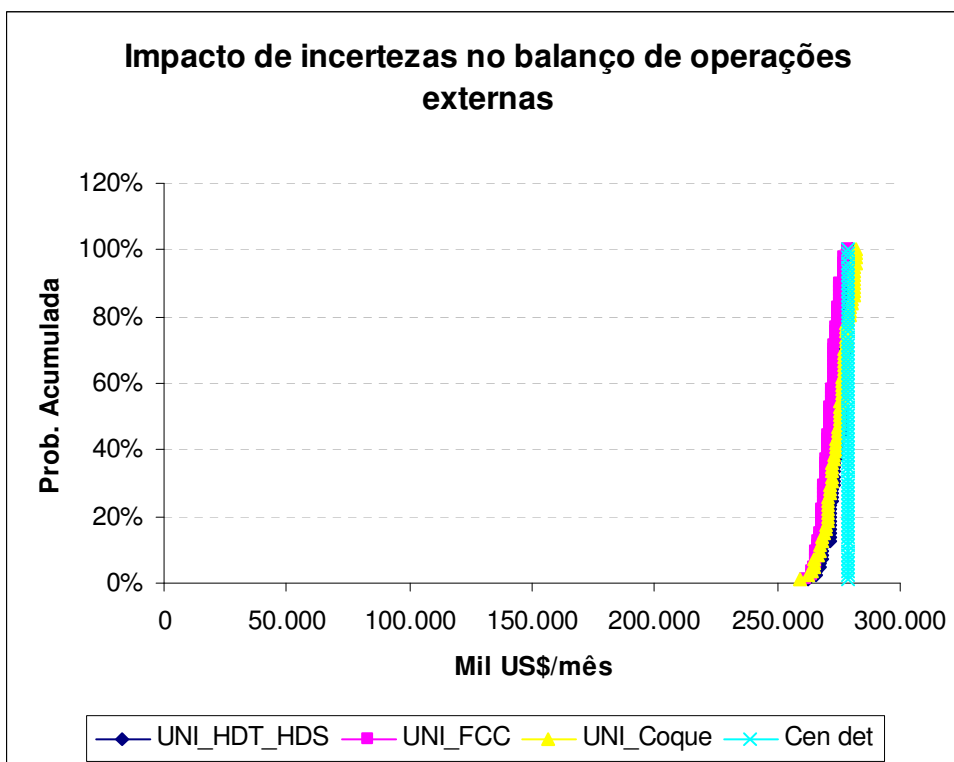


Gráfico 5.42 - Impacto de incertezas quanto à disponibilidade de unidades no balanço de operações externas



## **5.6. Resumo dos resultados associados à utilização de modelagem estocástica**

Como forma de resumir os resultados obtidos com o uso da modelagem estocástica são apresentados na Tabela 5.2, a seguir, os desvios padrão de cada informação analisada para cada caso em que incertezas foram consideradas. Um baixo desvio padrão é sinal de que a incerteza considerada tem pouca influência na informação analisada, e vice versa. Por exemplo, a incerteza quanto ao preço do diesel parece ser pouco crítica para a indicação de exportação de gasolina (o desvio padrão na indicação de exportação de gasolina foi de apenas 0,7 mil m<sup>3</sup>/mês quando considerou-se incerteza no preço do diesel) mas é muito crítica para a indicação de importação de diesel (o desvio padrão na indicação de importação de diesel foi de 95,1 mil m<sup>3</sup>/mês quando considerou-se incerteza no preço do diesel).

Para facilitar a visualização de quais incertezas são mais críticas para cada informação, na Tabela 5.2, foi associado um código de cores a um intervalo de valores para cada informação analisada. Pode-se perceber pela quantidade de células em amarelo e vermelho que, no que se refere a demanda e preço, as incertezas quanto ao diesel são as mais impactantes. Já com relação à utilização de unidades, a incerteza quanto à disponibilidade de unidades de tratamento é bastante crítica. Nenhum caso, no entanto, causou mais impacto nas informações analisadas do que aquele em que várias incertezas foram consideradas simultaneamente.

Analisando-se a tabela sob outra ótica, pelas linhas, os destaques ficam para a unidade de HDT, cuja indicação de utilização plena não parece ser abalada por qualquer incerteza, e para a unidade de HDS, bem mais vulnerável às incertezas analisadas. Com relação aos estoques e comercialização, novamente o diesel merece destaque: as indicações de formação de estoques de diesel e de importação do derivado parecem ser razoavelmente afetadas por algumas incertezas.

Tabela 5.2 – Desvio padrão das informações analisadas para cada incerteza considerada

| Informações Analisadas |                            | Parâmetro Incerto |         |        |         |         |        |                          |          |         |             |        |
|------------------------|----------------------------|-------------------|---------|--------|---------|---------|--------|--------------------------|----------|---------|-------------|--------|
|                        |                            | Demanda           |         |        | Preço   |         |        | Disponibilidade Unidades |          |         |             | VA = 7 |
|                        |                            | DEM_DSL           | DEM_GSL | DEM_OC | PRC_DSL | PRC_GSL | PRC_OC | UNI_Coque                | UNI_DEST | UNI_FCC | UNI_HDT_HDS |        |
| Utilização de Unidades | Destilação                 | 1,2%              | 0,2%    | 0,0%   | 1,4%    | 0,0%    | 0,4%   | 0,2%                     | 1,1%     | 0,5%    | 0,5%        | 3,2%   |
|                        | FCC                        | 0,4%              | 0,0%    | 0,0%   | 0,0%    | 0,0%    | 0,0%   | 0,0%                     | 0,0%     | 0,7%    | 0,0%        | 1,1%   |
|                        | Desasfaltação              | 0,2%              | 0,0%    | 0,0%   | 0,0%    | 0,0%    | 4,5%   | 5,7%                     | 0,0%     | 0,7%    | 2,9%        | 8,6%   |
|                        | Coque                      | 0,0%              | 0,0%    | 0,0%   | 0,0%    | 0,0%    | 0,0%   | 0,7%                     | 0,0%     | 0,0%    | 0,0%        | 1,5%   |
|                        | HDS                        | 2,1%              | 2,0%    | 0,5%   | 2,0%    | 0,7%    | 0,8%   | 2,4%                     | 0,0%     | 1,2%    | 6,7%        | 10,0%  |
|                        | HDT                        | 0,0%              | 0,0%    | 0,0%   | 0,0%    | 0,0%    | 0,0%   | 0,0%                     | 0,0%     | 0,0%    | 0,0%        | 0,0%   |
| Estoques               | Diesel                     | 9,9               | 0,1     | 0,2    | 6,0     | 0,8     | 6,6    | 2,8                      | 0,0      | 2,3     | 5,8         | 0,0    |
|                        | Gasolina                   | 0,0               | 6,7     | 0,0    | 3,7     | 10,2    | 7,0    | 2,0                      | 0,0      | 6,7     | 8,2         | 0,0    |
|                        | OC + Bunker                | 0,0               | 0,0     | 0,0    | 0,0     | 0,0     | 8,5    | 4,0                      | 0,0      | 0,0     | 0,5         | 0,0    |
| Comercialização        | Imp. Diesel                | 23,1              | 8,7     | 0,2    | 95,1    | 0,9     | 11,0   | 8,1                      | 0,0      | 16,3    | 26,7        | 0,0    |
|                        | Imp. Extra Diesel          | 22,0              | 0,0     | 0,0    | 0,0     | 0,0     | 0,0    | 0,0                      | 0,0      | 0,0     | 0,0         | 27,5   |
|                        | Exp. Gasolina              | 22,5              | 19,9    | 0,0    | 0,7     | 0,0     | 1,1    | 1,1                      | 0,0      | 19,7    | 1,6         | 57,6   |
|                        | Exp. OC + Bunker           | 34,1              | 0,2     | 15,2   | 13,9    | 0,0     | 24,7   | 8,0                      | 0,0      | 17,1    | 13,9        | 82,7   |
| Sumário Econômico      | Resultado Econômico        | 21,3              | 3,6     | 0,1    | 13,4    | 14,0    | 7,5    | 5,2                      | 0,0      | 3,4     | 3,7         | 37,9   |
|                        | Balanco Operações Externas | 77,3              | 20,1    | 9,0    | 13,1    | 14,0    | 7,5    | 5,2                      | 0,0      | 3,7     | 4,0         | 129,0  |

| Legenda       |                         |                       |                              |                                      |
|---------------|-------------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------------|
|               | Utilização Unidades (%) | Estoques (mil m3/mês) | Comercialização (mil m3/mês) | Sumário Econômico (Milhões US\$/mês) |
| Pouco crítico | 0 - 1%                  | 0 - 4                 | 0 - 20                       | 0 - 10                               |
| Crítico       | 1% - 3%                 | 4 - 8                 | 20 - 50                      | 10 - 20                              |
| Muito crítico | > 3%                    | > 8                   | > 50                         | > 20                                 |

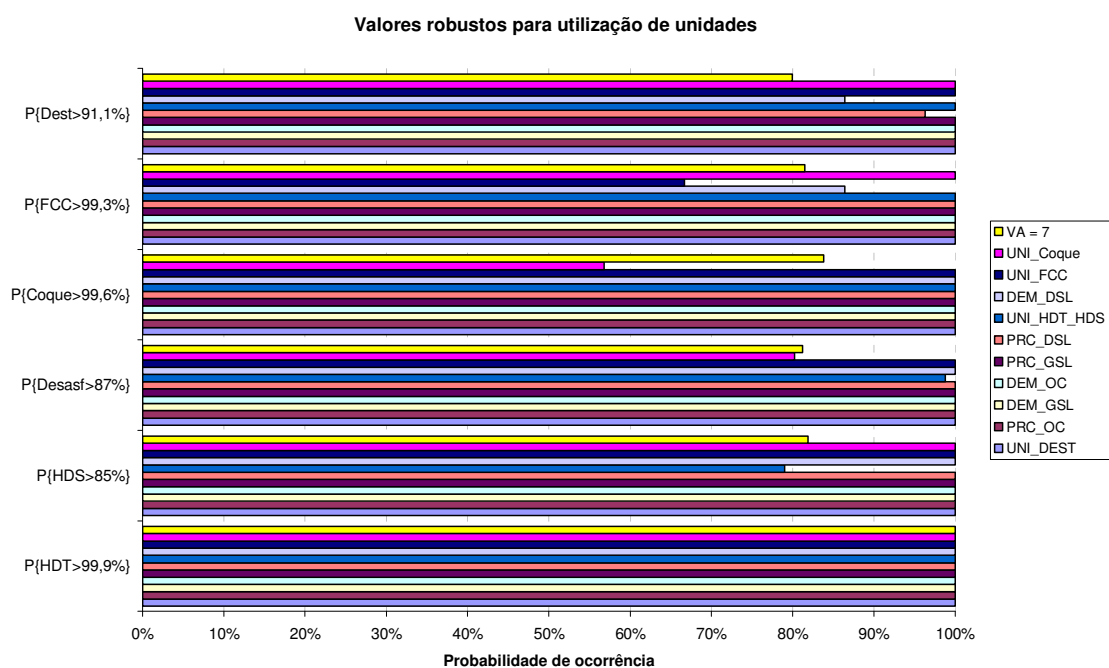
Para complementar o resumo dos resultados obtidos com o uso da modelagem estocástica são apresentados, a seguir, uma análise da robustez de alguns valores relacionados às informações anteriormente utilizadas para se medir os impactos das incertezas, o valor econômico de se utilizar modelagem estocástica ao invés da determinística e o esforço computacional exigido em cada caso analisado.

### 5.6.1. Valores robustos para as informações analisadas

Além de permitir perceber a amplitude das variações nas diversas variáveis que compõem o sistema, a utilização de modelos estocásticos possibilita se enxergar alguns valores como robustos para as variáveis, ou seja, valores verificados na maioria dos cenários, mesmo na presença de diversas incertezas.

Nesta seção serão, então, apresentados alguns gráficos que ratificam alguns valores como robustos para as informações de utilização de unidades, estoques de derivados, comercialização de derivados e resultado econômico analisadas nas seções anteriores. Um determinado valor foi considerado robusto se em pelo menos 85% dos

cenários ele se verifica. Vale destacar que os cenários do caso em que várias incertezas foram consideradas simultaneamente ( $VA = 7$ ) foram expurgados do cálculo dos valores robustos relacionados aos estoques de derivados, importação de diesel e resultado econômico. Como para o caso  $VA = 7$  foi otimizado apenas um período (dois estágios), não existe formação de estoques (já que não há períodos subsequentes para ser consumido), e o fato da demanda por diesel no primeiro período ser razoavelmente inferior a dos períodos seguintes, as indicações de importação de diesel e resultado econômico estão em um patamar diferente dos outros casos, dificultando a comparação conforme já mencionado anteriormente.



**Gráfico 5.43 – Probabilidade da utilização de unidades superar um valor mínimo robusto para cada caso**

O conhecimento de um nível mínimo robusto de utilização para cada unidade de processo é importante no planejamento da produção, dimensionamento dos recursos necessários ao processo produtivo e estabelecimento de metas. O Gráfico 5.43 acima mostra, para cada unidade de processo ou tratamento, a probabilidade da indicação de utilização superar um determinado valor em cada caso, onde incertezas são consideradas.

A probabilidade da unidade de destilação superar o nível de 91,1% de utilização é de 100% em oito dos onze casos analisados. Mesmo no caso em que várias incertezas são consideradas simultaneamente (o caso com menor probabilidade verificada) o nível

de 91,1% foi superado em cerca de 80% dos cenários. A elevada probabilidade de ocorrência, considerando-se todos os cenários analisados, faz dos 91,1% um nível mínimo de utilização bastante robusto para a unidade de destilação.

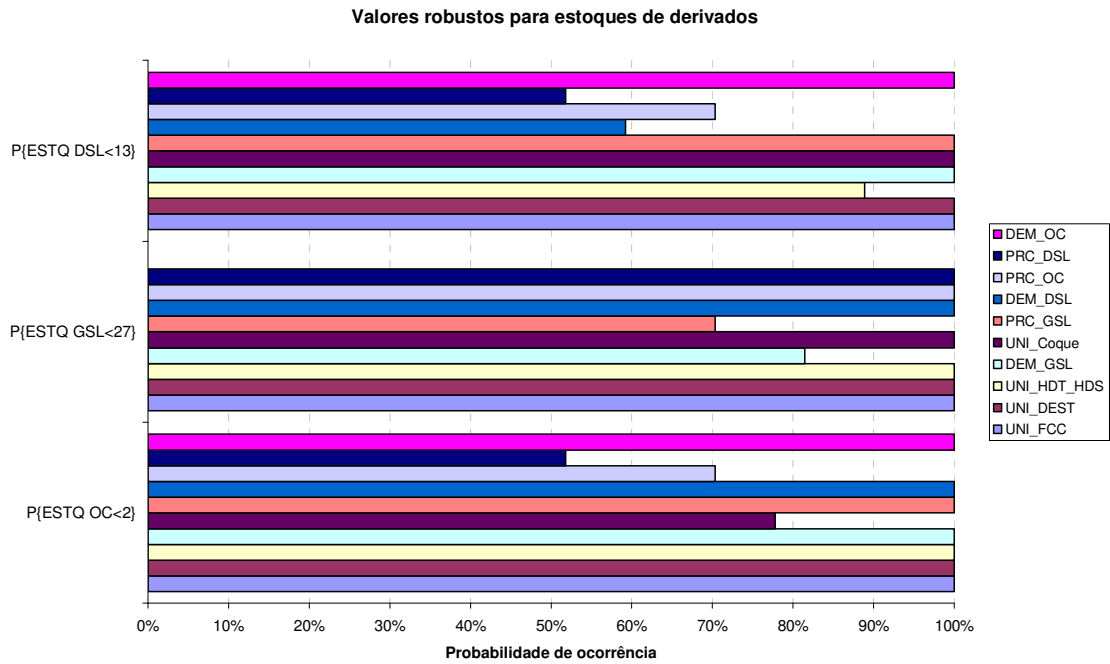
O nível de 99,3% de utilização para a unidade de FCC foi superado em 100% das vezes também em oito dos casos analisados e, no caso em que sete incertezas foram analisadas simultaneamente, esse nível foi superado em 81% dos cenários, de modo que é bastante robusto considerar um nível mínimo de utilização do FCC de 99,3%. Um nível ainda mais alto (99,6%) se revela bastante robusto para a unidade de coque. Além do caso VA = 7, apenas no caso em que se considerou variação na disponibilidade do coque a indicação de utilização não superou os 99,6% em todos os cenários, mesmo assim em cerca de 87% dos 2997 cenários analisados (foram 10 casos com 81 cenários cada e um caso com 2187 cenários) a indicação de utilização foi maior que 99,6%. Para a unidade de desasfaltação, um nível mínimo de 87% de utilização parece ser robusto, já que é superado em cerca de 85% do total de 2997 cenários analisados.

Com relação às unidades de tratamento, o destaque é indicação bastante robusta de saturação da unidade de HDT, o que foi verificado em 100% dos 2997 cenários analisados. Já para o HDS uma indicação mínima robusta fica em torno de 85% de utilização.

O Gráfico 5.44 a seguir valida alguns valores como robustos para serem considerados como limitantes superiores para os estoques de derivados. Em cerca de 105 dos 810 cenários analisados<sup>22</sup> o estoque médio de diesel ultrapassou o limite de 13 mil m<sup>3</sup>/mês, principalmente no caso de incerteza quanto à demanda do produto. Com relação ao estoque de gasolina, um limite máximo robusto seria em torno de 27 mil m<sup>3</sup>/mês, volume que foi superado em apenas 13% do total de cenários. Já para o óleo combustível, a indicação de formação de estoque médio mensal superior a 2 mil m<sup>3</sup> só ocorreu em 81 cenários ou 10% do total. Isto faz deste volume um limitante máximo bem robusto para o nível de estoque do derivado.

---

<sup>22</sup> Para a análise das indicações de formação de estoques não foi considerado o caso VA = 7, os seja, foram considerados 10 casos com 81 cenários cada.

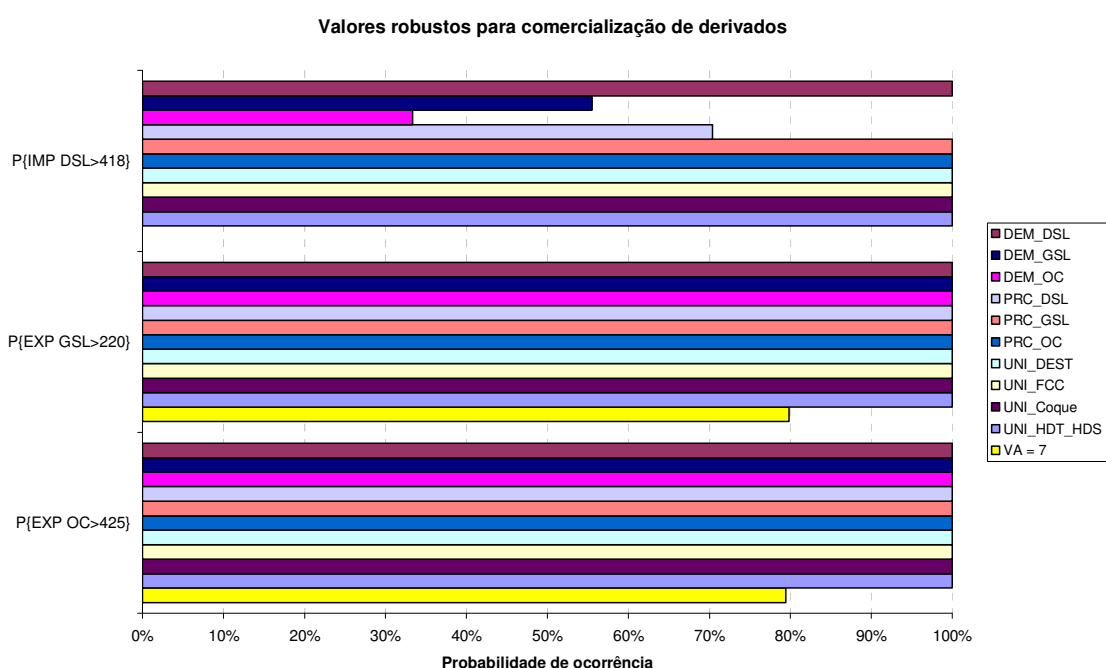


**Gráfico 5.44 - Probabilidade da indicação de formação de estoques ser abaixo de um nível máximo robusto para cada caso**

No Gráfico 5.45 são mostradas as probabilidades da importação ou exportação de um dado derivado ultrapassar alguns valores mínimos considerados robustos. A importância de se conhecer estes valores está associada à possibilidade de se efetuar contratos comerciais para os produtos, garantindo o suprimento e, para os produtos importados, um preço mais baixo que o que se espera conseguir no mercado spot e/ou garantindo a venda e um preço esperado mais elevado para produtos exportados.

Em cerca de 86% dos cenários em que incertezas foram consideradas individualmente, a indicação média mensal de importação de diesel superou o patamar de 418 mil m<sup>3</sup>. Já para o caso em que várias incertezas foram consideradas, em nenhum dos 2187 cenários houve indicação de importação acima de 418 mil m<sup>3</sup>. No entanto, conforme já comentado, isso está relacionado ao fato de que, nesse caso, foi considerado apenas o primeiro período, quando a demanda média de diesel é cerca de 240 mil m<sup>3</sup> menor que a média dos outros três períodos seguintes. Visto que essa diferença de demanda é bastante grande e a indicação de importação está diretamente ligada à demanda, expurgou-se o caso VA = 7 desta análise para que o elevado número de cenários deste caso não influenciasse no resultado. Assim, o volume de 418 mil m<sup>3</sup>/mês parece bem robusto para ser considerado como importação mínima.

Com relação às exportações de gasolina, em todos os cenários em que as incertezas foram analisadas em separado a indicação de exportação do derivado ultrapassou o volume de 220 mil m<sup>3</sup>/mês. Entretanto, quando várias incertezas passam a agir, esse limite é superado em 80% dos cenários. Considerando o total de cenários analisados, em cerca de 85% deles as exportações de gasolina superaram 220 mil m<sup>3</sup>/mês, o que faz deste um valor robusto. Para as exportações de óleo combustível e bunker, os mesmos 85% de verificação ocorrem para um nível de 425 mil m<sup>3</sup>/mês e, então, este pode ser considerado uma indicação robusta quanto ao mínimo a ser exportado do produto.



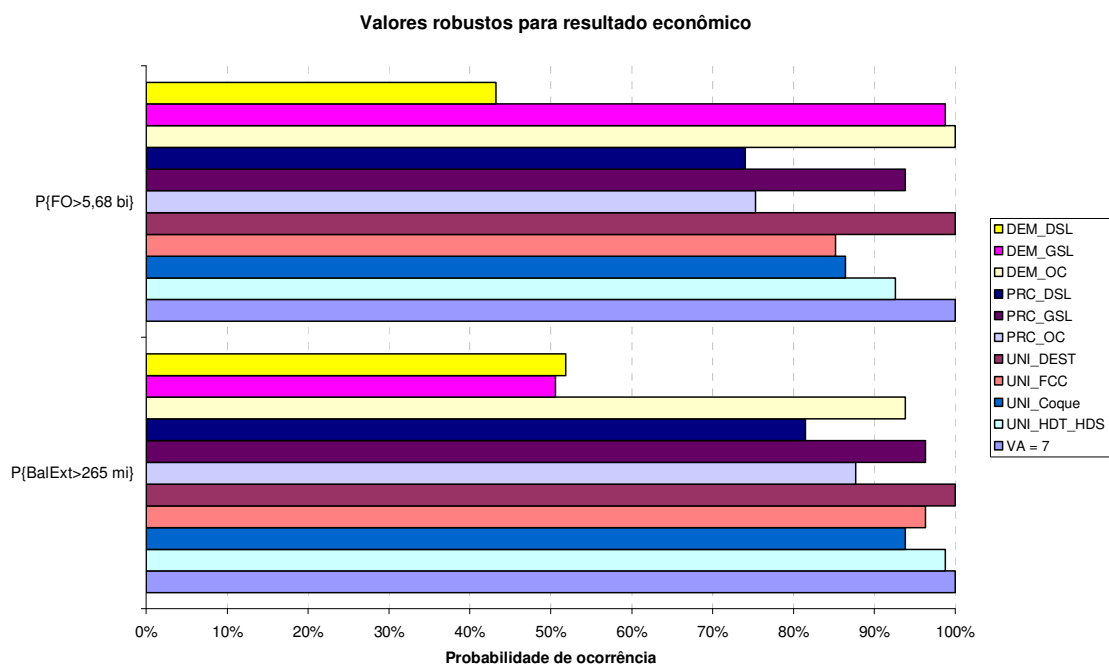
**Gráfico 5.45 - Probabilidade da indicação de comercialização de derivados superar um nível mínimo em cada caso**

Poder estimar com alguma robustez um valor mínimo para o resultado econômico da empresa é importante em seu planejamento financeiro e na busca por parcerias e investimentos.

O Gráfico 5.46 mostra que em apenas 4% do total dos 3078 cenários avaliados o resultado econômico médio mensal foi inferior a US\$ 5,68 bilhões, sendo que isso ocorreu com maior frequência no caso em havia incerteza quanto à demanda de diesel. No caso em que sete incertezas foram consideradas simultaneamente (caso com alto peso no resultado dada a grande quantidade de cenários considerados), em todos os 2187 cenários o resultado econômico ultrapassou os US\$ 5,68 bilhões. Para não

influenciar no cálculo do valor robusto do resultado econômico e do balanço de operações externas, o caso VA = 7 foi desconsiderado, visto que para este caso foi otimizado apenas o primeiro período, quando a demanda de diesel e, conseqüentemente, a importação do derivado foi menor que nos períodos seguintes. Ainda assim, o valor de US\$ 5,68 bilhões é superado por cerca de 85% dos 810 cenários restantes, o que o torna um valor mínimo robusto.

Um valor que parece robusto para o resultado mínimo do balanço de operações externas gira em torno de US\$ 265 milhões/mês, visto que em 85% dos 810 cenários este foi superado. Novamente as incertezas quanto à demanda de diesel, juntamente com as relacionadas à demanda de gasolina, foram as grandes responsáveis pelos cenários em que isso não aconteceu.



**Gráfico 5.46 Probabilidade do resultado econômico superar um nível mínimo em cada caso**

### 5.6.2. Valor da modelagem estocástica

Com o intuito de se quantificar o ganho econômico de se utilizar programação estocástica ao invés de determinística, foram calculados o VSS e EVPI para cada um dos onze casos estocásticos analisados, conforme mostrado na Tabela 5.3 a seguir.

O valor da solução estocástica (VSS) para o caso em que existem várias incertezas é o maior de todos, superior a US\$ 6 milhões. Apesar de haver alguns *hedges* naturais<sup>23</sup>, com o aumento do número de incertezas, é de grande valia poder estimar uma solução que seja razoavelmente boa considerando-se todas as possíveis ocorrências. Chama a atenção, também, na tabela abaixo o valor da informação perfeita quanto à demanda de diesel (superior a US\$ 70 milhões), alertando para o potencial de ganho em se aprimorar as técnicas de previsão de vendas do produto. Utilizar programação estocástica também tem alto valor considerando-se que existem incertezas quanto à disponibilidade de unidades como HDT, HDS e FCC. Já o uso de modelagem estocástica para se levar em consideração incertezas quanto à demanda de óleo combustível, disponibilidade de destilação e preço da gasolina, por influenciar pouco na solução, apresentaram valores inferiores a US\$ 50 mil.

**Tabela 5.3 – Valor da solução estocástica e sob informação perfeita em cada caso**

| Caso        | VSS         | EVPI         |
|-------------|-------------|--------------|
| VA = 7      | 6.063.142,6 | 22.252.248,0 |
| DEM_DSL     | 5.881.533,9 | 73.796.197,3 |
| UNI_HDT_HDS | 3.848.934,0 | 6.691.009,8  |
| UNI_FCC     | 2.256.728,9 | 11.743.686,0 |
| PRC_OC      | 847.277,7   | 5.675.719,9  |
| UNI_Coque   | 666.694,0   | 7.533.152,0  |
| DEM_GSL     | 347.234,3   | 1.584.779,2  |
| PRC_DSL     | 185.670,7   | 1.111.713,2  |
| DEM_OC      | 49.635,7    | 832.184,8    |
| UNI_DEST    | 27.824,1    | 803.683,7    |
| PRC_GSL     | -           | 1.069.301,2  |

### 5.6.3. Esforço computacional

Na Tabela 5.4 fica bastante claro como o problema cresce com o aumento do número de incertezas. No caso determinístico havia 9.260 variáveis e 10.146 restrições, exigindo do computador<sup>24</sup> 0,3 segundos para a otimização. Ao se considerar apenas uma

---

<sup>23</sup> Em uma empresa integrada do setor de petróleo existem alguns mecanismos naturais de proteção, como por exemplo reduzir refino e aumentar a venda de óleo cru em momentos de margens de refino baixas, e vice versa, maximizar a produção de um derivado em detrimento de outros dependendo do valor relativo entre eles, etc.

<sup>24</sup> Os modelos foram rodados em um computador com processador Core2Duo E6750 2.66GHz e com memória RAM de 8GB.



incerteza, o número de variáveis e restrições passa a ser 30 vezes maior que no caso base e o tempo de otimização, que era inferior a 1 segundo, aumenta para mais de 40 segundos. Quando o número de incertezas aumenta para sete, a quantidade de variáveis e restrições é multiplicada por mais de 500 se comparado ao cenário determinístico e o tempo passa para, aproximadamente, uma hora e dez minutos.

**Tabela 5.4 – Número de restrições, variáveis e tempo para otimização em cada caso**

| <b>Caso</b> | <b>Restrições</b> | <b>Variáveis</b> | <b>Tempo (seg)</b> |
|-------------|-------------------|------------------|--------------------|
| Cen det     | 10.146            | 9.260            | 0,3                |
| DEM_DSL     | 300.262           | 275.248          | 43,5               |
| DEM_GSL     | 300.262           | 275.248          | 43,6               |
| DEM_OC      | 300.262           | 275.248          | 43,0               |
| PRC_DSL     | 301.462           | 276.448          | 46,8               |
| PRC_GSL     | 300.862           | 275.848          | 44,3               |
| PRC_OC      | 301.462           | 276.448          | 43,1               |
| UNI_HDT_HDS | 300.502           | 275.488          | 47,4               |
| UNI_FCC     | 300.382           | 275.368          | 46,7               |
| UNI_Coque   | 300.382           | 275.368          | 49,3               |
| UNI_DEST    | 300.382           | 275.368          | 48,9               |
| VA = 7      | 5.522.263         | 5.067.367        | 4143,7             |

## 6. Considerações Finais

Neste trabalho, com o intuito de se propor uma abordagem quantitativa para a consideração de incertezas no Plano de Abastecimento de uma empresa do setor de petróleo, foram utilizadas técnicas de programação estocástica, mais especificamente, modelos de recursos de dois e multi estágios, em que os valores dos parâmetros estocásticos foram descritos através de distribuições discretas, sendo as incertezas, então, representadas através de um número finito de cenários. O problema estocástico foi, então, transformado em um problema equivalente determinístico. A ferramenta utilizada para a construção e solução dos modelos foi o XPRESS-MP em função da facilidade de modelagem e análise visual dos resultados, da capacidade de solução de problemas grandes e da existência de um módulo para se trabalhar com problemas estocásticos.

O sistema real foi representado através de um modelo simplificado determinístico. Este modelo foi utilizado como base de comparação para se analisar os resultados obtidos com os onze modelos estocásticos, sendo dez modelos de recurso multi estágios e um de dois estágios. Os parâmetros considerados aleatórios foram demanda e preço de diesel, gasolina e óleo combustível e disponibilidade de unidades de destilação, FCC, coque e tratamento. Nos casos multi estágios, cada um desses parâmetros foi tratado como aleatório individualmente, totalizando-se dez modelos. No único caso de dois estágios foram considerados sete parâmetros como estocásticos simultaneamente.

Para se verificar o impacto das incertezas, algumas informações foram escolhidas para serem analisadas: utilização de unidades (destilação, FCC, desasfaltação, coque, HDS e HDT), comercialização e estoques de diesel, gasolina e óleos combustíveis, e resultado econômico.

Verificou-se que algumas incertezas, como por exemplo a demanda de óleo combustível e a disponibilidade da unidade de destilação, parecem não afetar muito as indicações, enquanto outras, como por exemplo a demanda e o preço de diesel e a disponibilidade de unidades de tratamento, são bem mais impactantes, não devendo ser negligenciadas. Mais crítico ainda se mostrou o efeito combinado de várias incertezas sendo consideradas simultaneamente. Por mais que se trate de uma empresa verticalmente integrada, com negócios desde a extração do petróleo até a venda dos

produtos acabados e, sendo assim, fazendo-se valer de alguns *hedges* naturais, o impacto simultâneo de incertezas mostrou-se bastante significativo em várias das informações analisadas, inclusive no resultado econômico. O valor do VSS calculado para o caso de várias incertezas simultâneas também corrobora a importância de se considerar vários parâmetros aleatórios ao mesmo tempo. Apesar deste valor se tornar pequeno se comparado ao resultado econômico, cerca de US\$ 6 milhões/mês ou mais de US\$ 70 milhões/ano não é desprezível.

Com a metodologia adotada neste trabalho para a incorporação de incertezas, em que o problema estocástico é transformado em um equivalente determinístico estendido, ficou evidente o aumento exponencial do tamanho do problema com o crescimento do número de estágios e/ou de parâmetros incertos. Para se ter um modelo tratável computacionalmente passa a ser preciso optar entre um maior número de estágios ou mais parâmetros estocásticos. Neste trabalho essas duas alternativas foram testadas. Apesar de o Plano de Abastecimento da Petrobras possuir um horizonte de doze meses, ele é atualizado mensalmente com novas informações. Ter um plano com um horizonte mais longo, mas com uma única incerteza considerada, parece menos útil do que ter um plano curto, mas considerando-se as incertezas quanto aos parâmetros mais críticos, o que o tornaria robusto o suficiente para suportar as incertezas compreendidas entre sua elaboração e a nova atualização. Sendo assim, a consideração de um maior número de parâmetros incertos se mostra mais importante do que um horizonte mais amplo.

Para se considerar várias incertezas sem prescindir de um amplo horizonte pode-se adotar uma metodologia diferente para a incorporação de incertezas. Existem na literatura<sup>25</sup> algumas abordagens para a solução de problemas de programação estocástica de grande porte como técnicas baseadas em decomposição (que exploram a estrutura matricial do problema e reduzem seu tamanho), em aproximações seqüenciais (que reduzem a região viável das variáveis aleatórias a partições cada vez menores), em agregação, *sampling* e métodos heurísticos. O estudo mais aprofundado dessas técnicas fica aqui sugerido como trabalho futuro e pode revelar a possibilidade de se trabalhar com problemas reduzidos, que exigem menos esforço computacional, viabilizando planos longos e robustos.

---

<sup>25</sup> Ver (Ermoliev e Wets, 1988), (Birge e Louveaux, 1997), (Dupacová, Consigli *et al.*, 2000), (Shapiro e Nemirovski, 2005), (Shapiro, 2006).

## 7. Referências Bibliográficas

Al-Othman, W. B. E., H. M. S. Lababidi, *et al.* Supply chain optimization of petroleum organization under uncertainty in market demands and prices. European Journal of Operational Research, v.189, p.822 - 840. 2008.

Araújo, L. R. Análise sobre a Atratividade do Upstream da Indústria de Petróleo Brasileira (1997 – 2003). (Monografia). Instituto de Economia, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, Rio de Janeiro, RJ, 2004. 83 p.

Beale, E. M. L. On minimizing a convex function subject to linear inequalities. Journal of the Royal Statistical Society, v.17B, p.173 - 184. 1955.

Beraldi, P., D. Conforti, *et al.* A two-stage stochastic programming model for electric energy producers. Computers & Operations Research, v.35, p.3360 - 3370. 2008.

Berkelaar, A., C. Dert, *et al.* A primal-dual decomposition-based interior point approach to two-stage stochastic linear programming. Operations Research, v.50, p.904 - 915. 2002.

Birge, J. R. Decomposition and partitioning methods for multi-stage stochastic linear programs. Operations Research, v.33, p.989 - 1007. 1985.

Birge, J. R. e F. Louveaux. Introduction to Stochastic Programming. New York: Springer-Verlag. 1997

Bortolossi, H. J. e B. K. Pagnoncelli. Introdução à Otimização sob Incerteza. XI Simpósio de Pesquisa Operacional e Logística da Marinha. Rio de Janeiro, RJ 2008.

Bueno, C. Planejamento Operacional de Refinarias. (Mestrado). Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2003. 110 p.

Carneiro, M. C. T. Otimização sob incerteza de carteiras de investimentos: aplicação à cadeia integrada de petróleo e derivados. Departamento de Engenharia Industrial, PUC - Rio, Rio de Janeiro, 2008. 106 p.

Chen, C.-L. e W.-C. Lee. Multi-objective optimization of multi-echelon supply chain networks with uncertain product demands and prices. Computers and Chemical Engineering, v.28, p.1131 - 1144. 2004.

Cheng, L. e M. Duran. World-wide crude transportation logistics: a decision support system based on simulation and optimization. Proceedings of Fourth International Conference on Foundations of Computer-Aided Process Operations. Coral Springs: CACHÉ, 2003. 273 - 280 p.

\_\_\_\_\_. Logistics for world-wide crude oil transportation using discrete event simulation and optimal control. Computers and Chemical Engineering, v.28, p.897 - 911. 2004.

Consigli, G. e M. A. H. Dempster. Dynamic Stochastic Programming for asset-liability management. Annals of Operations Research, v.81, p.131 - 161. 1998.

Cormican, K. J., D. P. Morton, *et al.* Stochastic Network Interdiction. Operations Research, v.46, p.184 - 197. 1998.

Dantzig, G. B. Linear programming under uncertainty. Management Science, v.1, p.197 - 206. 1955.

Dantzig, G. B. e G. Infanger. Multi-Stage Stochastic Linear Programs for Portfolio Optimization. Annals of Operations Research, v.45, p.59 - 76. 1993.

Dash\_Optimization. Xpress-SP: Reference Manual: Fair Isaac Corporation, v.1.3.2. 2006

\_\_\_\_\_. Xpress-MP: Getting Started: Fair Isaac Corporation. 2008. 110 p.

Dempster, M. A. H., N. H. Pedrón, *et al.* Planning logistics operations in the oil industry. Journal of the Operational Research Society, v.51, p.1271 - 1288. 2000.

Dormer, A., A. Vazacopoulos, *et al.* Modeling & Solving Stochastic Programming Problems in Supply Chain Management Using Xpress-SP In: (Ed.). Supply Chain Optimization. New Jersey, USA: Springer US, v.98, 2006. Modeling & Solving Stochastic Programming Problems in Supply Chain Management Using Xpress-SP p.307 - 354

Dupacová, J. Stochastic programming: Approximation via scenarios. Department of Probability and Mathematical Statistics, Charles University, Prague, Czech Republic, 1996. 20 p.

Dupacová, J., G. Consigli, *et al.* Scenarios for Multistage Stochastic Programs. Annals of Operations Research, v.100, p.25 - 53. 2000.

Dupacová, J., N. Gröwe-Kuska, *et al.* Scenario reduction in stochastic programming. Mathematical Programming, v.95, n.3, p.493 - 511. 2003.

Ermoliev, Y. e R. J.-B. Wets. Numerical Techniques for Stochastic Optimization: Springer-Verlag New York Berlin Heidelberg, v.10. 1988. 592 p.

Escudero, L. F. e P. V. Kamesam. On Solving Stochastic Production Planning Problems via Scenario Modelling. TOP, v.3, n.1, p.69 - 95. 1995.

Escudero, L. F., P. V. Kamesam, *et al.* Production planning via scenario modelling. Annals of Operations Research, v.43, p.311 - 335. 1993.

Escudero, L. F., F. J. Quintana, *et al.* CORO, a modeling and an algorithmic framework for oil supply, transformation and distribution optimization under uncertainty. European Journal of Operational Research, v.114, p.638 - 656. 1999.

Gainsborough, M. Building World-class Supply Chain Capability in the Downstream Oil Business Oil & Gas Processing Review: 29 - 32 p. 2006.

Gröwe-Kuska, N., K. C. Kiwiel, *et al.* Power management in a hydro-thermal system under uncertainty by Lagrangian relaxation. In: C. Greengard e A. Ruszczynski (Ed.). Decision Making under Uncertainty: Energy and Power. New York: Springer-Verlag New York, v.128, 2002. Power management in a hydro-thermal system under uncertainty by Lagrangian relaxation, p.39 - 70

Gupta, A. e C. D. Maranas. A Two-Stage Modeling and Solution Framework for Multisite Midterm Planning under Demand Uncertainty. Industrial and Engineering Chemistry Research, v.39, p.3799 - 3813. 2000.

\_\_\_\_\_. Managing demand uncertainty in supply chain planning. Computers and Chemical Engineering, v.27, p.1219 - 1227. 2003.

Høyland, K. e S. W. Wallace. Generating Scenario Trees for Multistage Decision Problems. Management Science, v.47, n.2, p.295 - 307. 2001.

Hsieh, S. e C. C. Chiang. Manufacturing-to-Sale Planning Model for Fuel Oil Production. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.18, p.303 - 311. 2001.

Huang, X. Chance-constrained programming models for capital budgeting with NPV as fuzzy parameters. Journal of Computational and Applied Mathematics, v.198, p.149 - 159. 2007.

Hussain, R., T. Assavapokee, *et al.* Supply Chain Management in the Petroleum Industry: Challenges and Opportunities. International Journal of Global Logistics & Supply Chain Management, v.1, n.2, p.90 - 97. 2006.

Hvattum, L. M. e A. Løkketangen. Solving a Dynamic and Stochastic Vehicle Routing Problem with a Sample Scenario Hedging Heuristic. TRANSPORTATION SCIENCE, v.40, n.4, p.421 - 438. 2006.

Iakovou, E. T. An interactive multiobjective model for the strategic transportation of petroleum products: risk analysis and routing. Safety Science, v.39, p.19 - 29. 2001.

Infanger, G. PLANNING UNDER UNCERTAINTY - Solving Large-Scale Stochastic Linear Programs. STANFORD UNIVERSITY. STANFORD, CALIFORNIA. 1992

Jia, Z. e M. Ierapetritou. Mixed-Integer Linear Programming Model for Gasoline Blending and Distribution Scheduling. Industrial and Engineering Chemistry Research, v.42, p.825 - 835. 2003.

Joly, M., L. F. L. Moro, *et al.* Planning and scheduling for petroleum refineries using mathematical programming. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.19, n.2. 2002.

Kall, P. e S. W. Wallace. Stochastic Programming. New York: JohnWiley & Sons. 1994

Kaut, M. e S. Wallace. Evaluation of scenario-generation methods for stochastic programming: The Stochastic Programming E-Print Series (SPEPS) 2003.

Khor, C. S., A. Elkamel, *et al.* Two-stage stochastic programming with fixed recourse via scenario planning with economic and operational risk management for petroleum refinery planning under uncertainty. Chemical Engineering and Processing, v.47, p.1744 - 1764. 2008.

Kimura, R. M. Indústria Brasileira de Petróleo: uma análise da cadeia de valor agregado. (Monografia). Instituto de Economia, Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2005. 104 p.

Kuhn, D. Aggregation and Discretization in Multistage Stochastic Programming. St. Gallen, Switzerland: University of St. Gallen: 43 p. 2005.

Lababidi, H. M. S., M. A. Ahmed, *et al.* Optimizing the Supply Chain of a Petrochemical Company under Uncertain Operating and Economic Conditions. Industrial and Engineering Chemistry Research, v.43, n.1, p.63 - 73. 2004.

Landeghem, H. V. e H. Vanmaele. Robust planning: a new paradigm for demand chain planning. Journal of Operations Management, p.769 - 783. 2002.

Laporte, G., F. Louveaux, *et al.* An integer L-shaped algorithm for the capacitated vehicle routing problem with stochastic demands. Operations Research, v.50, p.415 - 423. 2002.

Lee, H., J. M. Pinto, *et al.* Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management. Industrial and Engineering Chemistry Research, v.35, n.5, p.1630 - 1641. 1996.

Li, P., M. Wendt, *et al.* Optimal Operations Planning under Uncertainty by Using Probabilistic Programming. Foundations of Computer-Aided Process Operations (FOCAPO2003). Coral Springs, FL 2003.

Li, W. K., C. W. Hui, *et al.* Refinery Planning under Uncertainty. Industrial and Engineering Chemistry Research, v.43, p.6742 - 6755. 2004.

Liu, B. Theory and Practice of Uncertain Programming. Beijing, China: <http://orsc.edu.cn/liu/up.pdf>. 2008

Lu, C. e X.-W. Li. Supply Chain Modeling Using Fuzzy Sets and Possibility Theory in an Uncertain Environment. 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. Dalian, China, 2006. 3608 - 3612 p.

Magatão, L., L. V. R. Arruda, *et al.* A mixed integer programming approach for scheduling commodities in a pipeline. ESCAPE – 12 proceedings. The Hague (NL), 2002. 715 - 720 p.

Manzano, F. S. Supply Chain Practices in the Petroleum Downstream. (Mestrado). Engineering Systems Massachusetts Institute of Technology, 2005. 59 p.

Más, R. e J. M. Pinto. A Mixed-Integer Optimization Strategy for Oil Supply in Distribution Complexes. Optimization and Engineering, v.4, p.23 - 64. 2003.



Moro, L. F. L., A. C. Zanin, *et al.* A Planning Model for Refinery Diesel Production. Computers and Chemical Engineering, v.22, n.Suppl., p.S1039 - S1042. 1998.

Morton, D. P. e K. J. Saegar. Models for Nuclear Smuggling Interdiction. In: J. L. Hagle e W. Römisch (Ed.). Stochastic Programing E-Print Series (SPEPS), 2006. Models for Nuclear Smuggling Interdiction

Mula, J., R. Poler, *et al.* Models for production planning under uncertainty: A review. International Journal of Production Economics v.103, p.271 - 285. 2006.

Neiro, S. M. S. e J. M. Pinto. Supply Chain Optimization of Petroleum Refinery Complexes. FOCAPO2003. Coral Springs. 12 - 15 de janeiro, 2003. p.

\_\_\_\_\_. A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains. Computers and Chemical Engineering, v.28, p.871 - 896. 2004.

\_\_\_\_\_. Multiperiod Optimization for Production Planning of Petroleum Refineries Chemical Engineering Communications, v.192, n.1, p.62 - 88. 2005.

\_\_\_\_\_. Lagrangean decomposition applied to multiperiod planning of petroleum refineries under uncertainty Latin American Applied Research, v.36, n.4, p.213 - 220. 2006.

Ntaimo, L. e S. Sen. A comparative study of decomposition algorithms for stochastic combinatorial optimization. Computational Optimization and Applications Journal. 2006.

Peidro, D., J. Mula, *et al.* Supply chain planning under uncertainty: a fuzzy linear programming approach. Fuzzy Systems Conference, 2007 - FUZZ-IEEE 2007: IEEE International: 1 - 6 p. 2007.

Petrobras. Relatório Anual. Petrobras S.A. Rio de Janeiro, RJ. 2007

Petrovic, D. Simulation of supply chain behaviour and performance in an uncertain environment. International Journal of Production Economics, v.71, p.429 - 438. 2001.

Petrovic, D., R. Roy, *et al.* Supply chain modelling using fuzzy sets. International Journal of Production Economics, v.59, p.443 - 453. 1999.

Pinto, J. M., M. Joly, *et al.* Planning and scheduling models for refinery operations. Computers and Chemical Engineering, v.24, p.2259 - 2276. 2000.

Pinto, J. M. e L. F. L. Moro. A Planning Model for Petroleum Refineries. Brazilian Journal of Chemical Engineering, v.17, n.4 - 7. 2000.

Pongsakdia, A., P. Rangsunvigita, *et al.* Financial risk management in the planning of refinery operations. International Journal of Production Economics v.103, n.1, p.64 - 86. 2006.

Ponnambalam, K., A. Vannelli, *et al.* An interior point method implementation for solving large planning problems in the oil refinery industry. Canadian Journal of Chemical Engineering, v.70, n.2, p.368 - 374. 2002.

Riis, M. Classical and Non-Classical Stochastic Recourse Programs with Applications in Telecommunications. Department of Operations Research, University of Aarhus, Aarhus, Denmark, 2003. 181 p.

Riis, M. e K. A. Andersen. Multiperiod capacity expansion of a telecommunications connection with uncertain demand. Computers & Operations Research, v.31, p.1427 - 1436. 2004.

Riis, M., A. J. V. Skriver, *et al.* Internet protocol network design with uncertain demand. Working Paper 2003/2: University of Aarhus, Department of Operations Research 2003.

Ross, A. D. Performance-based strategic resource allocation in supply networks. International Journal of Production Economics v.63, n.3, p.255 - 266. 2000.

Sahinidis, N. V. Optimization under uncertainty: State-of-the-art and opportunities. Computers and Chemical Engineering, v.28, p.971 - 983. 2004.

Santoso, T., S. Ahmed, *et al.* A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. European Journal of Operational Research, v.167, p.96 - 115. 2005.

Sear, T. N. Logistics planning in the downstream oil industry. Journal of the Operational Research Society, v.44, n.1, p.9 - 17. 1993.

Shapiro, A. On complexity of multistage stochastic programs. Operations Research Letters, v.34, p.1 - 8. 2006.

Shapiro, A. e A. Nemirovski. On complexity of stochastic programming problems. In: V. Jeyakumar e A. M. Rubinov (Ed.). Continuous Optimization: Current Trends and Applications. New York: Springer, 2005. On complexity of stochastic programming problems, p.111 - 144

Shapiro, A. e A. Philpott. A Tutorial on Stochastic Programming. [http://www2.isye.gatech.edu/people/faculty/Alex\\_Shapiro/TutorialSP.pdf](http://www2.isye.gatech.edu/people/faculty/Alex_Shapiro/TutorialSP.pdf) 2007.

Shapiro, A. e A. Ruszczyński. Lectures on Stochastic Programming. [http://www2.isye.gatech.edu/people/faculty/Alex\\_Shapiro/SPbook.pdf](http://www2.isye.gatech.edu/people/faculty/Alex_Shapiro/SPbook.pdf) 2008.

Singh, K., A. Philpott, *et al.* Dantzig-Wolfe decomposition for solving multi-stage stochastic capacity-planning problems: Department of Engineering Science, University of Auckland 2007.

Snyder, L. V. e M. Z.-J. Shen. Supply and Demand Uncertainty in Multi-Echelon Supply Chains. <http://www.ieor.berkeley.edu/~shen/papers/paper38.pdf> 2006.

Teng, S. Y., H. L. Ong, *et al.* An Integer L-shaped algorithm for time-constrained traveling salesman problem with stochastic travel and service times. Asia-Pacific Journal of Operational Research, v.21, n.2, p.241 - 257. 2004.

Tomasgard, A., J. A. Audestad, *et al.* Modelling aspects of distributed processing in telecommunication networks. Annals of Operations Research, v.82, p.161 - 184. 1998.

Triki, C., P. Beraldi, *et al.* Optimal capacity allocation in multi-auction electricity markets under uncertainty. Computers & Operations Research, v.32, p.201 - 217. 2005.

Türkay, M. e I. E. Grossmann. Logic-based MINLP algorithms for the optimal synthesis of process networks. Computers and Chemical Engineering, v.20, p.959 - 978. 1996.

Van Den Heever, S. A. e I. E. Grossmann. Disjunctive multiperiod optimization methods for design and planning of chemical process systems. Computers and Chemical Engineering, v.23, p.1075 - 1095. 1999.

Vecchiotti, A. e I. E. Grossmann. Modeling issues and implementation of language for disjunctive programming. Computers and Chemical Engineering, v.24, p.2143 - 2455. 2000.

Ziemba, W. T. The Stochastic Programming Approach to Asset, Liability, and Wealth Management. Virginia, USA: AMIR. 2003

## 8. Anexos

### 8.1. Informações comerciais

Tabela 8.1– Custo de transporte (US\$/m3) de cada produto entre dois locais

| Local Origem | Produto  | Local Destino |      |       |       |       |       |       |
|--------------|----------|---------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|
|              |          | BR            | Merc | T5    | T6    | T7    | T8    | T9    |
| Term_nac     | Asfalto  | 1,5           | 0    | 19,52 | 21,26 | 24,02 | 30,81 | 15,18 |
|              | Bunker   | 1,5           | 0    | 19,52 | 21,26 | 24,02 | 30,81 | 15,18 |
|              | BV       | 1             | 0    | 13,82 | 19,72 | 13,12 | 17,31 | 22,71 |
|              | CAB      | 1             | 0    | 13,82 | 19,72 | 13,12 | 17,31 | 22,71 |
|              | Coque    | 1,5           | 0    | 19,52 | 21,26 | 24,02 | 30,81 | 15,18 |
|              | DSL2000  | 2,5           | 0    | 23,38 | 23,16 | 22,01 | 29,03 | 14,84 |
|              | DSL500   | 2,5           | 0    | 23,38 | 23,16 | 22,01 | 29,03 | 14,84 |
|              | G.l.p    | 2,5           | 0    | 23,38 | 23,16 | 22,01 | 29,03 | 14,84 |
|              | Gas.Exp. | 2,5           | 0    | 23,38 | 23,16 | 22,01 | 29,03 | 14,84 |
|              | Gasolina | 2,5           | 0    | 23,38 | 23,16 | 22,01 | 29,03 | 14,84 |
|              | JUB      | 1             | 0    | 13,82 | 19,72 | 13,12 | 17,31 | 22,71 |
|              | LCO      | 1,5           | 0    | 19,52 | 21,26 | 24,02 | 30,81 | 15,18 |
|              | ML       | 1             | 0    | 13,82 | 19,72 | 13,12 | 17,31 | 22,71 |
|              | Nafta    | 2,5           | 0    | 23,38 | 23,16 | 22,01 | 29,03 | 14,84 |
|              | OC1%     | 1,5           | 0    | 19,52 | 21,26 | 24,02 | 30,81 | 15,18 |
|              | OC3%     | 1,5           | 0    | 19,52 | 21,26 | 24,02 | 30,81 | 15,18 |
|              | P31      | 1             | 0    | 13,82 | 19,72 | 13,12 | 17,31 | 22,71 |
|              | PN       | 1             | 0    | 13,82 | 19,72 | 13,12 | 17,31 | 22,71 |
|              | QAV      | 2,5           | 0    | 23,38 | 23,16 | 22,01 | 29,03 | 14,84 |
|              | SB       | 1             | 0    | 13,82 | 19,72 | 13,12 | 17,31 | 22,71 |

Tabela 8.2 – Custo de utilização de unidade (US\$/m3)

| Unidade | Custo operacional |
|---------|-------------------|
| DEST    | 3,3               |
| FCC     | 4,6               |
| Coque   | 5,2               |
| DESASF  | 4,3               |
| HDS     | 5,3               |
| HDT     | 5,5               |

**Tabela 8.3 – Custo de estocagem (US\$/m3) de cada produto estocável**

| <b>Produto</b> | <b>Custo de estocagem</b> |
|----------------|---------------------------|
| Asfalto        | 0,8                       |
| Bunker         | 0,8                       |
| Coque          | 0,8                       |
| DSL2000        | 1,2                       |
| DSL500         | 1,2                       |
| G.l.p          | 1,2                       |
| Gas.Exp.       | 1,2                       |
| Gasolina       | 1,2                       |
| GO             | 0,8                       |
| GOPK           | 0,8                       |
| NAFK           | 0,8                       |
| Nafta          | 1,2                       |
| OC1%           | 0,8                       |
| OC3%           | 0,8                       |
| Odes           | 0,8                       |
| QAV            | 1,2                       |
| RV             | 0,8                       |
| RVC            | 0,8                       |

**Tabela 8.4 – Volume (mil m3) de cada produto demandado no mercado interno em cada período**

| <b>Produto</b> | <b>Período</b> |          |          |          |
|----------------|----------------|----------|----------|----------|
|                | <b>1</b>       | <b>2</b> | <b>3</b> | <b>4</b> |
| Asfalto        | 129            | 104      | 147      | 132      |
| Bunker         | 97             | 92       | 98       | 94       |
| Coque          | 205            | 205      | 205      | 205      |
| DSL2000        | 2637           | 2555     | 2988     | 2911     |
| DSL500         | 862            | 837      | 963      | 934      |
| G.l.p          | 1044           | 969      | 1025     | 1070     |
| Gasolina       | 1454           | 1337     | 1478     | 1452     |
| Nafta          | 806            | 806      | 806      | 806      |
| OC1%           | 315            | 287      | 310      | 295      |
| OC3%           | 87             | 79       | 85       | 81       |
| QAV            | 472            | 425      | 448      | 444      |

**Tabela 8.5 – Preço (US\$/m3) de cada produto demandado no mercado interno em cada período**

| Produto  | Período |        |        |        |
|----------|---------|--------|--------|--------|
|          | 1       | 2      | 3      | 4      |
| Asfalto  | 453,0   | 453,0  | 453,0  | 453,0  |
| Bunker   | 612,0   | 614,0  | 615,0  | 616,0  |
| Coque    | 69,0    | 69,0   | 69,0   | 69,0   |
| DSL2000  | 795,0   | 795,0  | 795,0  | 795,0  |
| DSL500   | 796,0   | 796,0  | 796,0  | 796,0  |
| G.l.p    | 327,0   | 327,0  | 324,0  | 324,0  |
| Gasolina | 658,0   | 658,0  | 658,0  | 658,0  |
| Nafta    | 563,0   | 564,0  | 565,0  | 566,0  |
| OC1%     | 622,0   | 624,0  | 625,0  | 625,0  |
| OC3%     | 435,0   | 437,0  | 438,0  | 438,0  |
| QAV      | 1049,0  | 1043,0 | 1027,0 | 1010,0 |

**Tabela 8.6 - Volume (mil m3) de cada produto demandado no mercado externo (opções de exportação) em cada período**

| Destino | Produto  | Período |      |      |      |
|---------|----------|---------|------|------|------|
|         |          | 1       | 2    | 3    | 4    |
| T5      | JUB      | 151     | 151  | 151  | 151  |
|         | ML       | 1010    | 1010 | 1010 | 1010 |
|         | P31      | 477     | 397  | 477  | 397  |
|         | Gas.Exp. | 261     | 261  | 261  | 261  |
|         | OC1%     | 60      | 60   | 60   | 60   |
| T6      | CAB      | 318     | 318  | 318  | 318  |
|         | JUB      | 127     | 127  | 127  | 127  |
|         | ML       | 917     | 917  | 917  | 917  |
|         | OC1%     | 130     | 130  | 130  | 130  |
| T7      | Gas.Exp. | 160     | 200  | 160  | 160  |
| T8      | CAB      | 159     | 159  | 159  | 159  |
|         | JUB      | 627     | 627  | 627  | 627  |
|         | ML       | 1685    | 1685 | 1685 | 1685 |
|         | Gas.Exp. | 240     | 240  | 240  | 240  |
|         | OC1%     | 279     | 279  | 279  | 279  |
|         | OC3%     | 200     | 200  | 200  | 200  |
| T9      | CAB      | 159     | 159  | 159  | 159  |
|         | ML       | 159     | 159  | 159  | 159  |
|         | P31      | 636     | 477  | 636  | 477  |
|         | Bunker   | 328     | 293  | 296  | 324  |
|         | Coque    | 45      | 45   | 45   | 45   |
|         | OC1%     | 98      | 98   | 98   | 128  |

Tabela 8.7 - Preço (US\$/m3) de cada produto demandado no mercado externo (opções de exportação) em cada período

| Destino | Produto  | Período |       |       |       |
|---------|----------|---------|-------|-------|-------|
|         |          | 1       | 2     | 3     | 4     |
| T5      | P31      | 785,0   | 783,0 | 786,0 | 781,0 |
|         | JUB      | 709,0   | 714,0 | 713,0 | 712,0 |
|         | ML       | 752,0   | 755,0 | 754,0 | 753,0 |
|         | Gas.Exp. | 819,0   | 840,0 | 850,0 | 849,0 |
|         | OC1%     | 592,0   | 591,0 | 590,0 | 589,0 |
| T6      | CAB      | 769,0   | 774,0 | 773,0 | 772,0 |
|         | JUB      | 727,0   | 732,0 | 731,0 | 731,0 |
|         | ML       | 754,0   | 759,0 | 758,0 | 758,0 |
|         | OC1%     | 619,0   | 621,0 | 622,0 | 624,0 |
| T7      | Gas.Exp. | 822,0   | 843,0 | 853,0 | 852,0 |
| T8      | CAB      | 759,0   | 765,0 | 764,0 | 763,0 |
|         | JUB      | 662,0   | 662,0 | 661,0 | 660,0 |
|         | ML       | 738,0   | 744,0 | 743,0 | 742,0 |
|         | Gas.Exp. | 794,0   | 805,0 | 811,0 | 808,0 |
|         | OC1%     | 618,0   | 620,0 | 622,0 | 623,0 |
|         | OC3%     | 586,0   | 588,0 | 590,0 | 591,0 |
| T9      | P31      | 794,0   | 795,0 | 794,0 | 793,0 |
|         | CAB      | 773,0   | 778,0 | 777,0 | 776,0 |
|         | Bunker   | 650,0   | 653,0 | 656,0 | 657,0 |
|         | Coque    | 150,0   | 150,0 | 150,0 | 154,0 |
|         | ML       | 757,0   | 762,0 | 761,0 | 760,0 |
|         | OC1%     | 625,0   | 624,0 | 623,0 | 623,0 |



**Tabela 8.8 - Volume (mil m3) de cada produto ofertado no mercado externo (opções de importação) em cada período**

| Local | Produto | Período |      |      |      |
|-------|---------|---------|------|------|------|
|       |         | 0       | 1    | 2    | 3    |
| T5    | Bunker  | 51      | 51   | 51   | 51   |
|       | DSL2000 | 43      | 43   | 43   | 43   |
|       | DSL500  | 86      | 86   | 86   | 86   |
|       | QAV     | 44      | 44   | 44   | 44   |
| T6    | Bunker  | 51      | 51   | 51   | 51   |
|       | DSL2000 | 190     | 190  |      | 190  |
|       | DSL500  | 190     | 190  | 190  | 190  |
|       | G.l.p   | 72      | 72   | 72   | 72   |
|       | QAV     | 80      | 80   | 80   | 80   |
|       | SB      | 159     | 159  | 159  | 159  |
| T7    | BV      | 1741    | 1741 | 1741 | 1741 |
|       | P31     | 564     | 564  | 564  | 564  |
|       | G.l.p   | 378     | 378  | 378  | 378  |
|       | Nafta   | 270     | 270  | 270  | 270  |
|       | PN      | 300     | 300  | 300  | 300  |
|       | SB      | 1564    | 1564 | 1564 | 1564 |
| T8    | BV      | 159     | 159  | 159  | 159  |
|       | CAB     | 173     | 173  | 173  | 156  |
|       | DSL2000 | 472     | 472  | 366  | 366  |
|       | DSL500  | 280     | 280  | 280  | 280  |
|       | G.l.p   | 297     | 297  | 297  | 297  |
|       | Nafta   | 110     | 110  | 110  | 110  |
|       | QAV     | 80      | 80   | 160  | 160  |
|       | SB      | 335     | 335  | 335  | 303  |
| T9    | P31     | 57      | 57   | 57   | 57   |
|       | Coque   | 45      | 45   | 45   | 45   |
|       | G.l.p   | 221     | 221  | 221  | 221  |
|       | Nafta   | 100     | 100  | 100  | 100  |
|       | SB      | 79      | 79   | 79   | 79   |

**Tabela 8.9 - Preço (US\$/m3) de cada produto ofertado no mercado externo (opções de importação) em cada período**

| Local | Produto | Período |        |        |        |
|-------|---------|---------|--------|--------|--------|
|       |         | 0       | 1      | 2      | 3      |
| T5    | Bunker  | 622,0   | 622,0  | 628,0  | 630,0  |
|       | DSL2000 | 1056,0  | 1056,0 | 1059,0 | 1050,0 |
|       | DSL500  | 1060,0  | 1060,0 | 1060,0 | 1059,0 |
|       | QAV     | 1069,0  | 1069,0 | 1072,0 | 1067,0 |
| T6    | Bunker  | 612,0   | 612,0  | 615,0  | 618,0  |
|       | SB      | 849,0   | 849,0  | 849,0  | 849,0  |
|       | DSL2000 | 1078,0  | 1078,0 | 1078,0 | 1073,0 |
|       | DSL500  | 1100,0  | 1100,0 | 1099,0 | 1095,0 |
|       | G.l.p   | 513,0   | 513,0  | 513,0  | 511,0  |
|       | QAV     | 1147,0  | 1147,0 | 1147,0 | 1146,0 |
| T7    | BV      | 861,0   | 861,0  | 861,0  | 860,0  |
|       | P31     | 836,0   | 836,0  | 836,0  | 835,0  |
|       | PN      | 876,0   | 876,0  | 876,0  | 876,0  |
|       | SB      | 835,0   | 835,0  | 835,0  | 834,0  |
|       | G.l.p   | 477,0   | 477,0  | 467,0  | 451,0  |
|       | Nafta   | 733,0   | 733,0  | 735,0  | 736,0  |
| T8    | BV      | 839,0   | 839,0  | 839,0  | 838,0  |
|       | SB      | 832,0   | 832,0  | 832,0  | 832,0  |
|       | CAB     | 739,0   | 739,0  | 737,0  | 736,0  |
|       | DSL2000 | 1067,0  | 1067,0 | 1067,0 | 1065,0 |
|       | DSL500  | 1073,0  | 1073,0 | 1069,0 | 1067,0 |
|       | G.l.p   | 503,0   | 503,0  | 502,0  | 487,0  |
|       | Nafta   | 739,0   | 739,0  | 740,0  | 743,0  |
|       | QAV     | 1057,0  | 1057,0 | 1052,0 | 1042,0 |
| T9    | P31     | 838,0   | 838,0  | 838,0  | 838,0  |
|       | SB      | 838,0   | 838,0  | 838,0  | 838,0  |
|       | Coque   | 518,0   | 518,0  | 518,0  | 517,0  |
|       | G.l.p   | 468,0   | 468,0  | 457,0  | 442,0  |
|       | Nafta   | 740,0   | 740,0  | 739,0  | 738,0  |

**Tabela 8.10 – Volume extra (mil m3) de cada produto ofertado no mercado externo (opções de importação extra) em cada período**

| Local | Produto | Período |     |     |     |
|-------|---------|---------|-----|-----|-----|
|       |         | 1       | 2   | 3   | 4   |
| T9    | BV      | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | P31     | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | PN      | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | SB      | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | Bunker  | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | Coque   | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | DSL2000 | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | DSL500  | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | G.l.p   | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | Nafta   | 500     | 500 | 500 | 500 |
|       | QAV     | 500     | 500 | 500 | 500 |

**Tabela 8.11 - Preço (US\$/m3) de cada produto extra ofertado no mercado externo (opções de importação extra) em cada período**

| Local | Produto | Período |        |        |        |
|-------|---------|---------|--------|--------|--------|
|       |         | 1       | 2      | 3      | 4      |
| T9    | BV      | 1119,0  | 1119,0 | 1118,0 | 1116,0 |
|       | P31     | 1090,0  | 1090,0 | 1089,0 | 1088,0 |
|       | PN      | 1139,0  | 1139,0 | 1138,0 | 1137,0 |
|       | SB      | 1104,0  | 1104,0 | 1103,0 | 1102,0 |
|       | Bunker  | 809,0   | 817,0  | 820,0  | 820,0  |
|       | Coque   | 673,0   | 673,0  | 672,0  | 671,0  |
|       | DSL2000 | 1402,0  | 1402,0 | 1395,0 | 1395,0 |
|       | DSL500  | 1430,0  | 1429,0 | 1424,0 | 1416,0 |
|       | G.l.p   | 667,0   | 667,0  | 664,0  | 646,0  |
|       | Nafta   | 962,0   | 962,0  | 966,0  | 973,0  |
|       | QAV     | 1491,0  | 1491,0 | 1490,0 | 1488,0 |

**Tabela 8.12 – Volume (mil m3) de cada tipo de petróleo produzido em cada período**

| Produto | Período |      |      |      |
|---------|---------|------|------|------|
|         | 1       | 2    | 3    | 4    |
| BV      | 331     | 295  | 321  | 316  |
| CAB     | 2833    | 2771 | 3025 | 2878 |
| JUB     | 902     | 847  | 1014 | 1113 |
| ML      | 2530    | 2186 | 2505 | 2501 |
| P31     | 2347    | 2078 | 2276 | 2273 |
| SB      | 159     | 104  | 94   | 82   |

## 8.2. Formulação matemática detalhada

### 8.2.1. Índices

|     |                                     |
|-----|-------------------------------------|
| t   | Período                             |
| p,d | Produto                             |
| i,j | Local                               |
| u   | Unidade de processamento/tratamento |
| c   | Campanha                            |
| g   | Grupo estoque                       |
| h   | Grupo transporte                    |

### 8.2.2. Conjuntos

|          |   |
|----------|---|
| $P_1$    | Conjunto dos produtos que podem ser carga de alguma unidade, exceto HDS/HDT |
| $P_3$    | Conjunto dos produtos estocáveis  |
| $P_4$    | Conjunto dos produtos transportáveis  |
| $P_6$    | Conjunto dos produtos do tipo diesel ou querosene que entram no HDT         |
| $P_7$    | Conjunto dos produtos do tipo instáveis que entram no HDT                   |
| $P_8$    | Conjunto dos produtos que saem do HDS/HDT                                   |
| $P_9$    | Conjunto dos produtos do tipo nafta craqueada                               |
| $P_{10}$ | Conjunto dos produtos do tipo nafta dd                                      |
| $P_{11}$ | Conjunto dos produtos do tipo gasolina                                      |
| $P_{12}$ | Conjunto dos produtos consumidos por degradação                             |
| $P_{13}$ | Conjunto dos produtos produzidos por degradação                             |
| $P_{14}$ | Conjunto dos produtos em que viscosidade é uma restrição de qualidade       |
| $P_{15}$ | Conjunto dos produtos em que enxofre é uma restrição de qualidade           |
| $P_{16}$ | Conjunto dos produtos com demanda no exterior                               |
| $P_{17}$ | Conjunto dos produtos com demanda no mercado interno                        |

- P<sub>18</sub> Conjunto dos produtos com oferta no exterior
- P<sub>19</sub> Conjunto dos produtos do tipo petróleo
- P<sub>20</sub> Conjunto dos produtos do tipo RV não craqueável
- P<sub>21</sub> Conjunto dos produtos do tipo craqueáveis, exceto RV
- P<sub>22</sub> Conjunto dos produtos carga de unidade de HDS/HDT
- P<sub>23</sub> Conjunto dos produtos tipo derivado
- P<sub>24</sub> Conjunto dos produtos da destilação, exceto GLP
- P<sub>25</sub> Conjunto dos produtos do FCC, exceto GLP
- P<sub>26</sub> Conjunto dos produtos do coque, exceto GLP
- P<sub>27</sub> Conjunto dos produtos da desasfaltação
- P<sub>28</sub> Conjunto dos produtos do tipo GLP
- P<sub>29</sub> Conjunto dos produtos carga de FCC
- P<sub>30</sub> Conjunto dos produtos carga do coque
- P<sub>31</sub> Conjunto dos produtos carga da desasfaltação
- P<sub>32</sub> Conjunto dos produtos que não são produzidos por processamento
- P<sub>34</sub> Conjunto dos produtos do tipo diesel/querosene em que enxofre é restrição
- P<sub>35</sub> Conjunto dos produtos do tipo OC/Bunker em que enxofre é restrição
- P<sub>36</sub> Conjunto dos produtos transportáveis do tipo claros
- P<sub>37</sub> Conjunto dos produtos transportáveis do tipo escuros
- P<sub>38</sub> Conjunto dos produtos transportáveis do tipo petróleos
- P<sub>40</sub> Conjunto dos produtos estocáveis do tipo claros
- P<sub>41</sub> Conjunto dos produtos estocáveis do tipo escuros
- P<sub>43</sub> Conjunto dos produtos provenientes da destilação, FCC, Desasf, ou coque
- P<sub>44</sub> Conjunto dos produtos com informação de enxofre, densidade e viscosidade

- P<sub>46</sub> Conjunto dos produtos tipo RV consumidos por degradação
- P<sub>47</sub> Conjunto dos produtos que podem ser intermediário ou final e que não são consumidos por processamento
- P<sub>48</sub> Conjunto dos produtos finais que não são consumidos nem por processamento nem por degradação e são produzidos exclusivamente por processamento
- P<sub>49</sub> Conjunto dos produtos finais não produzidos por processamento e não consumidos de forma alguma
- P<sub>50</sub> Conjunto dos produtos finais produzidos por processamento ou degradação e que não são consumidos de forma alguma
- P<sub>51</sub> Conjunto dos produtos finais com mercado apenas no exterior
- P<sub>52</sub> Conjunto dos produtos não ofertados ao mercado externo
- P<sub>53</sub> Conjunto dos produtos não ofertados ao mercado interno
- P<sub>54</sub> Conjunto dos produtos do tipo querosene
- P<sub>56</sub> Conjunto dos produtos do tipo querosene consumidos por processamento
- P<sub>57</sub> Conjunto dos produtos do tipo diesel e instáveis consumidos por processamento
- P<sub>58</sub> Conjunto dos produtos do tipo RV craqueável
- P<sub>59</sub> Conjunto dos produtos carga de HDS/HDT, exceto GOLK
- P<sub>60</sub> Conjunto dos produtos carga de HDS/HDT, exceto LCO
- P<sub>61</sub> Conjunto dos produtos do tipo GOLK
- P<sub>62</sub> Conjunto dos produtos do tipo LCO
- P<sub>63</sub> Conjunto dos produtos com demanda determinística
- P<sub>65</sub> Conjunto dos produtos craqueáveis que não podem ser misturados
- P<sub>66</sub> Conjunto dos produtos com informações sobre teor de enxofre, densidade e viscosidade
- P<sub>67</sub> Conjunto de produtos intermediários que não são consumidos por processamento

|                 |   |
|-----------------|---|
| P <sub>68</sub> | Conjunto dos derivados de petróleo transportáveis                                     |
| L               | Conjunto de todos os locais   |
| L <sub>r</sub>  | Conjunto dos locais com refinarias  |
| L <sub>r1</sub> | Conjunto dos locais com refinarias e terminal   |
| L <sub>x</sub>  | Conjunto dos locais no exterior com demanda/oferta por produtos finais<br>ou petróleo |
| L <sub>p</sub>  | Conjunto dos locais do tipo plataforma de produção de petróleo                        |
| L <sub>t</sub>  | Conjunto dos locais do tipo terminal marítimo no país                                 |
| L <sub>k</sub>  | Conjunto dos locais com mercado a ser atendido  |
| L <sub>tx</sub> | Conjunto dos locais do tipo terminal marítimo (no país ou exterior)                   |
| U               | Conjunto de todas as unidades   |
| U <sub>h</sub>  | Conjunto das unidades do tipo HDT/HDS (com campanhas)                                 |
| U <sub>f</sub>  | Conjunto das unidades do tipo FCC   |
| U <sub>n</sub>  | Conjunto das unidades sem campanhas (todas menos HDS/HDT)                             |
| U <sub>d</sub>  | Conjunto das unidades do tipo destilação  |
| U <sub>s</sub>  | Conjunto das unidades do tipo desasfaltação   |
| U <sub>q</sub>  | Conjunto das unidades do tipo coque   |
| U <sub>r</sub>  | Conjunto das unidades que tem RV como carga   |
| C               | Conjunto de todas as campanhas  |
| C <sub>d</sub>  | Conjunto das campanhas tipo diesel  |
| G               | Conjunto de todos os grupos de estoques   |
| G <sub>c</sub>  | Conjunto dos grupos de estoques tipo claros   |
| G <sub>e</sub>  | Conjunto dos grupos de estoques tipo escuros  |
| H               | Conjunto de todos os grupos de transporte   |
| H <sub>c</sub>  | Conjunto dos grupos de transporte tipo claros   |
| H <sub>e</sub>  | Conjunto dos grupos de transporte tipo escuros  |

|       |  |
|-------|--|
| $H_p$ | Conjunto dos grupos de transporte tipo petróleo        |
| $T$   | Conjunto de todos os períodos, exceto o inicial        |
| $T_0$ | Conjunto de todos os períodos, inclusive o inicial (0) |

### 8.2.3. Parâmetros

|                         |  |
|-------------------------|--|
| $RendH_{p,d,u,c,j}$     | Rendimento % do produto d a partir do processamento do produto p na unidade de tratamento u na campanha c no local j |
| $Rend_{p,d,u,j}$        | Rendimento % do produto d a partir do processamento do produto p na unidade de processo u no local j                 |
| $Est\_max_{g,i}$        | Vol. (mil m3) máximo de estoque do grupo estoque g no local i  |
| $Cap\_transp_{h,i,j}$   | Vol. (mil m3) máximo de transporte do grupo transporte h entre os locais i e j                                       |
| $Cap\_proc\_max_{u,i}$  | Vol. (mil m3) máximo de processamento da unidade u no local i  |
| $DI_{p,t}$              | Vol.(mil m3) demandado no mercado interno do produto p no período t  |
| $DE_{p,i,t}$            | Vol.(mil m3) demandado no mercado externo do produto p no local i no período t                                       |
| $OI_{p,i,t}$            | Vol.(mil m3) ofertado no mercado interno do produto p no local i no período t  |
| $OE_{p,i,t}$            | Vol.(mil m3) ofertado no mercado externo do produto p no local i no período t  |
| $OE\_x_{p,i,t}$         | Vol.(mil m3) extra ofertado no mercado externo do produto p no local i no período t                                  |
| $ARC_{i,j}$             | Igual a 1 se existe arco entre i e j através do modal m e 0 c.c.   |
| $L\_inst_{u,i}$         | % máximo de produtos instáveis totais na carga da unidade u no local i   |
| $L\_prod\_inst_{p,u,i}$ | % máximo de produtos instáveis p na carga da unidade u no local i  |
| $SE_p$                  | % de enxofre contido no produto p  |



|                    |   |
|--------------------|---|
| $RS_{u,i}$         | % de remoção de enxofre da unidade u (HDT) no local i   |
| $NDD\_máx_i$       | % máximo de nafta dd no pool de gasolina no local i   |
| $NDD\_mín_i$       | % mínimo de nafta dd no pool de gasolina no local i   |
| $c_{p,i,t}^i$      | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de importação do produto p no local i no período t               |
| $c_{-X_{p,i,t}}^i$ | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de importação extra do produto p no local i no período t         |
| $c_u^u$            | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de utilização da unidade u                                       |
| $c_i^d$            | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de degradação no local i   |
| $c_{p,i,j}^t$      | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de transporte do produto p do local i para o local j             |
| $c_p^e$            | Custo (US\$/m <sup>3</sup> ) de estoque do produto p  |
| $p_{p,t}^i$        | Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de venda no mercado interno do produto p no período t            |
| $p_{p,i,t}^e$      | Preço (US\$/m <sup>3</sup> ) de venda no mercado externo do produto p no local i no período t |
| $S\_máx_d$         | % máximo de enxofre permitido no produto d  |
| $Dens_d$           | Densidade (Ton/m <sup>3</sup> ) do produto d  |
| $Visc_d$           | Índice linear de viscosidade do produto d   |
| $Visc\_máx_d$      | Índice máximo de viscosidade permitido para o produto d                                       |
| $Visc\_mín_d$      | Índice mínimo de viscosidade permitido para o produto d                                       |
| $PD_{p,d}$         | Igual a 1 se o produto p pode ser degradado para o produto d e 0 c.c.                         |
| $RV\_máx_i$        | Limite % máximo de RV na carga do FCC no local i  |
| $Prod\_máx\_Q_i$   | Volume (mil m <sup>3</sup> ) máximo de produção de QAV no local i                             |

#### 8.2.4. Variáveis

|                  |  |
|------------------|--|
| $ES_{p,i,t}$     | Vol.(mil m3) estocado do produto p no local i no final do período t                                      |
| $CG_{p,u,i,t}$   | Vol.(mil m3) do produto p que entra como carga da unidade u no local i no período t                      |
| $DG_{p,d,i,t}$   | Vol.(mil m3) do produto p que degradada para o produto d no local i no período t                         |
| $FX_{p,i,j,t}$   | Vol.(mil m3) do produto p movimentado do local i para o local j através do modal m no período t          |
| $SS_{p,u,c,i,t}$ | Massa (mil Ton) de enxofre no produto p que sai da unidade u (HDT) na campanha c no local i no período t |
| $SD_{p,i,t}$     | Massa (mil Ton) de enxofre no produto p produzido por degradação no local i no período t                 |
| $VD_{p,t}$       | Volume (mil m3) vendido no mercado interno do produto p no período t                                     |
| $EXP_{p,i,t}$    | Volume (mil m3) vendido no mercado externo do produto p no local i no período t                          |
| $IMP_{p,i,t}$    | Volume (mil m3) importado do produto p proveniente do local i no período t                               |
| $IMP\_X_{p,i,t}$ | Volume (mil m3) extra importado do produto p proveniente do local i no período t                         |
| $PRD_{p,i,t}$    | Volume (mil m3) produzido do petróleo p no local i no período t  |
| $HD_{p,u,c,j,t}$ | Volume (mil m3) do produto p que entra no HDS/HDT na campanha c local j no período t                     |
| $PP_{p,i,t}$     | Volume (mil m3) do produto p produzido por processamento no local i no período t                         |

## 8.2.5. Restrições

### 8.2.5.1. Restrições de Balanço

- I.  $\sum_{u \in U_d} CG_{p,u,j,t} = \sum_{i \in L_t} FX_{p,i,j,t} \quad \forall p \in P_{19}, j \in L_r, t \in T$
- II.  $\sum_{u \in U_f} CG_{p,u,j,t} = ES_{p,j,t-1} + PP_{p,j,t} - \sum_{d \in P_{13}} DG_{p,d,j,t} - ES_{p,j,t} \quad \forall p \in P_{21}, j \in L_r, t \in T$
- III.  $\sum_{u \in U_f} CG_{p,u,j,t} = ES_{p,j,t-1} + PP_{p,j,t} - ES_{p,j,t} \quad \forall p \in P_{65}, j \in L_r, t \in T$
- IV.  $\sum_{u \in U_f} CG_{p,u,j,t} = ES_{p,j,t-1} + \sum_{d \in P_{46}} DG_{d,p,j,t} - ES_{p,j,t} \quad \forall p \in P_{20}, j \in L_r, t \in T$
- V.  $\sum_{u \in U_f} CG_{p,u,j,t} = ES_{p,j,t-1} + \sum_{d \in P_{46}} DG_{d,p,j,t} - ES_{p,j,t} \quad \forall p \in P_{58}, j \in L_r, t \in T$
- VI.  $\sum_{u \in U_h} \sum_{c \in C_d} HD_{p,u,c,j,t} = PP_{p,j,t} - \sum_{d \in P_{13}} DG_{p,d,j,t} \quad \forall p \in P_{57}, j \in L_r, t \in T$
- VII.  $\sum_{u \in U_h} \sum_{c \in C} HD_{p,u,c,j,t} = PP_{p,j,t} - \sum_{d \in P_{13}} DG_{p,d,j,t} \quad \forall p \in P_{56}, j \in L_r, t \in T$
- VIII.  $ES_{p,j,t-1} + PP_{p,j,t} + \sum_{i \in L_t} FX_{p,i,j,t} - \sum_{i \in L_t} FX_{p,j,i,t} - \sum_{d \in P_{13}} DG_{p,d,j,t} - ES_{p,j,t} = 0 \quad \forall p \in P_{47}, j \in L_r, t \in T$
- IX.  $PP_{p,j,t} - \sum_{d \in P_{13}} DG_{p,d,j,t} = 0 \quad \forall p \in P_{67}, j \in L_r, t \in T$
- X.  $ES_{p,j,t-1} + PP_{p,j,t} + \sum_{i \in L_t} FX_{p,i,j,t} - \sum_{i \in L_t} FX_{p,j,i,t} - ES_{p,j,t} = 0 \quad \forall p \in P_{48}, j \in L_r, t \in T$
- XI.  $ES_{p,j,t-1} + \sum_{d \in P_{12}} DG_{d,p,j,t} + \sum_{i \in L_t} FX_{p,i,j,t} - \sum_{i \in L_t} FX_{p,j,i,t} - ES_{p,j,t} = 0 \quad \forall p \in P_{49}, j \in L_r, t \in T$
- XII.  $ES_{p,j,t-1} + PP_{p,j,t} + \sum_{d \in P_{12}} DG_{d,p,j,t} + \sum_{i \in L_t} FX_{p,i,j,t} - \sum_{i \in L_t} FX_{p,j,i,t} - ES_{p,j,t} = 0 \quad \forall p \in P_{50}, j \in L_r, t \in T$
- XIII.  $ES_{p,j,t-1} + \sum_{d \in P_{12}} DG_{d,p,j,t} + \sum_{i \in L_t} FX_{p,i,j,t} - \sum_{i \in L_t} FX_{p,j,i,t} - ES_{p,j,t} = 0 \quad \forall p \in P_{51}, j \in L_r, t \in T$
- XIV.  $\sum_{i \in L_t} FX_{d,i,j,t} - EXP_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{16}, j \in L_x, t \in T$
- XV.  $\sum_{j \in L_t} FX_{d,i,j,t} - IMP_{d,i,t-1} - IMP_{-x_{d,i,t}} = 0 \quad \forall d \in P_{18}, i \in L_x, t \in T$
- XVI.  $\sum_{j \in L_t} FX_{d,i,j,t} - PRD_{d,i,t} = 0 \quad \forall d \in P_{19}, i \in L_p, t \in T$
- XVII.  $\sum_{i \in L} FX_{d,i,j,t} - \sum_{i \in L} FX_{d,j,i,t} = 0 \quad \forall d \in P_4, j \in L_t, t \in T$
- XVIII.  $\sum_{i \in L_p} PRD_{d,i,t} + \sum_{i \in L_x} IMP_{d,i,t-1} + \sum_{i \in L_x} IMP_{-x_{d,i,t}} - \sum_{i \in L_x} EXP_{d,i,t} - \sum_{u \in U_d} \sum_{j \in L_r} CG_{d,u,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{19}, t \in T$
- XIX.  $\sum_{i \in L_x} \sum_{j \in L_k} FX_{d,i,j,t} - VD_{d,t} = 0 \quad \forall d \in P_{17}, t \in T$

### 8.2.5.2. Restrições de Qualidade

- XX.  $NDD\_máx_j * \sum_{p \in P_9} DG_{p,d,j,t} - (1 - NDD\_máx_j) * \sum_{p \in P_{10}} DG_{p,d,j,t} \geq 0 \quad \forall d \in P_{11}, j \in L_r, t \in T$
- XXI.  $NDD\_mín_j * \sum_{p \in P_9} DG_{p,d,j,t} - (1 - NDD\_mín_j) * \sum_{p \in P_{10}} DG_{p,d,j,t} \leq 0 \quad \forall d \in P_{11}, j \in L_r, t \in T$
- XXII.  $\sum_{p \in (P_{22})} (HD_{p,u,c,j,t} * RendH_{p,d,u,c,j} * Dens_p * SE_p) * (1 - RS_{u,j}) - SS_{d,u,c,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_8, c \in C, u \in U_h, j \in L_r, t \in T$
- XXIII.  $[\sum_{p \in P_{44}} (DG_{p,d,j,t} * Dens_p * SE_p)] - SD_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{15}, j \in L_r, t \in T$
- XXIV.  $\sum_{u \in U_h} \sum_{c \in C} SS_{d,u,c,j,t} + SD_{d,j,t} - S\_máx_d * \left[ PP_{d,j,t} + \sum_{p \in P_{12}} DG_{p,d,j,t} \right] * Dens_d \leq 0 \quad \forall d \in P_{34}, j \in L_r, t \in T$

$$\begin{aligned}
\text{XXV. } & \text{SD}_{d,j,t} - S_{\text{máx}_d} * \left[ \sum_{p \in P_{12}} \text{DG}_{p,d,j,t} \right] * \text{Dens}_d \leq 0 \quad \forall d \in P_{35}, j \in L_r, t \in T \\
\text{XXVI. } & \sum_{p \in P_{44}} (\text{DG}_{p,d,j,t} * \text{Visc}_p) - \left( \sum_{p \in P_{44}} \text{DG}_{p,d,j,t} \right) * \text{Visc}_{\text{máx}_d} \leq 0 \quad \forall d \in P_{14}, j \in L_r, t \in T \\
\text{XXVII. } & \sum_{p \in P_{44}} (\text{DG}_{p,d,j,t} * \text{Visc}_p) - \left( \sum_{p \in P_{44}} \text{DG}_{p,d,j,t} \right) * \text{Visc}_{\text{mín}_d} \geq 0 \quad \forall d \in P_{14}, j \in L_r, t \in T
\end{aligned}$$

### 8.2.5.3. Restrições de Estoque

$$\begin{aligned}
\text{XXVIII. } & \sum_{d \in P_{40}} \text{ES}_{d,j,t} \leq \text{Est}_{\text{máx}_{g,j}} \quad \forall g \in G_c, j \in L_r, t \in T \\
\text{XXIX. } & \sum_{d \in P_{41}} \text{ES}_{d,j,t} \leq \text{Est}_{\text{máx}_{g,j}} \quad \forall g \in G_e, j \in L_r, t \in T \\
\text{XXX. } & \text{ES}_{d,j,0} = 0 \quad \forall d \in P_3, j \in L_r
\end{aligned}$$

### 8.2.5.4. Restrições de Transporte / Fluxo

$$\begin{aligned}
\text{XXXI. } & \sum_{d \in P_{36}} \text{FX}_{d,i,j,t} \leq \text{Cap}_{\text{transp}_{h,i,j}} \quad \forall i \in L_{r1}, j \in L_{r1}, h \in H_c, t \in T \\
\text{XXXII. } & \sum_{d \in P_{37}} \text{FX}_{d,i,j,t} \leq \text{Cap}_{\text{transp}_{h,i,j}} \quad \forall i \in L_{r1}, j \in L_{r1}, h \in H_e, t \in T \\
\text{XXXIII. } & \sum_{d \in P_{38}} \text{FX}_{d,i,j,t} \leq \text{Cap}_{\text{transp}_{h,i,j}} \quad \forall i \in L_{r1}, j \in L_{r1}, h \in H_p, t \in T \\
\text{XXXIV. } & \text{FX}_{d,i,j,t} \leq \text{ARC}_{i,j} * 1000000 \quad \forall d \in P_4, i \in L, j \in L, t \in T \\
\text{XXXV. } & \sum_{d \in P_{68}} \sum_{j \in L_t} \text{FX}_{d,i,j,t} = 0 \quad \forall i \in L_p, t \in T \\
\text{XXXVI. } & \sum_{d \in P_{52}} \sum_{i \in L_t} \text{FX}_{d,i,j,t} = 0 \quad \forall j \in L_x, t \in T \\
\text{XXXVII. } & \sum_{d \in P_{53}} \sum_{j \in L_t} \text{FX}_{d,i,j,t} = 0 \quad \forall i \in L_x, t \in T
\end{aligned}$$

### 8.2.5.5. Restrições de Processamento

$$\begin{aligned}
\text{XXXVIII. } & \sum_{p \in P_1} \text{CG}_{p,u,j,t} \leq \text{Cap}_{\text{proc}_{\text{máx}_{u,j}}} \quad \forall u \in U_n, j \in L_r, t \in T \\
\text{XXXIX. } & \sum_{p \in P_{22}} \sum_{c \in C} \text{HD}_{p,u,c,j,t} \leq \text{Cap}_{\text{proc}_{\text{máx}_{u,j}}} \quad \forall u \in U_h, j \in L_r, t \in T \\
\text{XL. } & L_{\text{inst}_{u,j}} * \sum_{p \in P_6} \sum_{c \in C} \text{HD}_{p,u,c,j,t} - (1 - L_{\text{inst}_{u,j}}) * \sum_{p \in P_7} \sum_{c \in C} \text{HD}_{p,u,c,j,t} \geq 0 \quad \forall u \in U_h, j \in L_r, t \in T \\
\text{XLI. } & L_{\text{prod}_{\text{inst}_{d,u,j}}} * \sum_{p \in P_{59}} \sum_{c \in C} \text{HD}_{p,u,c,j,t} - (1 - L_{\text{prod}_{\text{inst}_{d,u,j}}}) * \sum_{c \in C} \text{HD}_{d,u,c,j,t} \geq 0 \quad \forall d \in P_{61}, u \in U_h, j \in L_r, t \in T \\
\text{XLII. } & L_{\text{prod}_{\text{inst}_{d,u,j}}} * \sum_{p \in P_{60}} \sum_{c \in C} \text{HD}_{p,u,c,j,t} - (1 - L_{\text{prod}_{\text{inst}_{d,u,j}}}) * \sum_{c \in C} \text{HD}_{d,u,c,j,t} \geq 0 \quad \forall d \in P_{62}, u \in U_h, j \in L_r, t \in T \\
\text{XLIII. } & \text{RV}_{\text{máx}_j} * \sum_{p \in P_{21}} \text{CG}_{p,u,j,t} - (1 - \text{RV}_{\text{máx}_j}) * \sum_{p \in P_{58}} \text{CG}_{p,u,j,t} \geq 0 \quad \forall u \in U_f, j \in L_r, t \in T \\
\text{XLIV. } & \sum_{p \in P_{19}} \text{CG}_{p,u,j,t} * \text{Re}_{\text{nd}_{p,d,u,j}} - \text{PP}_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{24}, u \in U_d, j \in L_r, t \in T \\
\text{XLV. } & \sum_{p \in P_{29}} \text{CG}_{p,u,j,t} * \text{Re}_{\text{nd}_{p,d,u,j}} - \text{PP}_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{25}, u \in U_f, j \in L_r, t \in T \\
\text{XLVI. } & \sum_{p \in P_{30}} \text{CG}_{p,u,j,t} * \text{Re}_{\text{nd}_{p,d,u,j}} - \text{PP}_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{26}, u \in U_q, j \in L_r, t \in T
\end{aligned}$$

- XLVII.  $\sum_{p \in P_{31}} CG_{p,u,j,t} * Rend_{p,d,u,j} - PP_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{27}, u \in U_s, j \in L_r, t \in T$
- XLVIII.  $\sum_{u \in U_d} \sum_{p \in P_{19}} CG_{p,u,j,t} * Rend_{p,d,u,j} + \sum_{u \in U_f} \sum_{p \in P_{29}} CG_{p,u,j,t} * Rend_{p,d,u,j} + \sum_{u \in U_q} \sum_{p \in P_{30}} CG_{p,u,j,t} * Rend_{p,d,u,j} - PP_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{28}, j \in L_c, t \in T$
- XLIX.  $\sum_{p \in P_{22}} \sum_{u \in U_h} \sum_{c \in C} HD_{p,u,c,j,t} * Rend_{p,d,u,c,j} - PP_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_8, j \in L_r, t \in T$
- L.  $PP_{d,j,t} = 0 \quad \forall d \in P_{32}, j \in L_r, t \in T$
- LI.  $DG_{p,d,j,t} \leq PD_{p,d} * 1000000 \quad \forall p \in P_{12}, d \in P_{13}, j \in L_r, t \in T$
- LII.  $HD_{p,u,"QAV",j,t} \leq Rend_{p,"QAV",u,"QAV",j} * 1000000 \quad \forall p \in P_{22}, u \in U_h, j \in L_r, t \in T$
- LIII.  $HD_{p,u,"DSL500",j,t} \leq Rend_{p,"DSL500",u,"DSL500",j} * 1000000 \quad \forall p \in P_{22}, u \in U_h, j \in L_r, t \in T$
- LIV.  $HD_{p,u,"DSL2000",j,t} \leq Rend_{p,"DSL2000",u,"DSL2000",j} * 1000000 \quad \forall p \in P_{22}, u \in U_h, j \in L_r, t \in T$
- LV.  $PP_{d,j,t} + \sum_{p \in P_{12}} DG_{p,d,j,t} \leq Pr od\_max\_Q_j \quad \forall d \in P_{54}, j \in L_r, t \in T$

### 8.2.5.6. Restrições de Comercialização

- LVI.  $VD_{d,t} = DI_{d,t} \quad \forall d \in P_{63}, t \in T$
- LVII.  $EXP_{d,j,t} \leq DE_{d,j,t} \quad \forall d \in P_{16}, j \in L_x, t \in T$
- LVIII.  $IMP_{d,i,t} \leq OE_{d,i,t} \quad \forall d \in P_{18}, i \in L_x, t \in T_0$
- LIX.  $PRD_{d,i,t} = OI_{d,i,t} \quad \forall d \in P_{19}, i \in L_p, t \in T$

### 8.2.5.7. Restrições de Não-negatividade

Todas as variáveis devem ser maior ou igual a zero.

### 8.2.5.8. Função Objetivo

$$\begin{aligned} \text{Min prejuízo} = & \sum_{d \in P_{18}} \sum_{i \in L_x} \sum_{t \in T_0} c_{d,i,t}^i * 1000 * IMP_{d,i,t} + \sum_{d \in P_{22}} \sum_{u \in U_h} \sum_{c \in C} \sum_{j \in L_r} \sum_{t \in T} c_u^u * 1000 * HD_{d,u,c,j,t} + \\ & + \sum_{p \in P_1} \sum_{u \in U_n} \sum_{j \in L_r} \sum_{t \in T} c_u^u * 1000 * CG_{p,u,j,t} + \sum_{p \in P_{12}} \sum_{d \in P_{13}} \sum_{j \in L_r} \sum_{t \in T} c_j^d * 1000 * DG_{p,d,j,t} + \sum_{d \in P_4} \sum_{i \in L_j} \sum_{l \in L_t} c_{d,i,j}^l * 1000 * FX_{d,i,j,t} + \\ & + \sum_{d \in P_3} \sum_{j \in L_r} \sum_{t \in T_0} c_d^e * 1000 * ES_{d,j,t} - \sum_{d \in P_{17}} \sum_{t \in T} p_{d,t}^i * 1000 * VD_{d,t} - \sum_{d \in P_{16}} \sum_{j \in L_x} \sum_{t \in T} p_{d,j,t}^e * 1000 * EXP_{d,j,t} \end{aligned}$$

## 8.2.6. Comentários sobre as restrições

A seguir será comentada cada restrição que compõe o modelo determinístico. Como foi considerado apenas um único local (BR) para o grupo de locais com refinaria

(Lr)<sup>26</sup>, para evitar repetições, não será mencionado o local quando se tratar do grupo Lr nos comentários a seguir, ficando implícito que se trata do único local BR.

### **8.2.6.1. Restrições de Balanço**

- xxv. Para cada período, o somatório de volume de um dado petróleo vindo do terminal marítimo para a refinaria deve ser igual ao total deste petróleo processado na destilação.
- xxvi. Para cada período e produto craqueável, o volume em estoque no início do período mais o que foi produzido por processamento menos o que degradou para outro produto menos o volume em estoque no final do período deve ser igual ao volume processado no FCC.
- xxvii. Idem anterior, exceto pela parcela de degradação que deixa de existir, visto que esta restrição é válida para produtos craqueáveis que não podem ser misturados.
- xxviii. Para cada período e produto tipo RV não craqueável, o volume em estoque no início do período mais o que foi produzido por degradação menos o volume em estoque no final do período deve ser igual ao total processado nas unidades (coque e desasfaltação) que têm o produto em questão como carga.
- xxix. Para cada período e produto tipo RV craqueável, o volume em estoque no início do período mais o que foi produzido por degradação menos o volume em estoque no final do período deve ser igual ao total processado no FCC.
- xxx. Para cada período e produto do tipo diesel ou instáveis, o volume produzido por processamento menos o que degradou para outro produto deve ser igual ao volume total tratado nas unidades de tratamento (HDS e HDT) nas campanhas tipo diesel.
- xxxi. Para cada período e produto do tipo querosene, o volume produzido por processamento menos o que degradou para outro produto deve ser igual ao volume total tratado nas unidades de tratamento (HDS e HDT) em todas as campanhas.
- xxxii. Para cada período e produto (intermediário ou final) não consumido por processamento, o volume em estoque no início do período mais o que foi produzido

---

<sup>26</sup> Para simplificar o modelo, todas as refinarias foram consolidadas em uma única, em um único local (BR).

por processamento mais o volume advindo do terminal deve ser igual ao volume enviado para o terminal mais o total que foi degradado para outros produtos mais o volume em estoque no final do período.

- xxxiii. Para cada período e produto intermediário não consumido por processamento, o volume produzido por processamento deve ser igual ao volume total degradado para outros produtos.
- xxxiv. Para cada período e produto final não consumido nem por processamento nem por degradação e produzido exclusivamente por processamento, o volume em estoque no início do período mais o que foi produzido por processamento mais o volume advindo do terminal deve ser igual ao volume enviado para o terminal mais o volume em estoque no final do período.
- xxxv. Para cada período e produto final não produzido por processamento e não consumido de forma alguma, o volume em estoque no início do período mais o total produzido por degradação de outros produtos mais o volume advindo do terminal deve ser igual ao volume enviado para o terminal mais o volume em estoque no final do período.
- xxxvi. Para cada período e produto final produzido por processamento ou degradação e que não seja consumido de forma alguma, o volume em estoque no início do período mais o que foi produzido por processamento mais o total produzido por degradação de outros produtos mais o volume advindo do terminal deve ser igual ao volume enviado para o terminal mais o volume em estoque no final do período.
- xxxvii. Para cada período e produto final com mercado apenas no exterior (Gas.Exp.), o volume em estoque no início do período mais o total produzido por degradação de outros produtos mais o volume advindo do terminal deve ser igual ao volume enviado para o terminal mais o volume em estoque no final do período.
- xxxviii. Para cada período, cada local no exterior com demanda de produtos e cada produto final demandado no exterior, o volume de produto enviado do terminal para o local externo deve ser igual ao volume exportado.
- xxxix. Para cada período, cada local no exterior com oferta de produtos e cada produto final ofertado no exterior, o volume de produto enviado do local externo para o terminal deve ser igual ao volume importado no período anterior (a decisão de importação ocorre com um período de antecedência) mais o volume extra importado no período atual.

- XL. Para cada período e cada produto tipo petróleo, o volume produzido de petróleo deve ser igual ao volume de produto enviado da plataforma de produção para o terminal.
- XLI. Para cada período e cada produto transportável, o volume que chega no terminal (advindo dos vários locais) deve ser igual ao volume que sai do terminal (para os vários locais).
- XLII. Para cada período e cada produto tipo petróleo, o volume produzido de petróleo mais o que foi importado deve ser igual ao volume exportado do produto mais o que foi refinado na destilação.
- XLIII. Para cada período e cada produto com demanda no mercado interno, o total de produto enviado do terminal para o mercado interno deve ser igual ao volume vendido no mercado interno.

#### **8.2.6.2. Restrições de Qualidade**

- XLIV. Para cada período, o volume total degradado de nafta DD ao pool de gasolina dividido pelo volume total de produto (nafta DD + nafta craqueada) degradado ao pool de gasolina deve ser menor que o teor (%) máximo de nafta DD no pool de gasolina. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- XLV. Para cada período, o volume total degradado de nafta DD ao pool de gasolina dividido pelo volume total de produto (nafta DD + nafta craqueada) degradado ao pool de gasolina deve ser maior que o teor (%) mínimo de nafta DD no pool de gasolina. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- XLVI. Para cada período, unidade do tipo tratamento, campanha e derivado produzido nas unidades de tratamento, o total de enxofre equivalente em massa (somatório de: volume de carga multiplicado pela sua densidade, pelo seu teor (%) de enxofre e pelo rendimento do derivado em questão) que entra na carga da unidade de tratamento multiplicado por 100% menos o teor (%) de remoção de enxofre é igual à massa (mil ton) de enxofre que sai com o derivado da unidade de tratamento.
- XLVII. Para cada período e derivado produzido por degradação em que o teor de enxofre é uma restrição, o volume total de produto degradado para o derivado em questão multiplicado pela densidade do produto consumido por degradação e pelo seu teor de enxofre é igual à massa (mil ton) de enxofre no derivado produzido por degradação.



- XLVIII. Para cada período e produto do tipo diesel ou querosene, o total de enxofre em massa que sai com o produto da unidade de tratamento mais o total de enxofre em massa no produto produzido por degradação dividido pela massa total de produto produzido (via unidade de tratamento e/ou via degradação) deve ser menor que ou igual ao teor (%) máximo de enxofre permitido no produto em questão. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- XLIX. Para cada período e produto do tipo óleo combustível ou bunker, o total de enxofre em massa no produto produzido por degradação dividido pela massa total de produto produzido (via degradação) deve ser menor que ou igual ao teor (%) máximo de enxofre permitido no produto em questão. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- L. Para cada período e derivado em que a viscosidade é uma restrição de qualidade, o somatório do volume de produto consumido por degradação multiplicado pelo seu respectivo índice de viscosidade, dividido pelo volume total de produto degradado para o derivado em questão deve ser menor que o índice máximo de viscosidade para o derivado em questão. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- LI. Para cada período e derivado em que a viscosidade é uma restrição de qualidade, o somatório do volume de produto consumido por degradação multiplicado pelo seu respectivo índice de viscosidade, dividido pelo volume total de produto degradado para o derivado em questão deve ser maior que o índice mínimo de viscosidade para o derivado em questão. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.

### **8.2.6.3. Restrições de Estoque**

- LII. Para cada período e grupo de estoque de produtos do tipo claros, o total de produtos claros estocado no final do período deve ser inferior ao volume máximo permitido para o grupo em questão.
- LIII. Idem anterior, mas para produtos escuros.
- LIV. Estoque inicial igual a zero para todos os produtos.

#### **8.2.6.4. Restrições de Transporte / Fluxo**

- L.V. Para cada período e para o grupo transporte tipo claros, o somatório de volume dos produtos do tipo claros movimentados entre o terminal e o local com refinaria não pode superar o limite máximo do grupo em questão entre esses dois locais.
- L.VI. Para cada período e para o grupo transporte tipo escuros, o somatório de volume dos produtos do tipo escuros movimentados entre o terminal e o local com refinaria não pode superar o limite máximo do grupo em questão entre esses dois locais.
- L.VII. Para cada período e para o grupo transporte tipo petróleo, o somatório de volume dos produtos do tipo petróleo movimentados entre o terminal e o local com refinaria não pode superar o limite máximo do grupo em questão entre esses dois locais.
- L.VIII. Esta restrição impede que haja fluxo de produto entre dois locais sem arco de ligação. Se existir arco entre dois locais quaisquer, o limite superior para o fluxo de produtos é bastante grande, não representando, na verdade, uma restrição. Caso não haja arco, o limite superior passa a ser zero.
- L.IX. Esta restrição impede que haja movimentação de derivados de petróleo entre o local com plataforma de produção de petróleo e o terminal. Entre estes dois locais só há movimentação de petróleo.
- L.X. Esta restrição impede que volumes de produtos sem opção de exportação sejam movimentados entre o terminal e os locais no exterior.
- L.XI. Esta restrição impede que volumes de produtos sem opção de importação sejam movimentados entre os locais no exterior e o terminal nacional.

#### **8.2.6.5. Restrições de Processamento**

- L.XII. Para cada período e unidade (exceto unidades de tratamento), o volume total processado não deve superar a capacidade máxima da unidade em questão.
- L.XIII. Para cada período e cada unidade de tratamento, o volume total processado não deve superar a capacidade máxima da unidade em questão.
- L.XIV. Para cada período e unidade do tipo tratamento, o volume total de produto do tipo instável que entra como carga na unidade dividido pela carga total da unidade não deve superar o teor (%) máximo de instáveis na carga da unidade. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.

- LXV. Para cada período e unidade do tipo tratamento, o volume total de produto do tipo GOLK que entra como carga na unidade dividido pela carga total da unidade não deve superar o teor (%) máximo de GOLK na carga da unidade. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- LXVI. Para cada período e unidade do tipo tratamento, o volume total de produto do tipo LCO que entra como carga na unidade dividido pela carga total da unidade não deve superar o teor (%) máximo de LCO na carga da unidade. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- LXVII. Para cada período e unidade do tipo FCC, o volume total de produto do tipo RV que entra como carga na unidade dividido pela carga total da unidade não deve superar o teor (%) máximo de RV na carga da unidade. Isto fica mais claro reorganizando-se os termos da restrição.
- LXVIII. Para cada período, unidade do tipo destilação e derivado oriundo da destilação exceto GLP, o volume total de petróleo que entra como carga na unidade multiplicado pelo respectivo rendimento do derivado é igual ao volume produzido por processamento do derivado em questão.
- LXIX. Para cada período, unidade do tipo FCC e derivado oriundo do FCC exceto GLP, o volume total de produto que entra como carga na unidade multiplicado pelo respectivo rendimento do derivado é igual ao volume produzido por processamento do derivado em questão.
- LXX. Para cada período, unidade do tipo coque e derivado oriundo do coque exceto GLP, o volume total de produto que entra como carga na unidade multiplicado pelo respectivo rendimento do derivado é igual ao volume produzido por processamento do derivado em questão.
- LXXI. Para cada período, unidade do tipo desasfaltação e derivado oriundo da desasfaltação, o volume total de produto que entra como carga na unidade multiplicado pelo respectivo rendimento do derivado é igual ao volume produzido por processamento do derivado em questão.
- LXXII. Para cada período, o volume total de produto que entra como carga na destilação multiplicado pelo respectivo rendimento de GLP mais o volume total de produto que entra como carga no FCC multiplicado pelo respectivo rendimento de GLP mais o

volume total de produto que entra como carga no coque multiplicado pelo respectivo rendimento de GLP é igual ao volume produzido por processamento de GLP.

- LXXIII. Para cada período e derivado oriundo das unidades do tipo tratamento, o volume total de produto que entra como carga em todas as unidades e campanhas multiplicado pelo respectivo rendimento do derivado é igual ao volume produzido por processamento do derivado em questão.
- LXXIV. Para cada período e produto não produzido por processamento, o volume de produção por processamento deve ser igual a zero.
- LXXV. Esta restrição impede que haja degradações incompatíveis entre dois produtos. Se um produto puder ser degradado para outro, o limite superior para a degradação de produtos é bastante grande, não representando, na verdade, uma restrição. Caso contrário, o limite superior passa a ser zero.
- LXXVI. Esta restrição obriga que um produto carga das unidades de tratamento entre na campanha QAV somente se ele tiver rendimento de QAV nesta campanha.
- LXXVII. Esta restrição obriga que um produto carga das unidades de tratamento entre na campanha DSL500 somente se ele tiver rendimento de DSL500 nesta campanha.
- LXXVIII. Esta restrição obriga que um produto carga das unidades de tratamento entre na campanha DSL2000 somente se ele tiver rendimento de DSL2000 nesta campanha.
- LXXIX. Para cada período e derivado do tipo querosene, o volume do derivado produzido por processamento somado ao volume produzido por degradação não deve superar o limite máximo de produção de QAV.

#### **8.2.6.6. Restrições de Comercialização**

- LXXX. Para cada período e produto demandado no mercado interno, o volume vendido no mercado interno deve ser exatamente igual ao volume demandado (atendimento pleno do mercado é obrigatório).
- LXXXI. Para cada período e produto demandado no exterior, o volume de produto exportado não deve superar o volume demandado externamente.
- LXXXII. Para cada período e produto ofertado no exterior, o volume de produto importado não deve superar o volume ofertado externamente.

LXXXIII. Para cada período e petróleo disponibilizado na plataforma, o volume de petróleo produzido deve ser igual ao volume máximo ofertado.

Com relação à função objetivo se quer minimizar o prejuízo, ou seja, minimizar a diferença entre os custos (de importação, de utilização das unidades, de degradação, de transporte e de estoques) e receitas (com venda de produtos no mercado interno e com exportações).