

Universidade Estadual de Campinas
Faculdade de Engenharia Química
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos
Laboratório de Desenvolvimento de Processos de Separação

**SIMULAÇÃO, ANÁLISE E OTIMIZAÇÃO DAS COLUNAS
ATMOSFÉRICA E DEBUTANIZADORA DA UNIDADE DE
DESTILAÇÃO DE REFINO DE PETRÓLEO**

Autora: Érika Yamanishi

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Maria Regina Wolf Maciel

Dissertação de Mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Química
como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em
Engenharia Química.

Campinas – São Paulo
Fevereiro de 2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Y14s Yamanishi, Érika
Simulação, análise e otimização das colunas atmosférica e
debutanizadora da unidade de destilação de refino de
petróleo / Érika Yamanishi.--Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Maria Regina Wolf Maciel
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Química.

1. Petróleo. 2. Destilação. 3. Petróleo – Refinaria. I.
Maciel, Maria Regina Wolf. II. Universidade Estadual de
Campinas. Faculdade de Engenharia Química. III. Título.

Título em Inglês: Simulation, analysis and optimization of the atmospheric and
debutanizer columns of the petroleum distillation unit

Palavras-chave em Inglês: Petroleum, Distillation, Atmospheric column,
debutanizer column

Área de concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos

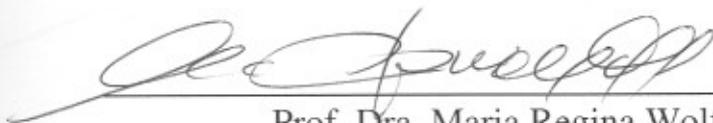
Titulação: Mestre em Engenharia Química

Banca examinadora: Reginaldo Guirardello e Eduardo Coselli Vasco de Toledo

Data da defesa: 15/02/2007

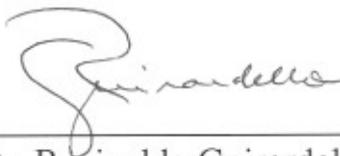
Programa de Pós-Graduação: Engenharia Química

Dissertação de Mestrado defendida por Érika Yamanishi e aprovada em 15 de fevereiro de 2007 pela banca examinadora constituída pelos doutores:



Prof. Dra. Maria Regina Wolf Maciel

(Orientadora)



Prof. Dr. Reginaldo Guirardello



Dr. Eduardo Coselli Vasco de Toledo

200721852

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em
Engenharia Química.


Orientador

Dedico este trabalho aos meus pais, Maria e Paulo.

AGRADECIMENTOS:

A Deus pela força dada em todos os momentos, principalmente nos mais difíceis.

Aos meus pais, Maria e Paulo, pelo apoio, incentivo, carinho e amor em todos os momentos.

A minha irmã, Bruna, por todo amor e amizade.

A minha prima Fabiana Matie Sato por todo apoio e amizade.

À Prof^a. Dr^a. Maria Regina Wolf Maciel pela orientação e ajuda na realização deste trabalho.

Ao Magno Schiavolin pela ajuda e visita técnica na Refinaria de Paulínia (REPLAN).

Ao Antonio Carlos Miatti e à Edna Marques dos Reis Povoá pela ajuda e visita técnica na Refinaria de Capuava (RECAP).

À Claudia Jovita Garcia Vasconcelos pelas sugestões e pelos comentários sobre o trabalho.

Ao Carlos Henrique Rodrigues pela ajuda na realização do trabalho e pela nossa amizade.

A todos meus colegas de Laboratório pela amizade e pelo apoio.

À Faculdade de Engenharia Química da UNICAMP.

Ao Laboratório de Desenvolvimento de Processos de Separação (LDPS).

À CAPES pelo apoio financeiro.

RESUMO

A Unidade de Destilação é uma das mais importantes no refino de petróleo. Sua importância está no fato desta unidade ser responsável pelo fracionamento inicial do petróleo em diversos produtos (frações) como Nafta, Querosene, Diesel, entre outros. Algumas das frações obtidas são retiradas como produtos finais e outras podem ser processadas em outras unidades da refinaria. Assim, todas as mudanças de operações e perturbações ocorridas nesta unidade afetam diretamente outras unidades. Por este motivo, é possível verificar uma grande dependência das outras unidades em relação à unidade de destilação que exige flexibilidade para atender às necessidades da refinaria. Além disso, é possível observar que o processo de destilação do petróleo é complexo devido ao grande número de diferentes componentes do petróleo (em sua maioria hidrocarbonetos).

De acordo com os aspectos e a importância da unidade de destilação, um estudo (principal objetivo deste trabalho) foi realizado para a verificação da flexibilidade da unidade de destilação e o entendimento do processo de destilação, visando seu desenvolvimento. Inicialmente, foi considerado um processo de destilação do petróleo, envolvendo a Torre Pré-Flash, Coluna Atmosférica e Debutanizadora. Três principais aspectos foram abordados: a análise completa das principais variáveis do processo, a otimização das Colunas Atmosférica e Debutanizadora e a avaliação do processamento dos óleos leve, intermediário e pesado sob determinadas condições especificadas. As simulações computacionais foram realizadas através de um software comercial neste trabalho.

A análise das principais variáveis do processo permitiu que fossem verificados os efeitos no processo. Isto significa que pode ser realizada a análise sensitiva das principais variáveis do processo, mostrando os principais efeitos causados pelas mudanças das variáveis.

A otimização do número de estágios e posição da alimentação da Coluna Debutanizadora foi realizada para a minimização da carga térmica do refeedor. Já, a otimização do número de estágios da Coluna Atmosférica foi realizada para a minimização da vazão de Resíduo.

A avaliação realizada para o processamento dos três diferentes tipos de petróleo possibilitou verificar o aumento significativo da vazão de resíduo atmosférico e a redução de produtos, exceto o diesel pesado no processo de destilação considerado, envolvendo, neste caso, uma Coluna Pré-fracionadora e uma Coluna Atmosférica.

Palavras-Chave: Petróleo, Destilação, Coluna Atmosférica e Coluna Debutanizadora.

ABSTRACT

The crude distillation unit is the most important in the refining process. Its importance is due to the fact that this unit is responsible for the first fractionation of the petroleum in various products (fractions) as naphtha, kerosene, diesel and others. Some of these fractions obtained are removed as final product and others can be processed in other units of the refinery. In this way, all the operating and disturbance changes that occur in this unit affect directly other units. So, it is possible to verify the dependence of the others units related to the distillation unit that requires flexibility to supply the needs of the refinery. Furthermore, it is possible to observe that the crude distillation is complex due to the great number of different components of the petroleum.

According to the aspects and the importance of the crude distillation, a study was carried out for the verification of the crude distillation flexibility and the knowledge of the distillation process, intending the development of the crude distillation. Initially, a crude distillation process, involving a Pre-Flash Drum, Atmospheric and Debutanizer Columns was considered in this work. Three main aspects were studied: the complete analysis of the main process variable, the optimization of the Atmospheric and Debutanizer Columns and the evaluation of the processing of the light, intermediate and heavy petroleum under specified conditions. The computational simulations were carried out, using commercial software in this study.

The analysis of the main process variables allowed that the effects on the process were verified. This means that the sensitivity analysis of the main process variables could be made, showing the main effects caused by the variable changes.

The optimization of the number of trays and the feed tray of the Debutanizer Column was carried out for the minimization of the reboiler duty. Furthermore, the optimization of the tray of the Atmospheric Column was done for the minimization of the residue flow rate.

The evaluation of the results for the processing of three different types of petroleum allowed verifying the significant increase of the residue atmospheric flow rate and the reduction of the products, except heavy diesel in the considered crude distillation process, involving, in this case, the Prefractionation and Atmospheric Column.

Keywords: Petroleum, Distillation, Atmospheric Column and Debutanizer Column.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVO | 1 |
| 1.1 - Introdução | 1 |
| 1.2 - Objetivo desta dissertação de mestrado | 3 |
| 1.3 - Organização do Trabalho | 4 |
| CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS APLICADOS À DESTILAÇÃO DO PETRÓLEO | 5 |
| 2.1 - Petróleo | 5 |
| 2.2 - Composição do Petróleo | 6 |
| 2.2.1 - Hidrocarbonetos | 8 |
| 2.2.1.1 - Parafinas | 8 |
| 2.2.1.2 - Naftenos | 9 |
| 2.2.1.3 - Aromáticos | 9 |
| 2.2.1.4 - Hidrocarbonetos Insaturados | 9 |
| 2.2.2 - Compostos Orgânicos e Inorgânicos | 10 |
| 2.2.2.1 - Compostos de Enxofre | 10 |
| 2.2.2.2 - Compostos de Oxigênio | 11 |
| 2.2.2.3 - Compostos de Nitrogênio | 11 |
| 2.2.2.4 - Constituintes Metálicos | 12 |
| 2.3 - Propriedades do Petróleo e Frações (Produtos) | 12 |
| 2.3.1 - Análise de Composição Química (Elemento) | 13 |
| 2.3.2 - Densidade | 14 |
| 2.3.3 - Viscosidade | 14 |
| 2.3.4 - Tensão Superficial | 15 |
| 2.3.5 - Volatilidade | 16 |
| 2.4 - Ensaio de destilação: Caracterização do petróleo e frações | 17 |
| 2.4.1 - Curvas ASTM e PEV (Ponto de Ebulição Verdadeiro) | 17 |
| 2.4.2 - Curvas EFV (<i>Equilibrium Flash Vaporization</i>) | 18 |
| 2.4.3 - Definições para a curva de destilação | 18 |
| 2.4.4 - Ponto de corte | 21 |
| 2.5 - Frações de Petróleo - Produtos | 24 |
| 2.6 - Caracterização da Corrente de Petróleo no Simulador | 27 |

| | |
|--|-----|
| 2.7 - Refinaria | 28 |
| 2.7.1 - Unidade de Destilação | 31 |
| 2.7.1.1 - Pré-Tratamento | 33 |
| 2.7.1.2 - Coluna Atmosférica | 33 |
| 2.7.1.3 - Coluna Debutanizadora | 37 |
| 2.7.1.4 - Coluna de Destilação a Vácuo | 37 |
| 2.8 - Revisão de Literatura | 38 |
| CAPÍTULO 3 - ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO DO PETRÓLEO | 42 |
| 3.1 - Descrição do processo em estudo | 42 |
| 3.1.1 - Especificações de equipamento da Coluna Atmosférica e Debutanizadora | 47 |
| 3.1.2 - Caracterização das frações obtidas no processo | 49 |
| 3.1.3 - Caracterização da corrente de alimentação: Geração de pseudocomponentes | 49 |
| 3.2 - Torre Pré-Flash | 53 |
| 3.2.1 - Avaliação da Temperatura | 53 |
| 3.2.2 - Avaliação da Pressão | 55 |
| 3.3 - Coluna Atmosférica | 56 |
| 3.3.1 - Estabelecimento de um Caso Base: Considerações adotadas | 56 |
| 3.3.2 - Avaliação da Temperatura da Corrente de Alimentação | 60 |
| 3.3.3 - Avaliação do Vapor Principal | 65 |
| 3.3.4 - Avaliação do Vapor da Coluna de <i>Stripping</i> | 72 |
| 3.3.5 - Avaliação dos Rendimentos | 82 |
| 3.3.6 - Avaliação do Refluxo Circulante | 88 |
| 3.3.6.1 - Retirada do Primeiro Refluxo Circulante | 99 |
| 3.3.6.2 - Retirada do Segundo Refluxo Circulante | 100 |
| 3.3.6.3 - Retirada do Terceiro Refluxo Circulante | 102 |
| 3.3.7 - Avaliação dos Estágios da Coluna Atmosférica | 104 |
| 3.3.7.1 - Variação do número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação | 104 |
| 3.3.7.2 - Variação nos estágios da seção de esgotamento | 111 |
| 3.3.7.3 - Variação do número de estágios entre as retiradas de produtos | 112 |
| 3.3.7.3.1 - Retirada de gasóleo e diesel | 112 |
| 3.3.7.3.2 - Retirada de diesel e querosene | 116 |

| | |
|---|-----|
| 3.3.7.3.3 - Retirada de nafta e querosene | 123 |
| 3.3.8 - Avaliação dos Estágios da Coluna de <i>Stripping</i> | 127 |
| 3.4 - Coluna Debutanizadora | 132 |
| 3.4.1 - Considerações para as simulações da Coluna Debutanizadora | 133 |
| 3.4.2 - Estudo do efeito da variação da carga térmica do refeedor | 134 |
| 3.5 - Processo Global | 136 |
| 3.6 - Conclusão | 144 |
| CAPÍTULO 4 - OTIMIZAÇÃO DAS COLUNAS ATMOSFÉRICA E DEBUTANIZADORA | 148 |
| 4.1 - Otimização da Coluna Debutanizadora | 148 |
| 4.2 - Otimização da Coluna Atmosférica | 157 |
| 4.2.1 - Considerações | 158 |
| 4.2.2 - Resultados | 160 |
| 4.3 - Conclusão | 172 |
| CAPÍTULO 5 - ESTUDO DO PROCESSAMENTO DO ÓLEO LEVE, INTERMEDIÁRIO E PESADO | 174 |
| 5.1 - Descrição do Processo | 174 |
| 5.2 - Dados do Petróleo | 178 |
| 5.3 - Especificações e Considerações para as simulações | 179 |
| 5.4 - Resultados das Simulações | 180 |
| 5.5 - Estudo do Processo de destilação com Pré-Fracionadora e com Torre Pré-Flash | 184 |
| 5.6 - Conclusão | 189 |
| CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES | 190 |
| 6.1 - Conclusões | 190 |
| 6.2 - Sugestões | 193 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 194 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 2.1: Curva de destilação ASTM D86 para querosene: Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado. | 20 |
| Figura 2.2: Curva de destilação PEV (TBP) para querosene: Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado. | 20 |
| Figura 2.3: Curva de Destilação PEV – Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado. | 22 |
| Figura 2.4: Determinação do Ponto de Corte em uma curva de destilação TBP (PEV). | 23 |
| Figura 2.5: Diagrama simplificado de uma refinaria de petróleo. | 31 |
| Figura 2.6: Diagrama de blocos de uma unidade de destilação de refinaria. | 32 |
| Figura 3.1: Fluxograma básico do processo. | 44 |
| Figura 3.2: Coluna Atmosférica composta por refluxos circulantes e colunas de <i>stripping</i> . | 46 |
| Figura 3.3: Perfis de Vazão de Líquido e Vapor na Coluna Atmosférica em função do número de estágios para o Caso Base. | 58 |
| Figura 3.4: Perfil de Temperatura em função do número de estágios da Coluna Atmosférica para o Caso Base. | 59 |
| Figura 3.5: Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado para os ensaios de destilação (ASTM D86) das frações obtidas de querosene, diesel e gasóleo. | 59 |
| Figura 3.6: Efeito da temperatura de alimentação na temperatura TBP (PEV) do resíduo. | 61 |
| Figura 3.7: Efeito da temperatura de alimentação no PFE (ASTM D86) do gasóleo. | 61 |
| Figura 3.8: Efeito da temperatura de alimentação na carga térmica do condensador. | 63 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.9: Efeito da temperatura de alimentação na porcentagem em volume de sobre vaporizado. | 63 |
| Figura 3.10: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o PIE (TBP) e a temperatura TBP na qual 5% e 10% do volume é vaporizado para o resíduo. | 66 |
| Figura 3.11: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o PFE (ASTM D86) e a temperatura ASTM D86 na qual 95% do volume é vaporizado para o Gasóleo. | 67 |
| Figura 3.12: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o PFE (ASTM D86) e a temperatura ASTM D86 na qual 95% do volume é vaporizado para o Diesel. | 68 |
| Figura 3.13: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Gasóleo-Diesel. | 69 |
| Figura 3.14: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre a porcentagem de sobre vaporizado. | 70 |
| Figura 3.15: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre a carga térmica do Condensador (MW). | 71 |
| Figura 3.16: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3 (kg/h) na fração de Gasóleo. | 74 |
| Figura 3.17: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2 (kg/h) na fração de Diesel. | 74 |
| Figura 3.18: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 1 (kg/h) na fração de Querosene. | 75 |
| Figura 3.19: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3 (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Gasóleo-Diesel. | 76 |
| Figura 3.20: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2 (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Diesel-Querosene. | 77 |
| Figura 3.21: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 1 (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Querosene-Nafta. | 77 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.22: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3 (kg/h) sobre a carga térmica do condensador. | 78 |
| Figura 3.23: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2 (kg/h) sobre a carga térmica do condensador. | 79 |
| Figura 3.24: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 1 (kg/h) sobre a carga térmica do condensador. | 79 |
| Figura 3.25: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3 (kg/h) sobre a porcentagem em volume removido da corrente lateral de Gasóleo. | 80 |
| Figura 3.26: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2 (kg/h) sobre a porcentagem em volume removido da corrente lateral de Diesel. | 81 |
| Figura 3.27: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 1 (kg/h) sobre a porcentagem em volume removido da corrente lateral de querosene. | 81 |
| Figura 3.28: Perfil de temperatura em função dos estágios para a retirada de diesel do caso base e igual a 140 m ³ /h. | 84 |
| Figura 3.29: Perfil de temperatura dos estágios na presença e retirada do primeiro refluxo circulante. | 93 |
| Figura 3.30: Perfil de temperatura dos estágios na presença e retirada do segundo refluxo circulante. | 93 |
| Figura 3.31: Perfil de temperatura dos estágios na presença e retirada do terceiro refluxo circulante. | 94 |
| Figura 3.32: Perfil da vazão de líquido em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do primeiro refluxo circulante. | 95 |
| Figura 3.33: Perfil de vazão de líquido em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do segundo refluxo circulante. | 96 |
| Figura 3.34: Perfil de vazão de líquido em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do terceiro refluxo circulante. | 96 |
| Figura 3.35: Perfil de vazão de vapor em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do primeiro refluxo circulante. | 97 |

| | |
|--|-----|
| Figura 3.36: Perfil de vazão de vapor em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do segundo refluxo circulante. | 97 |
| Figura 3.37: Perfil de vazão de vapor em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do terceiro refluxo circulante. | 98 |
| Figura 3.38: Vazão de Gasóleo obtida em função do número de estágio total. | 108 |
| Figura 3.39: Vazão de Resíduo Atmosférico em função do número de estágio total. | 108 |
| Figura 3.40: Vazão de Diesel obtida em função do número de estágio total. | 114 |
| Figura 3.41: Vazão de Gasóleo obtida em função do número de estágio total. | 114 |
| Figura 3.42: Vazão de Querosene obtida em função do número de estágio total. | 119 |
| Figura 3.43: Vazão de Diesel obtida em função do número de estágio total. | 119 |
| Figura 3.44: Gap 5-95 (Querosene-Nafta) em função do número de estágios. | 121 |
| Figura 3.45: Gap 5-95 (Diesel-Querosene) em função do número de estágios. | 122 |
| Figura 3.46: Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) em função do número de estágios. | 122 |
| Figura 3.47: Vazão de Nafta obtida em função do número de estágio total. | 125 |
| Figura 3.48: Vazão de Querosene obtida em função do número de estágio total. | 125 |
| Figura 3.49: Vazão de Nafta Estabilizada (NE) e GLP, obtidos na Coluna Debutanizadora em função da Temperatura de operação do Pré-Flash. | 140 |
| Figura 3.50: Vazão de nafta obtida na Coluna Atmosférica em função da Temperatura de operação do Pré-Flash. | 140 |
| Figura 3.51: Pressão de Vapor Reid da Nafta Estabilizada em função da Temperatura de operação do Pré-Flash. | 141 |
| Figura 3.52: PFE de nafta (ASTM D86) obtida na Coluna Atmosférica em função da Temperatura de operação do Pré-Flash. | 143 |
| Figura 3.53: Consumo energético para aquecer a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica em função da Temperatura de operação do Pré-Flash. | 144 |
| Figura 4.1: Carga térmica do refulvedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 15 estágios. | 153 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4.2: Carga térmica do refeedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 20 estágios. | 153 |
| Figura 4.3: Carga térmica do refeedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 25 estágios. | 154 |
| Figura 4.4: Carga térmica do refeedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 30 estágios. | 154 |
| Figura 4.5: Carga térmica do refeedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 35 estágios. | 155 |
| Figura 4.6: Carga térmica do refeedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 40 estágios. | 155 |
| Figura 4.7: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 345°C. | 163 |
| Figura 4.8: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 350°C. | 164 |
| Figura 4.9: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 355°C. | 164 |
| Figura 4.10: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 360°C. | 165 |
| Figura 4.11: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 365°C. | 165 |
| Figura 4.12: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 370°C. | 166 |

| | |
|--|-----|
| Figura 4.13: Vazão de Resíduo em função da temperatura da corrente de alimentação para diversos valores de número de estágios na seção de esgotamento. | 171 |
| Figura 4.14: Vazão de Resíduo em função do consumo energético para diversos valores de número de estágios na seção de esgotamento. | 172 |
| Figura 5.1: Fluxograma do processo no ambiente de simulação do HYSYS. | 175 |
| Figura 5.2: Coluna Atmosférica no ambiente de simulação do HYSYS. | 176 |
| Figura 5.3: Gap 5-95 (Diesel Pesado-Diesel Leve) em função da Vazão de Vapor da Coluna de <i>Stripping</i> 3. | 183 |
| Figura 5.4: Processo de destilação envolvendo a Torre Pré-Flash e a Coluna Atmosférica. | 185 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 2.1: Porcentagem em massa dos elementos químicos presentes no petróleo. | 6 |
| Tabela 2.2: Dados de viscosidade de Saybolt a 100°F (38°C) e 210°F (99°C) para diversos valores de viscosidade cinemática. | 15 |
| Tabela 2.3: Faixas de temperatura de ebulição considerada para as frações (Watkins, 1979). | 24 |
| Tabela 3.1: Especificações de projeto da coluna atmosférica. | 48 |
| Tabela 3.2: Dados do petróleo – Densidade e Curva PEV. | 50 |
| Tabela 3.3: Composição dos <i>light-ends</i> do petróleo. | 50 |
| Tabela 3.4: Composição em fração molar dos componentes e pseudocomponentes gerados pelo simulador HYSYS. | 52 |
| Tabela 3.5: Principais resultados obtidos - Temperatura de operação da Torre Pré-Flash. | 54 |
| Tabela 3.6: Principais resultados obtidos - Pressão de operação da Torre Pré-Flash. | 55 |
| Tabela 3.7: Apresentação das principais especificações do caso base para a Coluna Atmosférica. | 57 |
| Tabela 3.8: Principais resultados obtidos da simulação do caso base. | 60 |
| Tabela 3.9: Razão de Refluxo e Consumo energético em função da temperatura de alimentação da Coluna Atmosférica. | 64 |
| Tabela 3.10: Temperatura nos estágios para a retirada em duas situações: 165,2 m ³ /h e 140 m ³ /h de diesel. | 83 |
| Tabela 3.11: Efeito do aumento de retirada de Diesel sobre as correntes de produtos. | 85 |
| Tabela 3.12: Resultados obtidos para regulagem do PFE do Diesel, variando o rendimento de Gasóleo. | 86 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 3.13: Gap 5-95 Gasóleo-Diesel para cada respectiva vazão de Diesel e Gasóleo. | 88 |
| Tabela 3.14: Principais resultados das simulações para verificar o efeito de retirada do primeiro refluxo circulante. | 90 |
| Tabela 3.15: Principais resultados das simulações para verificar o efeito de retirada do segundo e terceiro refluxo circulante. | 91 |
| Tabela 3.16: Alteração no PFE (ASTM D86) das frações com a retirada do segundo e do terceiro refluxo circulante. | 92 |
| Tabela 3.17: Localização da posição de alimentação e resíduo em função do número total de estágio. | 105 |
| Tabela 3.18: Especificação do PFE (ASTM D86) dos produtos para as simulações realizadas. | 105 |
| Tabela 3.19: Vazões de resíduo e produtos obtidos em função da variação do número de estágio total. | 106 |
| Tabela 3.20: Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel), Razão de Refluxo e Vazão de Sobrevaporizado em função da variação do número de estágios. | 107 |
| Tabela 3.21: Porcentagem em volume de gasóleo e resíduo, obtidos com a variação do número de estágios. | 110 |
| Tabela 3.22: Vazões de resíduo e produtos obtidos em função da variação do número de estágios da seção de esgotamento. | 111 |
| Tabela 3.23: Localização das correntes de retirada e retorno da Coluna de <i>Stripping</i> 3, alimentação e resíduo em função do número de estágios da Coluna Atmosférica. | 113 |
| Tabela 3.24: Principais resultados obtidos nas simulações em função do número de estágio total (variação do número de estágios na seção entre a retirada de gasóleo e diesel). | 113 |
| Tabela 3.25: Localização das correntes de retirada e retorno da Coluna de <i>Stripping</i> 2 e 3, alimentação e resíduo em função do número de estágios da Coluna Atmosférica. | 117 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 3.26: Principais resultados obtidos nas simulações em função do número de estágios total (variação do número de estágios entre a retirada de diesel e querosene). | 118 |
| Tabela 3.27: Diferença porcentual em volume dos produtos em relação ao caso base. | 120 |
| Tabela 3.28: Localização das correntes de retirada e retorno da coluna de <i>Stripping</i> 1, 2 e 3, alimentação e resíduo em função do número de estágios da Coluna Atmosférica. | 123 |
| Tabela 3.29: Principais resultados obtidos nas simulações em função do número de estágios (variação do número de estágios entre a retirada de nafta e querosene). | 124 |
| Tabela 3.30: Principais resultados obtidos com a variação do número de estágios da coluna de <i>stripping</i> 1 (querosene). | 128 |
| Tabela 3.31: Principais resultados obtidos com a variação do número de estágios da coluna de <i>stripping</i> 2 (diesel). | 129 |
| Tabela 3.32: Principais resultados obtidos com a variação do número de estágios da coluna de <i>stripping</i> 3 (gasóleo). | 130 |
| Tabela 3.33: Principais especificações da Coluna Debutanizadora para as simulações. | 133 |
| Tabela 3.34: Principais resultados obtidos nas simulações realizadas para diversos valores de carga térmica de refeedor. | 135 |
| Tabela 3.35: Variáveis especificadas para as simulações do processo. | 138 |
| Tabela 3.36: Resultados principais obtidos nas simulações do processo. | 139 |
| Tabela 4.1: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 15 estágios. | 150 |
| Tabela 4.2: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 20 estágios. | 150 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4.3: Cargas térmicas do condensador e do refulvedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 25 estágios. | 151 |
| Tabela 4.4: Cargas térmicas do condensador e do refulvedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 30 estágios. | 151 |
| Tabela 4.5: Cargas térmicas do condensador e do refulvedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 35 estágios. | 152 |
| Tabela 4.6: Cargas térmicas do condensador e do refulvedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 40 estágios. | 152 |
| Tabela 4.7: Posição de alimentação ótima em função do número de estágios da coluna debutanizadora com seus respectivos valores de carga térmica do condensador e do refulvedor e de razão de refluxo. | 157 |
| Tabela 4.8: Principais especificações para a Coluna Atmosférica. | 159 |
| Tabela 4.9: Posição de alimentação em função do número total de estágios da coluna e do número de estágios na seção de esgotamento para as simulações realizadas. | 160 |
| Tabela 4.10: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 345°C. | 161 |
| Tabela 4.11: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 350°C. | 161 |
| Tabela 4.12: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 355°C. | 162 |
| Tabela 4.13: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 360°C. | 162 |
| Tabela 4.14: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 365°C. | 162 |
| Tabela 4.15: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 370°C. | 163 |

| | |
|--|-----|
| Tabela 4.16: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.7). | 169 |
| Tabela 4.17: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.8). | 169 |
| Tabela 4.18: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.9). | 169 |
| Tabela 4.19: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.10). | 169 |
| Tabela 4.20: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.11). | 169 |
| Tabela 4.21: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.12). | 169 |
| Tabela 4.22: Consumo energético em função da temperatura da corrente de alimentação. | 170 |
| Tabela 5.1: Localização das correntes de retirada e retorno na Coluna Atmosférica. | 177 |
| Tabela 5.2: Dados do petróleo: Densidade e Curva PEV. | 178 |
| Tabela 5.3: Composição dos <i>light-ends</i> do petróleo. | 179 |
| Tabela 5.4: Especificações para as Colunas Pré-fracionadora e Atmosférica. | 180 |
| Tabela 5.5: Principais resultados obtidos para a Coluna Pré-fracionadora. | 181 |
| Tabela 5.6: Principais resultados obtidos para a Coluna Atmosférica. | 181 |
| Tabela 5.7: Consumo energético do forno para o processo em estudo. | 184 |
| Tabela 5.8: Principais resultados obtidos na Torre Pré-Flash e na Coluna Pré-fracionadora dos processos da Figura 5.1 e 5.4. | 186 |
| Tabela 5.9: Principais resultados obtidos na Coluna Atmosférica para os processos da Figura 5.1 (Torre Pré-Flash) e 5.4 (Coluna Pré-fracionadora). | 187 |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------------------|--|
| ASTM | Association Society for Testing and Materials |
| CVD | Corrente de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2 (diesel) |
| CVDL | Corrente de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2 (diesel leve) |
| CVDP | Corrente de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3 (diesel pesado) |
| CVGO | Corrente de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3 (gasóleo) |
| CVP | Corrente de vapor principal da Coluna Atmosférica |
| CVP1 | Corrente de vapor principal da Coluna Pré-fracionadora |
| CVP2 | Corrente de vapor principal da Coluna Atmosférica (processo da Figura 5.1) |
| CVQ | Corrente de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 1 (querosene) |
| EFV | Equilibrium Flash Vaporization |
| EP | End Point |
| FCC | Fluid Catalytic Cracking |
| GLP | Gás Liquefeito de Petróleo |
| H ₂ S | Ácido Sulfídrico |
| IBP | Initial Boiling Point |
| IP | Institute of Petroleum |
| NBP | Ponto Normal de Ebulição - Pseudocomponente |
| NE | Nafta Estabilizada |
| PEV | Ponto de Ebulição Verdadeiro |
| PFE | Ponto Final de Ebulição |
| PIE | Ponto Inicial de Ebulição |
| PVR | Pressão de Vapor Reid |
| RC1 | Refluxo Circulante 1 |
| RC2 | Refluxo Circulante 2 |
| RC3 | Refluxo Circulante 3 |
| SQP | Sucessive Quadratic Promming |
| TBP | True Boiling Point |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|----------------|---|
| a | Constante da equação 2.2, m^2/s^2 |
| b | Constante da equação 2.2, m^2 |
| F_{CL} | Vazão da corrente lateral da Coluna Atmosférica, m^3/h |
| $F_{produto}$ | Vazão de produto obtido, m^3/h |
| $F_{removida}$ | Vazão efetivamente removida pelo vapor de <i>stripping</i> , m^3/h |
| n | Número de moles |
| N | Número de estágios da seção de esgotamento |
| p | Pressão parcial, kPa |
| P | Pressão, kPa |
| Q | Carga térmica, MW |
| Q-COND | Carga térmica do condensador da Figura 3.2, MW |
| q-condensador | Carga térmica do condensador da Figura 5.2, MW |
| q-forno | Carga térmica do forno, MW |
| Q-RC1 | Carga térmica do refluxo circulante 1, MW |
| Q-RC2 | Carga térmica do refluxo circulante 2, MW |
| Q-RC3 | Carga térmica do refluxo circulante 3, MW |
| S | Viscosidade de Saybolt, s |
| VD | Vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2, kg/h |
| VDL | Vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 2 (diesel leve), kg/h |
| VDP | Vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3 (diesel pesado), kg/h |
| VGO | Vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 3, kg/h |
| VP | Vazão de vapor principal da Coluna Atmosférica, kg/h |
| VP1 | Vazão de vapor principal da Coluna Pré-fracionadora, kg/h |
| VP2 | Vazão de vapor principal da Coluna Atmosférica (processo da Figura 5.1), kg/h |
| VQ | Vazão de vapor de água da coluna de <i>stripping</i> 1, kg/h |
| x | Composição da fase líquida |
| y | Composição da fase vapor |

SUBSCRITO

| | |
|------------|---------------------|
| <i>i</i> | Componente <i>i</i> |
| HC | Hidrocarboneto |
| L | Leve |
| P | Pesado |
| água-vapor | Vapor de água |

SOBRESCRITO

| | |
|-----|-----------|
| sat | Saturação |
|-----|-----------|

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO E OBJETIVO

1.1) INTRODUÇÃO

Com os avanços da química e da engenharia, as refinarias atuais são um complexo de diferentes unidades interligadas, gerando diversos produtos, desde a nafta até o óleo combustível. Estes avanços são justificados pela necessidade de diversos produtos exigidos pelo mercado consumidor. Desta forma, uma refinaria precisa ter flexibilidade para que se administre a demanda e a produção de modo a não faltar ou sobrar demais diferentes produtos.

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos, compostos orgânicos e inorgânicos. A destilação desta mistura torna-se muito complexa em função da presença dos inúmeros e diversos componentes. As principais características que diferenciam a destilação do petróleo das destilações convencionais são a grande capacidade de processamento (da ordem de 100 mil barris / dia), a grande diferença de temperatura na coluna atmosférica e produtos que, no caso da destilação do petróleo, são misturas especificadas de acordo com as normas de ensaio de destilação e propriedades padronizadas. Já, no caso da convencional, os produtos são de composição determinada.

No Brasil, a maioria das refinarias processa uma mistura de petróleo importado (leve) e nacional (pesado). Entretanto, estas refinarias têm grande interesse em processar somente o petróleo nacional para evitar as desvantagens da dependência da importação do petróleo leve. Por isso, atualmente, as refinarias da Petrobras têm como objetivo adaptar-se para processar somente o petróleo nacional (cada vez mais pesados).

Devido à grande complexidade da destilação do petróleo, torna-se ainda mais difícil a destilação e o processamento de petróleos mais pesados para a obtenção das frações desejadas. Normalmente, destilação de petróleos mais pesados significa maiores dificuldades e maiores custos devido ao pequeno grau de separação entre as frações menos leves. Além disso, ocorrem variações diárias na carga do petróleo a ser processado, gerando dificuldades no processo.

Desta forma, são necessários estudos e investimentos em equipamentos que permitam esta mudança através do desenvolvimento da tecnologia para a destilação e refino de petróleo nacional.

A destilação do petróleo é responsável pelo seu fracionamento inicial. Algumas das frações obtidas podem ser retiradas como produtos finais e outras podem ser, ainda, processadas em outras unidades. A maioria das unidades de refino é subsequente à unidade de destilação, e, por isso, os produtos destas outras unidades dependem fortemente das frações obtidas por destilação, o que torna esta unidade importante, pois as perturbações e todas as operações realizadas nesta unidade serão refletidas nas posteriores. Os reflexos (impactos) provocados pela unidade de destilação ocorrem, também, quando petróleos mais pesados são destilados, pois a quantidade de resíduo aumenta e, conseqüentemente, algumas ou todas as frações serão reduzidas. Aumento da quantidade de resíduo não é favorável, pois o ideal é que se gere o maior rendimento de produtos de maior valor agregado já na destilação para não aumentar a capacidade das unidades que processam resíduo. Dessa maneira, pode-se concluir que esta unidade deve ser flexível para atender às necessidades da refinaria devido a estes possíveis impactos.

A Unidade de Destilação de Petróleo em uma refinaria é constituída, normalmente, de duas principais colunas de destilação: Atmosférica e de Vácuo. Outros equipamentos podem integrar esta unidade como Coluna Pré-Fracionadora ou Torre Pré-Flash, responsáveis pelo fracionamento inicial do petróleo, obtendo-se como produto de topo, nafta instável. Neste caso, o produto de fundo destes equipamentos é a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica. Além disso, Colunas Estabilizadoras (Debutanizadoras), responsáveis pela estabilização da nafta, podem integrar a unidade de destilação.

Inicialmente, o petróleo é processado em dessalgadoras que são responsáveis pela retirada de sais inorgânicos e água. Em seguida, este é pré-aquecido por uma rede de trocadores de calor. Geralmente em refinarias após o processo de dessalgação e o aquecimento, o petróleo pode ainda ser processado (pré-fracionado) em coluna de destilação pré-fracionadora ou em torre pré-flash antes de alimentar a Coluna Atmosférica. Caso não tenha pré-fracionamento na unidade de destilação, o petróleo pré-aquecido alimenta um forno e em seguida a Coluna Atmosférica. Normalmente, o produto de fundo da coluna pré-fracionadora ou da torre pré-flash é aquecido novamente por uma rede de

trocadores de calor e um forno. Após este aquecimento, o petróleo (produto de fundo da coluna pré-fracionadora ou da torre pré-flash) alimenta a Coluna Atmosférica.

A Coluna Atmosférica é responsável pelo fracionamento do petróleo em pressões em torno da atmosférica. São obtidos produtos tais como Nafta, Querosene e Diesel. O Resíduo Atmosférico (produto de fundo) da Coluna Atmosférica é processado na Coluna de Destilação à Vácuo. Esta Coluna é operada em pressões em torno de 50-100 mmHg. Para que frações sejam obtidas a partir do resíduo atmosférico à pressão atmosférica, seria necessária uma coluna de destilação operando a altas temperaturas. Entretanto, se a coluna de destilação alcançar altas temperaturas, a formação de coque e o craqueamento ocorrerão. Por este motivo a Coluna de Vácuo é operada a pressões extremamente baixas. As frações mais comuns obtidas nesta Coluna são: Gasóleo leve e pesado e Resíduo de Vácuo.

Tendo em vista os aspectos e a importância da unidade de destilação para a refinaria e o impacto do processamento do petróleo (principalmente do pesado) sobre todas as outras unidades, uma análise completa da unidade de destilação se faz necessária. Além disso, este estudo possibilita o entendimento para o desenvolvimento de novas tecnologias de processo e de uma maior flexibilidade necessária à destilação do petróleo. Neste caso, o entendimento resultante desta análise permite que a influência das variáveis operacionais do processo seja observada e verificada. Conseqüentemente, isto possibilitará o desenvolvimento e melhorias no processo e maior flexibilidade para atender às necessidades da unidade de destilação.

1.2) OBJETIVO DESTA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

O presente trabalho tem como objetivo o estudo de um processo de destilação do petróleo, enfocando os seguintes pontos:

- 1) Análise das principais variáveis do processo através do Simulador Comercial HYSYS.
- 2) Otimização do número de estágios das Colunas Atmosférica e Debutanizadora.
- 3) Avaliação do processamento dos óleos leve, intermediário e pesado.

Inicialmente, o processo de destilação do petróleo estudado é constituído de uma Torre Pré-Flash, uma Coluna Atmosférica e uma Coluna Debutanizadora para a abordagem dos dois primeiros pontos. Para a avaliação do processamento dos três diferentes tipos de óleo, o processo estudado é constituído de uma Coluna Pré-Fracionadora e uma Coluna Atmosférica.

1.3) ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho apresenta sete capítulos. Em cada capítulo, foram abordados, respectivamente, os seguintes pontos: a influência e a análise das principais variáveis do processo, a otimização das Colunas Atmosférica e Debutanizadora, a avaliação do processamento do óleo leve, intermediário e pesado, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

No Capítulo 2, foi apresentada uma introdução às informações básicas e aos principais conceitos teóricos aplicados à destilação do petróleo para este trabalho.

Inicialmente, no Capítulo 3, foi realizada a descrição detalhada do processo de destilação do petróleo estudado. Em seguida, foram apresentados o estudo e a análise das principais variáveis do processo através das diversas simulações realizadas em estado estacionário. A análise das principais variáveis permitiu que os principais efeitos no processo fossem verificados e analisados.

No Capítulo 4, foi apresentada a otimização do número de estágios e da posição de alimentação da Coluna Debutanizadora para a minimização da carga térmica do referedor. Além disso, foi realizada a otimização do número de estágios da Coluna Atmosférica para a minimização da vazão de Resíduo.

No Capítulo 5, foram realizados o estudo e a avaliação do processamento do óleo leve, intermediário e pesado em um processo de destilação, envolvendo uma Coluna Pré-Fracionadora e uma Coluna Atmosférica.

No Capítulo 6, foram apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

As Referências Bibliográficas estão presentes no final do trabalho.

CAPÍTULO 2 - CONCEITOS BÁSICOS APLICADOS À DESTILAÇÃO DO PETRÓLEO

2.1) PETRÓLEO

Segundo Speight (1999, cap. 6), petróleo é uma mistura extremamente complexa de hidrocarbonetos com pequenas quantidades de compostos orgânicos de nitrogênio, enxofre e oxigênio. Além disso, é possível a existência de pequenas concentrações de sais inorgânicos e de compostos orgânicos contendo elementos metálicos como vanádio, níquel, cobre e ferro. Sua coloração característica varia do castanho escuro para o preto e seu odor é característico.

A composição do petróleo depende de vários fatores como localização, profundidade e tempo de formação de poços de onde é extraído. Diferentes composições de petróleo podem ser encontradas mesmo que a extração seja em poços próximos entre si.

Apesar da origem do petróleo ter sido freqüentemente e exaustivamente discutida e estudada, atualmente, tem-se como certa que sua origem é orgânica. Sua formação ocorreu devido à decomposição de diversos organismos vivos sob ação de bactérias, que se misturaram com areia e terra, formando diversas camadas ao longo de milhares de anos. Gradualmente, a matéria orgânica decomposta transformou-se em petróleo sob ação dos movimentos da crosta terrestre. Então, o petróleo formado deslocou-se de seus leitos originais através de rochas mais porosas e permeáveis (calcário e arenito) até locais de onde finalmente pode se concentrar e acumular, formando reservatórios. Na parte superior destes reservatórios, é encontrado normalmente gás natural, enquanto que na inferior, petróleo. Além disso, pode ser encontrada água em alguns reservatórios na parte inferior. Os terrenos onde se encontram os reservatórios são denominados de bacias sedimentares.

A caracterização e o estudo da química do petróleo tornam-se complexos devido à existência de inúmeros hidrocarbonetos e compostos orgânicos e inorgânicos. O isolamento de um componente puro é extremamente difícil devido à existência de outros componentes cujas propriedades praticamente são semelhantes, principalmente o ponto de ebulição, tornando-se a separação por destilação inviável. Além da complexidade desta caracterização e estudo do petróleo, o conhecimento em termos de estrutura e propriedades

torna-se extremamente importante. O processamento do petróleo em qualquer refinaria não somente requer o conhecimento do processo em si, mas, agregado a este, o conhecimento de estruturas químicas, propriedades físicas e químicas de seus componentes em certas condições de operação.

Espera-se que as operações físicas de processamento do petróleo sejam governadas pelas propriedades físicas e químicas dos hidrocarbonetos, já que estes constituem grande parte do petróleo. Entretanto, sais e outros compostos orgânicos de enxofre, nitrogênio e oxigênio, além de compostos orgânicos metálicos podem influenciar no processamento do petróleo. Mesmo presente no petróleo em pequenas quantidades, seu efeito no processo é significativo. Sais nos equipamentos do processo podem provocar grandes problemas de corrosão. Compostos contendo enxofre causam mau cheiro e são corrosivos. Além disso, compostos orgânico-metálicos (nitrogenados) são responsáveis pelo envenenamento de catalisadores utilizados no processo de refino.

2.2) COMPOSIÇÃO DO PETRÓLEO

A Tabela 2.1 apresenta a faixa em porcentagem em massa dos elementos químicos presentes nos petróleos de diversos países (Índia, França, Polônia, Romênia, Rússia, Canadá, México, Estados Unidos, Argentina, Colômbia e Venezuela). Os dados da Tabela 2.1 foram extraídos das informações de análise de petróleo no capítulo 6 de Speight (1999).

Tabela 2.1: Porcentagem em massa dos elementos químicos presentes no petróleo.

| Elementos | % em massa |
|-----------------|------------|
| C | 83-87 |
| H | 10-14 |
| N | 0,1-2 |
| O | 0,05-1,5 |
| S | 0,05-6 |
| Metais (Ni e V) | <1000 ppm |

Pode-se observar que, basicamente, o petróleo é uma mistura composta por:

- 1) Hidrocarbonetos
- 2) Compostos orgânicos contendo nitrogênio, oxigênio e enxofre
- 3) Compostos orgânicos metálicos

De acordo com a composição geral descrita acima, esta não é a mais adequada para relacionar e estudar o comportamento do petróleo e suas frações. Propriedades como densidade API, relação carbono-hidrogênio e concentração de enxofre não são capazes de descrever todo o comportamento do petróleo e frações durante o processo de refino. Conforme o item 2.1, a caracterização do petróleo e frações é complexa e desta forma, o estudo somente de algumas propriedades não pode ser capaz de prever seus comportamentos.

Petróleos parafínicos mais leves podem conter 97% em massa de hidrocarbonetos, enquanto que petróleos mais pesados têm em sua composição 50% em massa. Apesar dos hidrocarbonetos constituírem grande parte do petróleo, nota-se uma grande importância de outros compostos em menores quantidades, principalmente aqueles que contêm enxofre e nitrogênio. Além de influenciarem nas unidades de refino, causando problemas de corrosão e envenenamento de catalisadores, estes compostos podem alterar as características dos produtos obtidos. Assim, é necessário submeter frações e correntes produzidas por destilação ou qualquer outro processo a processos de tratamento. Um exemplo de processo de tratamento seria o de remoção de ácido sulfídrico e compostos orgânicos de enxofre (*sweeting process*) originados pelo enxofre presente no petróleo.

Estes componentes tendem a se concentrar nas frações mais pesadas. Desta forma, com o crescente processamento da quantidade de petróleo pesado, uma maior atenção é voltada a estes componentes e em sua influência nas características das frações obtidas.

É importante observar que o refino de petróleo não é apenas uma questão de conhecimento da composição dos elementos que constituem o petróleo e suas frações, mas também do conhecimento das propriedades relacionadas à composição química e física do material.

2.2.1) HIDROCARBONETOS

Basicamente, os hidrocarbonetos presentes no petróleo podem ser divididos em:

- Parafinas (Alcanos) - Hidrocarbonetos de cadeia aberta e saturada, com ou sem ramificações. Não há presença do anel benzênico.
- Naftenos - Hidrocarbonetos de cadeia fechada e saturada, que podem ter ramificações.
- Aromáticos - Hidrocarbonetos que possuem o anel benzênico e que podem ter ramificações de parafinas e naftenos.

Além dos tipos de hidrocarbonetos apresentados acima, o petróleo pode conter olefinas (hidrocarbonetos insaturados). Entretanto, sua presença é extremamente rara e incomum.

2.2.1.1) PARAFINAS

São hidrocarbonetos de cadeia aberta e saturada. Possuem fórmula molecular geral do tipo C_nH_{2n+2} (alcanos). Além disso, são estáveis. Podem existir ramificações e com isso, a existência de isômeros. Quanto maior a cadeia, maior é a quantidade de isômeros para um determinado composto de mesma fórmula molecular.

O comportamento de distribuição de parafinas (alcanos), presentes no petróleo e suas frações é, geralmente, a diminuição de sua composição com a elevação do peso molecular e ponto de ebulição. Por exemplo, 80% de parafinas são encontradas em gasolina, enquanto que 30% podem ser encontradas em óleos lubrificantes (porcentagem considerada alta) que normalmente não possuem parafinas. Além disso, em certas frações mais pesadas como gasóleo de vácuo, não há presença de parafinas. Iso-parafinas e n-parafinas estão presentes em praticamente todas as frações do petróleo. Além disso, parafinas com poucas ramificações predominam sobre as mais ramificadas.

2.2.1.2) NAFTENOS

Naftenos monocíclicos e policíclicos estão presentes em diversas frações de petróleo. Cicloparafinas com mais de 5 átomos de carbono compõe praticamente todas as frações. Uma concentração de até 60% de cicloparafinas do total de hidrocarbonetos pode ser encontrada no petróleo. Os naftenos possuem fórmula molecular C_nH_{2n} .

Naftenos mono e bi-cíclicos concentram-se mais nas frações com menor ponto de ebulição, enquanto que naftenos policíclicos tendem a estar presentes em maiores quantidades nas frações mais pesadas de ponto de ebulição maior.

2.2.1.3) AROMÁTICOS

Nas frações de gasolina, todos os aromáticos estão presentes. Entretanto, a quantidade de benzeno parece ser menor do que outros compostos semelhantes, tais como tolueno e xilenos. Além disso, geralmente, a quantidade de aromáticos aumenta, conforme há o aumento do peso molecular da fração ou óleo.

Estruturas aromáticas policíclicas são, normalmente, encontradas nas frações de alto ponto de ebulição. Além disso, a maior parte dos hidrocarbonetos que compõem frações de alto ponto de ebulição é formada por hidrocarbonetos nafteno - aromáticos e as séries de naftenos. Não se obteve muito sucesso em se estudar a natureza dos aromáticos policíclicos em frações pesadas. Entretanto, pode-se assumir que o número de anéis condensados nessas estruturas policíclicas aumenta conforme o aumento do ponto de ebulição das frações.

2.2.1.4) HIDROCARBONETOS INSATURADOS

A presença de hidrocarbonetos insaturados é extremamente rara em petróleos. Entretanto, métodos de análise determinaram a presença de no máximo 3% em massa de

olefina em óleos crus da Pensilvânia. Neste caso, este tipo de petróleo pode ser considerado uma exceção e um caso especial.

2.2.2) COMPOSTOS ORGÂNICOS E INORGÂNICOS

Petróleo é, essencialmente, composto por diversos tipos de hidrocarbonetos, tornando-o uma mistura extremamente complexa. No entanto, há a presença de outros compostos orgânicos e inorgânicos (sais em suspensão). Enxofre, nitrogênio e oxigênio são os elementos principais que constituem estes compostos orgânicos. Além disso, metais como ferro, níquel e vanádio podem estar presentes, formando compostos organo-metálicos.

A presença destes compostos pode ser observada em todas as frações do petróleo, apesar de sua tendência em se concentrar em frações mais pesadas. Mesmo em pequenas concentrações no petróleo, sua influência e impacto no processo de refino são significativos e relevantes. Os principais exemplos desta influência são:

- Corrosão em equipamentos devido a componentes orgânicos com característica ácida (mercaptanos), ácidos orgânicos e sais inorgânicos.
- Paradas no processo em função do depósito de sais.
- Envenenamento de catalisadores pela presença de componentes organo-metálicos ou quimiosorção de compostos orgânicos de nitrogênio.

2.2.2.1) COMPOSTOS DE ENXOFRE

Estes compostos são de extrema importância devido a seus efeitos no processo de refino. Há diversos tipos de compostos orgânicos de enxofre. Dependendo da formação do petróleo, certos tipos de compostos de enxofre podem ocorrer ou não.

Em geral, uma alta densidade de petróleo indica uma alta concentração de enxofre. Além disso, uma concentração de 0,04%-5% em peso de enxofre pode ser verificada no petróleo. A presença destes compostos em produtos pode ter efeitos prejudiciais. Na

gasolina, estes compostos podem promover corrosão em carros, principalmente no inverno, quando há acúmulo de água contendo dióxido de enxofre formado na combustão, além da formação dos efeitos poluentes no ambiente como a chuva ácida. Apesar da tendência de compostos de enxofre estar em maior quantidade nas frações mais pesadas, as frações intermediárias podem conter mais enxofre devido à decomposição de compostos de enxofre durante a destilação.

Devido aos efeitos prejudiciais do enxofre nos produtos obtidos, é necessária sua remoção ou conversão. Segundo Speight (1999), a distribuição de vários tipos de compostos de enxofre varia de acordo com a origem e que alguns compostos reagem a baixas temperaturas. A formação de H_2S ocorre aproximadamente a $150^{\circ}C$ e rapidamente, a $220^{\circ}C$. Entretanto, o H_2S é um componente comum em diversos tipos de petróleo e alguns destes petróleos com mais de 1% de enxofre possuem, freqüentemente, gases com propriedades de H_2S .

2.2.2.2) COMPOSTOS DE OXIGÊNIO

Há vários tipos de compostos de oxigênio que estão presentes, freqüentemente, no petróleo. A concentração de oxigênio no petróleo é geralmente menor que 2% em peso, entretanto, concentrações maiores foram verificadas, indicando provavelmente exposições longas de oxigênio no petróleo durante e após sua formação. Conforme aumento do ponto de ebulição das frações, há o aumento de oxigênio presente. De fato, resíduos podem conter até 8% em peso de oxigênio. Cetona, éster, éter, álcool e ácido carboxílico são os principais tipos de compostos que constituem o petróleo.

2.2.2.3) COMPOSTOS DE NITROGÊNIO

A composição de nitrogênio no petróleo está geralmente na faixa de 0,1-0,9% em massa, entretanto, esta pode alcançar em alguns tipos de petróleo, segundo recentes estudos, mais que 2% em massa. Compostos orgânicos de nitrogênio podem ser classificados em básicos e não-básicos. São exemplos de compostos básicos: piridina,

quinolina, indolina. Enquanto que, de não-básicos são: pirole e índole. Estes compostos têm a tendência de ocorrer em frações de alto ponto de ebulição e resíduo.

A presença destes compostos é de grande importância em operações na refinaria, já que estes são responsáveis pelo envenenamento de catalisadores e também, contribuem para formação de “gomos” em produtos tais como óleo combustível.

2.2.2.4) CONSTITUINTES METÁLICOS

Os constituintes metálicos podem afetar diversos processos e causar problemas, pois são responsáveis pelo envenenamento de catalisadores usados para a remoção de enxofre e nitrogênio, assim como outros processos (craqueamento catalítico). Por isso, há uma importância relevante na presença destes componentes no petróleo. Pequenas quantidades de cobre, ferro, níquel e vanádio presentes na alimentação processada para o craqueamento catalítico afetam a atividade do catalisador e resultam no aumento de formação de gás e coque e reduz o rendimento de gasolina. Além disso, a presença destes componentes metálicos, particularmente o vanádio, no combustível de geradores de energia de alta temperatura pode levar a depósitos nos rotores de turbinas, prejudicando seu funcionamento. Graves danos por corrosão podem também ocorrer.

Existe, também, no petróleo, a presença de componentes como zinco, titânio, cálcio e magnésio. Embora alguns componentes metálicos possam aparecer nas frações de alto ponto de ebulição, a destilação faz com que estes se concentrem no resíduo. Entretanto, há evidências de que uma porção dos componentes metálicos possa ocorrer nos destilados por volatilização dos compostos orgânicos metálicos presentes no petróleo.

2.3) PROPRIEDADES DO PETRÓLEO E FRAÇÕES (PRODUTOS)

As propriedades e caracterização do petróleo apresentam grande variação devido à própria natureza e composição do mesmo. Existem diversos tipos de petróleo que podem ser processados, dentre os quais aqueles que são formados por diferentes tipos, obtendo-se uma mistura ("*blend*"). Desta forma, grandes esforços têm sido realizados pelas

organizações de padronização no sentido de correlacionar e padronizar métodos para o estudo e a avaliação do petróleo e seus produtos (derivados). Muitas propriedades do petróleo e seus derivados e caracterizações são realizadas por métodos padronizados por organizações tais como ASTM (Association Society for Testing and Materials) e IP (Institute of Petroleum). Grande parte das refinarias desenvolve seus próprios métodos de análise e estudo para satisfazer necessidades levando em consideração o tipo de petróleo a ser processado.

As diferentes concentrações de hidrocarbonetos e outros compostos encontrados em diversos tipos de petróleo permitem que sejam obtidos produtos distintos. Estes produtos se diferem por rendimento, características e propriedades. Desta forma, o processamento de certos tipos de petróleos torna-se vantajoso em relação a outros devido às diferentes composições de diferentes hidrocarbonetos e outros compostos. Isso significa que um certo tipo de petróleo (óleo cru) pode requerer menos necessidades e custos no seu processamento para a obtenção de certos produtos devido a sua composição e propriedades, enquanto em outro ocorre o contrário. Além disso, outros tipos de petróleo podem conter uma concentração baixa de componentes para a obtenção dos produtos desejados, inviabilizando sua produção. Em consideração aos diferentes tipos de petróleo existentes e as implicações em seu processamento, o estudo de suas propriedades torna-se extremamente importante.

A seguir, são apresentadas as principais propriedades do petróleo e/ou frações (produtos). Neste caso, as frações são os produtos (derivados) obtidos a partir do processamento do petróleo.

2.3.1) ANÁLISE DE COMPOSIÇÃO QUÍMICA (ELEMENTO)

Concentrações dos elementos químicos presentes no petróleo podem ser obtidas, permitindo uma predição de suas características e natureza. Desta forma, as relações entre os elementos tais como carbono, hidrogênio, oxigênio e enxofre podem ser determinadas, além de se detectar traços de elementos tais como níquel e vanádio, já que estes componentes podem causar sérios efeitos no desempenho de catalisadores durante o refino em processos catalíticos, por exemplo.

Há uma grande variação nas propriedades físicas do petróleo mais leve ao mais pesado. A maioria das espécies aromáticas e com heteroátomos ocorre nas frações de maior ponto de ebulição. Os óleos crus mais pesados são relativamente mais ricos em frações de maior ponto de ebulição.

2.3.2) DENSIDADE

Geralmente, a densidade e a densidade específica são as duas propriedades utilizadas para uma avaliação preliminar das características do petróleo (óleo cru). A densidade específica do petróleo em graus API é geralmente a mais utilizada. O cálculo de densidade em graus API pode ser determinado com a seguinte equação (2.1):

$$^{\circ}API = \frac{141,5}{SG(60^{\circ}F)} - 131,5 \quad (2.1)$$

SG é a densidade específica do petróleo em relação à água a 60°F.

A densidade específica do petróleo, geralmente, varia de aproximadamente 0,8 (45,3°API) para óleos leves a 1,0 (10°API) para óleos pesados. A composição química do petróleo tem influência sobre a densidade específica, para a qual há dificuldades em se estabelecer correlações. Entretanto, geralmente, o aumento nas quantidades de compostos aromáticos resulta em aumento na densidade, enquanto que um aumento de compostos saturados resulta na diminuição da densidade.

2.3.3) VISCOSIDADE

É uma importante propriedade para a caracterização do petróleo e frações em relação ao transporte e deslocamento em dutos. Vários estudos têm sido realizados para o efeito da temperatura na viscosidade, já que a viscosidade do petróleo ou frações decresce

com a temperatura. A taxa de variação aparece ser dependente principalmente da natureza ou composição do petróleo. Fatores, tais como volatilidade, podem ter um pequeno efeito.

A viscosidade universal de Saybolt é o tempo requerido em segundos para escoar 60 ml de petróleo de um recipiente por um orifício calibrado a uma temperatura constante. A viscosidade cinemática pode ser relacionada à viscosidade de Saybolt pela equação (2.2) a seguir:

$$\text{Viscosidade cinemática} = a.S + b/(S) \quad (2.2)$$

a e b são constantes. S é a viscosidade de Saybolt em segundos.

A Tabela 2.2 a seguir apresenta dados de viscosidade de Saybolt a 100° F (38°C) e 210° F (99°C) para determinados valores de viscosidade cinemática (Speight, 1999, página 318).

Tabela 2.2: Dados de viscosidade de Saybolt a 100°F (38°C) e 210°F (99°C) para diversos valores de viscosidade cinemática.

| Viscosidade Cinemática (cSt) | Saybolt | |
|------------------------------|--------------|--------------|
| | 100°F (38°C) | 210°F (99°C) |
| 2 | 32,6 | 32,9 |
| 10 | 58,9 | 59,3 |
| 20 | 97,8 | 98,5 |
| 30 | 140,3 | 142,3 |
| 40 | 186,3 | 187,6 |
| 50 | 232,1 | 233,8 |
| 60 | 278,3 | 280,2 |
| 70 | 324,4 | 326,7 |

2.3.4) TENSÃO SUPERFICIAL

Tensão superficial é a medida da força atuando na fronteira entre duas fases (sólido-líquido ou gasoso-líquido). Se as duas fases forem formadas por dois líquidos imiscíveis, a tensão é considerada interfacial. A importância desta propriedade está ligada diretamente ao comportamento do petróleo em reservatórios. Trabalhos recentes têm se

aprofundado na predição de tensão superficial usando relações matemáticas de acordo com Speight (1999).

2.3.5) VOLATILIDADE

A volatilidade pode ser definida como a tendência à vaporização. Esta propriedade é uma importante base para a caracterização não somente do petróleo (óleo cru), mas para os produtos (combustíveis), tais como nafta, querosene, entre outros. Através de métodos padronizados (ASTM), informações sobre as caracterizações dos produtos (frações) ou do petróleo a partir de propriedades, tais como Ponto de Fulgor e Ponto de Combustão e Pressão de Vapor são obtidas.

Algumas propriedades estão relacionadas a seguir:

- 1) Ponto de fulgor (*Flash Point*) – É a temperatura na qual a fração ou petróleo deve ser aquecido sob condições específicas para emitir vapor suficiente para formar uma mistura com ar que pode momentaneamente entrar em combustão por uma chama específica (ASTM D56, ASTM D92, ASTM D93).
- 2) Ponto de combustão (*Fire Point*) – É a temperatura na qual o produto deve ser aquecido sob condições de procedimento do método para queimar continuamente quando a mistura de vapor e ar entra em combustão por uma chama específica (ASTM D92).
- 3) Pressão de Vapor Reid – É a pressão exercida no líquido (frações como nafta ou gasolina) para que este não sofra vaporização a uma temperatura de 100°F (37,8°C).
- 4) Ponto de Névoa (*Cloud Point*) – É a temperatura na qual a graxa (cera) de parafina ou outro composto solidificável presente no óleo aparece em forma de nevoeiro quando este é esfriado sob condições definidas (ASTM D2500 e ASTM D3117).
- 5) Ponto de Entupimento (*Pour Point*) – É a menor temperatura na qual o óleo (petróleo) flui (escoa) sob determinadas condições definidas quando este é resfriado sem perturbação na taxa padrão (ASTM D97).

2.4) ENSAIOS DE DESTILAÇÃO: CARACTERIZAÇÃO DO PETRÓLEO E FRAÇÕES

O ensaio de destilação consiste na vaporização da amostra (óleo cru ou frações) em reservatórios apropriados à pressão atmosférica ou pressão subatmosférica, seguindo procedimentos estabelecidos em normas por laboratórios. Assim, a caracterização do petróleo (óleo cru) ou mesmo de frações é realizada por estes ensaios de destilação, já que uma análise completa de composição de componentes é impraticável e inviável. Isto ocorre porque o petróleo é uma mistura complexa, composta por um número muito grande de hidrocarbonetos e outros componentes.

O objetivo principal destes ensaios de destilação é a caracterização do óleo ou frações em termos de volatilidade. Os ensaios de destilação são realizados de acordo com métodos padronizados por organizações tais como ASTM (Association Society for Testing and Materials) e IP (Institute of Petroleum).

2.4.1) CURVAS ASTM E PEV (PONTO DE EBULIÇÃO VERDADEIRO)

A curva PEV (TBP – *True Boiling Point*) de destilação é, geralmente, representada em um gráfico de temperatura em função da porcentagem vaporizada de uma amostra de petróleo (óleo cru). Para a determinação desta curva, a destilação da amostra em laboratório é realizada em colunas de 15 ou mais estágios teóricos com uma alta taxa de refluxo (Li *et al.*, 2005). Este tipo de ensaio permite a obtenção de distribuição de componentes todos os componentes. Entretanto, grandes volumes de amostra e tempo são necessários. Neste caso, este tipo de ensaio é mais aplicável às amostras de óleo cru (petróleo), entretanto, pode ser aplicado às amostras de frações.

As curvas de destilação (temperatura em função da porcentagem vaporizada) ASTM são aplicadas para amostras de produtos do petróleo, por exemplo, frações originárias da destilação do petróleo. Os procedimentos desenvolvidos pela Association Society for Testing and Materials (ASTM) são usados para uma rápida análise em laboratório. O teste ASTM D86 que é o método padronizado e estabelecido pela ASTM

consiste em um ensaio de destilação em batelada rápida sem estágios e refluxo. Além disso, o teste ASTM D86 é principalmente aplicado para produtos e frações de petróleo.

2.4.2) CURVAS EFV (*EQUILIBRIUM FLASH VAPORIZATION*)

O material alimentado é aquecido conforme circula na serpentina de aquecimento do ensaio. Com isto, parte do material é vaporizada, formando-se uma mistura de líquido e vapor. A mistura (líquido e vapor) circula no tubo até que a separação entre as fases é realizada em um separador ou vaporizador. Realizando o ensaio para várias temperaturas de saída, a curva de porcentagem vaporizada em função da temperatura pode ser obtida. Cada corrida para uma determinada temperatura corresponde a um ponto da curva.

2.4.3) DEFINIÇÕES PARA A CURVA DE DESTILAÇÃO

O propósito destas curvas de destilação é caracterizar a composição do material em estudo e, por esta razão, a faixa de ebulição de cada fração (derivado) ou o petróleo (óleo cru) é de extrema importância.

Alguns conceitos serão apresentados a seguir para serem aplicados nos ensaios de destilação e nas curvas de destilação (temperatura versus porcentagem vaporizada) que caracterizam a fração (produto) e/ou óleo cru (petróleo).

- a) Ponto Inicial de Ebulição (PIE) ou IBP (Initial Boiling Point): é a temperatura na qual a fração ou o óleo cru começa a se vaporizar (entrar em ebulição). Por exemplo, quando se diz que o ponto inicial de ebulição de uma fração é de 185°C, significa que esta fração inicia sua vaporização a uma temperatura de 185°C em uma curva de ensaio de destilação (seja ASTM D86 ou PEV, por exemplo).
- b) Ponto Final de Ebulição (PFE) ou EP (End Point): é a temperatura na qual a fração ou o petróleo (óleo cru) é completamente vaporizado (100%).
- c) Ponto Seco (*Dry Point*): é a temperatura em que o recipiente da fração durante o ensaio começa a secar. Geralmente, a fração analisada é um solvente ou hidrocarbonetos relativamente puros.

- d) Recuperado (*recovery*): é o volume total recuperado no recipiente graduado. Enquanto que resíduo é o material líquido, em grande parte vapores re-condensados, deixados no recipiente (frasco) depois que este foi resfriado no fim da destilação.
- e) Recuperado total: é a soma do líquido recuperado e do resíduo.
- f) Temperaturas de destilação: é a temperatura na qual um determinado volume do produto no ensaio é vaporizado. O termo temperatura ASTM utilizado neste projeto se refere à temperatura na qual um determinado volume é vaporizado segundo a norma ASTM na destilação da fração em ensaio. Desta forma, por exemplo, se é dito que a temperatura ASTM D86 de querosene (fração do petróleo) para um volume de 95% é de 265°C, isto significa que a temperatura na qual um volume de 95% de querosene é vaporizado de acordo com o teste ASTM D86 (ensaio de destilação) é de 265°C.

Nas Figuras 2.1 e 2.2, são apresentadas as curvas de ensaio de destilação ASTM D86 e PEV para a fração de querosene, respectivamente. Os pontos A (na Figura 2.1) e D (na Figura 2.2) são os pontos iniciais de ebulição (PIE) da curva de ensaio de destilação ASTM D86 e PEV, respectivamente. A temperatura representada pelos pontos A (185°C) e D (150°C) é aquela em que a fração inicia sua vaporização (0% vaporizada), ou seja, é o ponto inicial de ebulição nas curvas de destilação ASTM D86 e PEV, respectivamente. Pode-se observar que as temperaturas representadas por estes pontos (A e D), apesar de serem o PIE da mesma fração são diferentes porque foram obtidas por diferentes ensaios de destilação, neste caso, ASTM D86 e PEV, respectivamente.

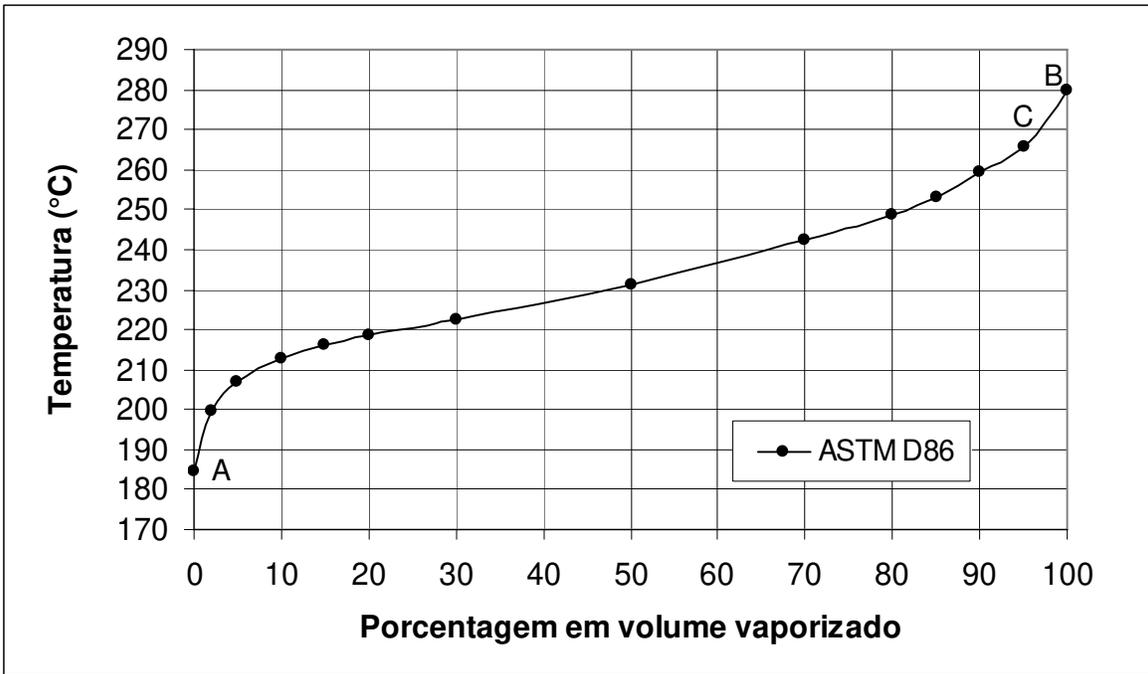


Figura 2.1: Curva de destilação ASTM D86 para querosene: Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado.

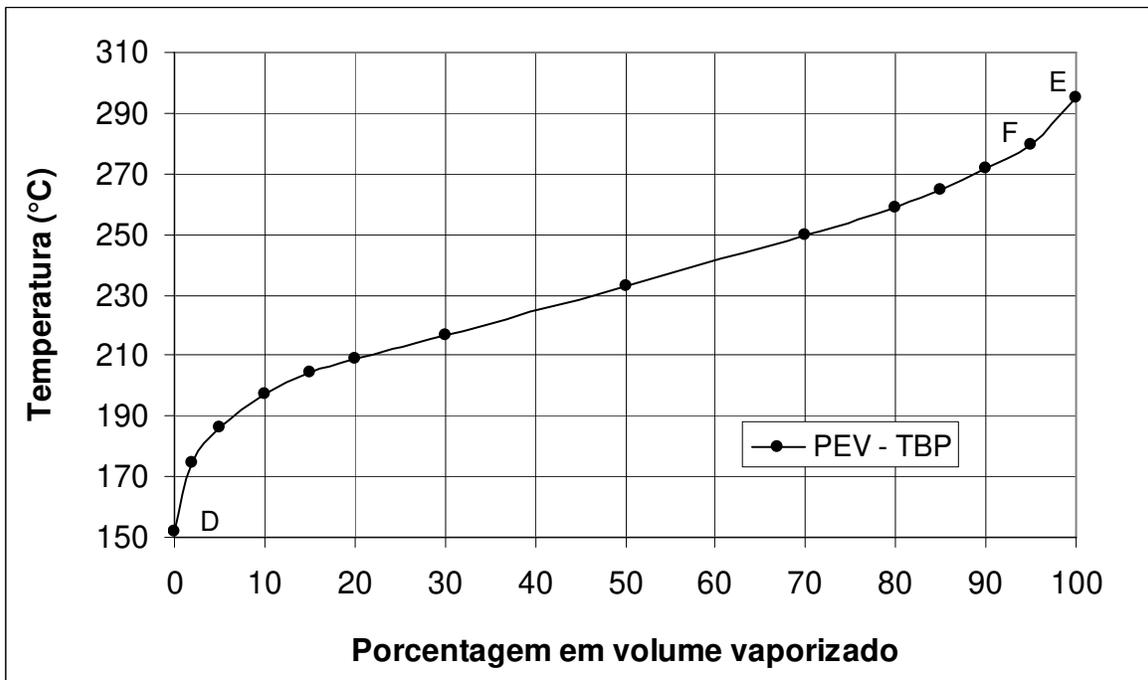


Figura 2.2: Curva de destilação PEV (TBP) para querosene: Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado.

Os pontos B e E nas Figuras 2.1 e 2.2, respectivamente, são os pontos finais de ebulição (PFE), pois representam a temperatura na qual toda a fração de querosene foi vaporizada (100% vaporizada) nas respectivas curvas de destilação. Neste caso, a temperatura do ponto B (280°C) é diferente do ponto E (292°C) porque foram obtidas por diferentes ensaios de destilação (ASTM D86 e PEV, respectivamente), apesar de representarem o PFE da mesma fração. Já, os pontos C (265°C) e F (280°C) representam a temperatura em 95% em volume do querosene é vaporizado nas curvas de destilação ASTM D86 e PEV, respectivamente. A diferença de temperatura de ensaio de destilação nestes dois pontos ocorre devido ao mesmo motivo para o PIE e PFE, ou seja, os pontos são temperaturas obtidas por ensaios de destilação diferentes.

2.4.4) PONTO DE CORTE

A caracterização do petróleo (óleo cru) pode ser representada pela curva PEV (TBP), conforme Figura 2.3 a seguir.

A temperatura em qualquer ponto na curva PEV representa o ponto de ebulição (verdadeiro) do material hidrocarboneto cuja respectiva e determinada porcentagem em volume foi vaporizada. Assim, cada material obtido pela destilação corresponde a um volume e uma temperatura que são determinados pela curva. A temperatura no ponto A é o ponto de ebulição no qual E% em volume (20%) foi vaporizado e corresponde ao volume de nafta leve (fração) que pode ser obtido de todo o petróleo. Da mesma forma, generalizando, F%, G% e H% em volume vaporizado correspondem às frações nafta pesada, querosene e diesel que podem ser obtidas de todo o petróleo a uma temperatura B, C e D, respectivamente. Neste caso, na Figura 2.3, F%, G% e H% em volume representam a 8%, 15% e 20%, aproximadamente. Segundo Li *et al.*, E%, F%, G% e H% em volume correspondem à razão do volume de transferência de uma fração obtida na destilação do petróleo. Neste caso, os segmentos representados por E%, F%, G% e H% na Figura 2.3 correspondem à respectiva porcentagem em volume das frações representadas associadas ao intervalo, isto significa que o volume de cada produto não é a porcentagem acumulada de outras frações mais leves.

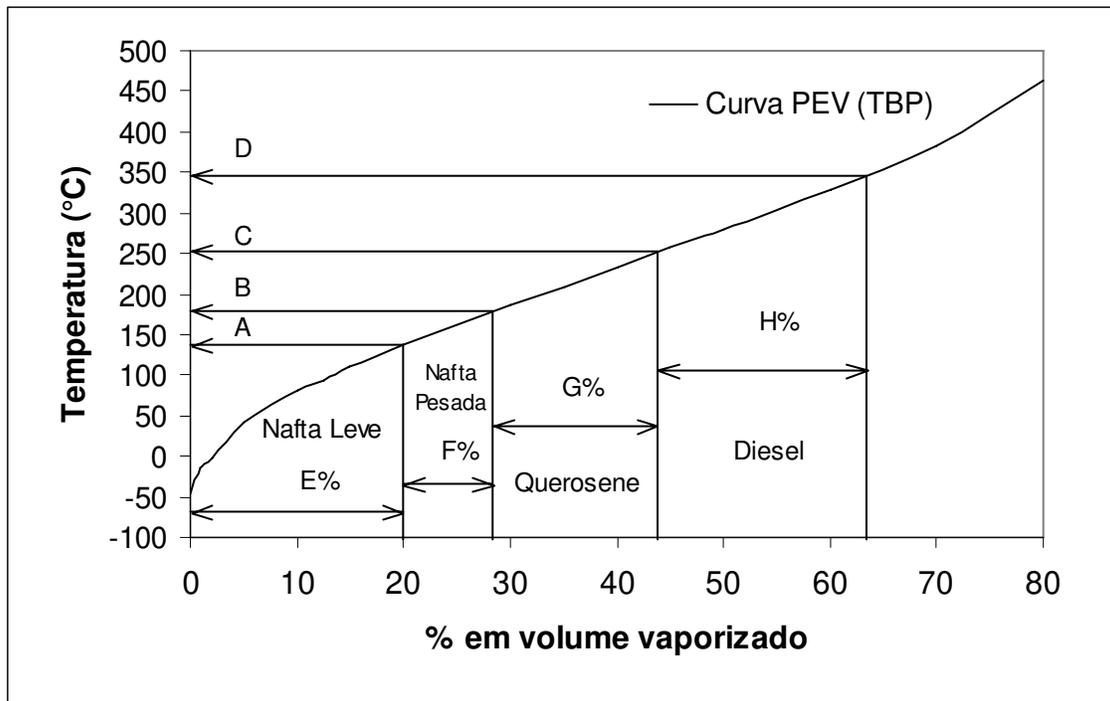


Figura 2.3: Curva de Destilação PEV – Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado.

As temperaturas representadas pelos pontos A, B, C e D são denominadas temperaturas de corte, ou seja, os pontos de corte (*cut points*) de nafta leve, nafta pesada, querosene e diesel, respectivamente. De acordo com a definição de Watkins (1979), a temperatura do ponto de corte entre duas frações (PEV – TBP) é dada pela equação (2.3):

$$\text{Ponto de corte (TBP)} = 0,5 (\text{PFE}_L (\text{TBP}) + \text{PIE}_P (\text{TBP})) \quad (2.3)$$

$\text{PFE}_L (\text{TBP})$ é a temperatura do ponto final de ebulição da fração mais leve caracterizada pela curva TBP (PEV), isto é, a temperatura, na qual 100% do volume da fração é vaporizado, na curva TBP. $\text{PIE}_P (\text{TBP})$ é a temperatura do ponto inicial de ebulição da fração mais pesada caracterizada pela curva TBP (PEV), isto é, a temperatura, na qual a fração começa a se vaporizar.

A Figura 2.4 apresenta o ponto de corte em uma curva de destilação TBP (PEV).

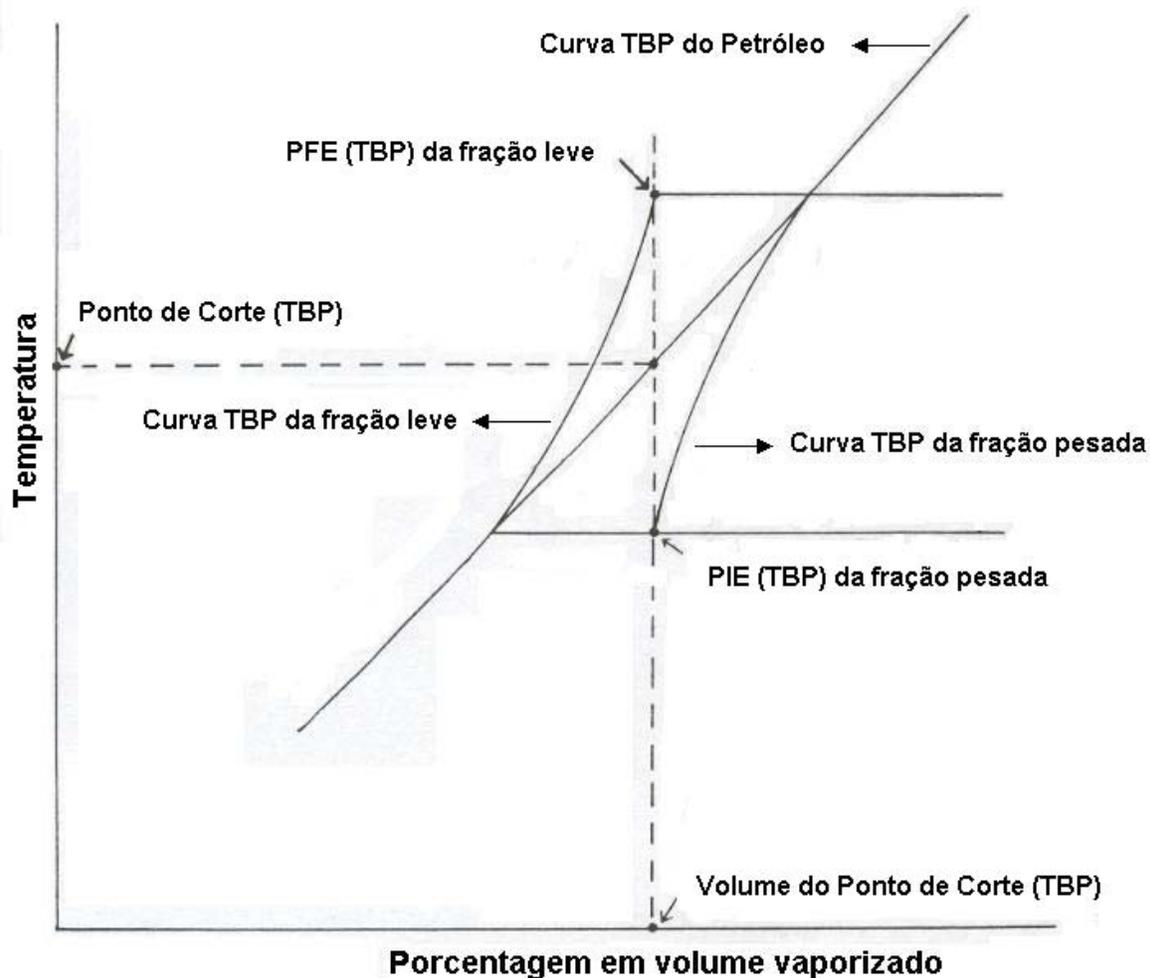


Figura 2.4: Determinação do Ponto de Corte em uma curva de destilação TBP (PEV).

Algumas terminologias e definições usadas por Watkins (1979) são apresentadas a seguir.

- a) *TBP cut volume* (Volume do Ponto de corte) - o ponto do rendimento volumétrico estabelecido entre duas frações para uma dada temperatura de corte (*cut point*).
- b) $Overlap = PFE_L - PIE_P$ (2.4)
- c) Gap 5-95 é a diferença entre a temperatura ASTM na qual 5% do volume da fração mais pesada é vaporizada e a temperatura ASTM na qual 95% do volume da fração mais leve é vaporizada. Esta variável mostra o grau de separação entre duas frações.

Neste caso, a porcentagem em volume de cada fração obtida de todo o petróleo é resultado da temperatura de corte calculada a partir da curva PEV (TBP). Desta forma, especificações de produtos que, normalmente, se apresentam em termos de faixas de ebulição ASTM não podem ser aplicadas diretamente para a determinação da porcentagem em volume a partir da temperatura de corte explicada anteriormente. Segundo Li *et al.* (2005), as faixas de ebulição ASTM (temperatura ASTM) devem ser convertidas para TBP. Estes autores apresentam as equações para converter o PFE e PIE em termos de TBP para ASTM (correlações desenvolvidas por Watkins (1979)).

2.5) FRAÇÕES DE PETRÓLEO - PRODUTOS

As principais frações obtidas e estudadas neste trabalho são: GLP (Gás Liquefeito do Petróleo), Nafta, Querosene, Diesel e Gasóleo.

Inicialmente, as frações de nafta, querosene, diesel e gasóleo consideradas neste trabalho serão definidas de acordo com as faixas de temperatura de ebulição (ASTM D86) apresentadas em Watkins (1979) e na Tabela 2.3. Essas frações podem ser definidas como todos os produtos que obtidos por um processo de destilação do petróleo, por exemplo, tem ponto de ebulição segundo o ensaio de destilação ASTM D86 nas faixas de temperatura indicadas na Tabela 2.3. Entretanto, atualmente, muitas refinarias consideram diferentes faixas de temperatura de ebulição para definir seus diversos produtos de interesse de acordo com a exigência do mercado.

Tabela 2.3: Faixas de temperatura de ebulição considerada para as frações (Watkins, 1979).

| Frações | Faixa de temperatura de ebulição ASTM D86 |
|---------------------|---|
| Nafta | Até 400°F (204°C) |
| Querosene | 325°F – 550°F (163-288°C) |
| Diesel | 350°F – 675 °F (177° - 357°C) |
| Gasóleo Atmosférico | Maior que 675°F (357°C) |

GLP (GÁS LIQUEFEITO DO PETRÓLEO) - É a fração originária do petróleo composta por hidrocarbonetos com até cinco carbonos. Basicamente, metano, etano, propano, iso-butano, n-butano, iso-pentano e n-pentano compõem o GLP. A propriedade que caracteriza o GLP é o intemperismo.

O Intemperismo é uma propriedade que representa a quantidade de pentanos e de componentes com massa molecular superior a estes. De acordo com Neto (1999), o intemperismo pode ser definido como a temperatura resultante da evaporação atmosférica de 95% do volume do GLP. Isto significa que se o intemperismo do GLP for de -2°C , o GLP a uma temperatura de -2°C terá 95% do seu volume volatilizado (evaporado) e os 5% restante do volume estará na forma de líquido. O resíduo no botijão pode ser representado pelos 5% que não estão na forma de vapor. A especificação de intemperismo é de -2°C na região sul do Brasil e de 2°C , no restante do Brasil. Esta propriedade é controlada em refinarias, entretanto, a quantidade de componente chave pesado do GLP (iso-pentano) também pode ser controlada, já que estas duas propriedades estão relacionadas.

NAFTA - Sua característica principal é sua excelente solubilidade. Por isso, a nafta é utilizada como solvente. Basicamente, é dividida em dois tipos: alifático e aromático. Os solventes alifáticos são constituídos de parafinas e cicloparafinas (naftenos) e podem ser obtidos através da destilação do petróleo. Já os solventes aromáticos são formados de compostos derivados do benzeno. Geralmente, a nafta é tratada para remover hidrocarbonetos aromáticos e compostos de enxofre, responsáveis pelo odor. Após este tratamento inicial, a nafta é processada por destilação para a obtenção de frações com faixas de temperatura de ebulição adequadas para solventes alifáticos. Além de seu uso como solvente, a nafta é utilizada principalmente pela indústria petroquímica. Com o objetivo de melhorar a octanagem da nafta, esta pode se submeter ao processo de reforma.

Alguns exemplos da principal aplicação da nafta são:

1. Solvente de tintas (diluentes).
2. Solvente para processos de extração industrial.
3. Solventes na indústria de borracha.

4. Principal matéria-prima da indústria petroquímica, obtendo-se diversos produtos como: batons, remédios, computadores, plásticos.

Um produto relevante que pode ser obtido por destilação é a gasolina. Principal combustível utilizado atualmente, a gasolina pode ser definida como uma mistura de hidrocarbonetos que tem ponto de ebulição abaixo de 180°C e, muitas vezes, abaixo de 200°C. Além disso, é constituída de hidrocarbonetos que possuem de 4 a 12 carbonos e dividida em três tipos: parafinas, olefinas e aromáticos. A principal propriedade que caracteriza a qualidade da gasolina é a octanagem, ou seja, o número de octanos. O número de octanos é obtido por dois procedimentos de testes: o primeiro é denominado de número de octano motor (indicado para desempenho de alta velocidade) (ASTM D-2700 e ASTM D-2723) e o segundo, de número de octano pesquisa (indicado para desempenho normal) (ASTM D-2699 e ASTM D-2722). Quando se diz, simplesmente, número de octanos, refere-se ao número de octanos pesquisa. Uma gasolina de boa qualidade tem como característica principal a resistência antidetonação. Quanto maior sua resistência antidetonação, melhor é seu desempenho como combustível, liberando mais energia e permitindo um maior desempenho do motor. O número de octanos é medido em uma escala de zero a 100: quanto maior o número de octanos, maior é a resistência antidetonação. Nos testes para determinar o número de octanos, uma mistura de n-heptano e iso-octano é preparada. Se esta mistura coincide exatamente com a gasolina analisada em termos de propriedade antidetonação, pode-se dizer que a composição em porcentagem de iso-octano da mistura é o número de octano da gasolina analisada. Por exemplo, se esta mistura é composta de 90% de iso-octano e 10% de n-heptano e tem as mesmas propriedades antidetonação que a gasolina analisada, pode-se dizer seu número de octano da gasolina é de 90.

QUEROSENE - Combustível menos volátil que a gasolina. É um líquido incolor e inflamável. Pode ser utilizado como combustível, por exemplo, para aquecedores domésticos, para iluminação e para aviões. Além disso, é empregado como solvente de graxa e de inseticida. A composição do querosene depende do local de extração, mas, geralmente, consiste de 10 diferentes hidrocarbonetos, aproximadamente, cada um contendo de 10 a 16 átomos de carbono por molécula. Fazem parte de sua composição compostos orgânicos como, por exemplo, alquil-benzenos e naftalenos.

DIESEL – É utilizado como combustível de carros, caminhões, ônibus, barcos e motocicletas. No Brasil, seu consumo restringe-se principalmente ao setor de transporte rodoviário. Há dois tipos básicos de diesel no Brasil: metropolitano e interior. O teor de enxofre do diesel metropolitano é mais restrito e a emissão de material particulado é menor, com o objetivo de diminuir a poluição ambiental nas áreas mais necessitadas. Nas demais regiões, é utilizado o diesel de interior.

GASÓLEO - Fração mais pesada que o Diesel. Utilizado como combustível para geração de energia em fornos.

2.6) CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE DE PETRÓLEO NO SIMULADOR

Devido aos inúmeros componentes do petróleo, a caracterização da corrente de petróleo pelo simulador se dá através da geração de pseudocomponentes.

Nas simulações, o petróleo é composto por pseudocomponentes. Cada pseudocomponente pode ser considerado como um só componente do petróleo ou fração. Na verdade, o pseudocomponente representa uma mistura complexa de hidrocarbonetos que possuem uma temperatura de ebulição dentro de uma determinada faixa ou intervalo de temperatura. Por exemplo, um pseudocomponente pode ser considerado como uma mistura cujos componentes do petróleo possuem uma temperatura de ebulição de 100°C a 125°C. Neste caso, a faixa ou intervalo de temperatura é de 25°C e pode ser denominada como faixa de temperatura de corte. Cada pseudocomponente representa um componente discreto, com propriedades médias, em toda a mistura. Mas na verdade, o pseudocomponente é uma mistura de vários componentes.

Cada pseudocomponente é caracterizado como uma temperatura média de ponto de ebulição e uma densidade específica média. As propriedades, como temperatura crítica, pressão crítica e fator acêntrico, podem ser calculadas e determinadas por correlações, por exemplo, de Riazi e Daubert (1980) e Edmister e Lee (1984).

A caracterização do petróleo no Simulador Comercial HYSYS converte os dados de ensaio do petróleo, gerando uma série de componentes discretos, isto é, os

pseudocomponentes. Desta forma, o HYSYS determina uma série de propriedades físicas e críticas para os pseudocomponentes do petróleo.

Para os cálculos Equilíbrio Líquido-Vapor, a equação de estado de Peng-Robinson é recomendada pelo Simulador HYSYS como ideal para aplicações em petróleo, gás e petroquímicas. Desta forma, nas simulações realizadas, todos os cálculos de equilíbrio líquido-vapor para o processo estudado estão baseados na equação de Peng-Robinson.

Basicamente, para a geração da corrente de petróleo nas simulações no HYSYS, foram inseridos os seguintes dados de ensaio do petróleo: densidade do petróleo, curva PEV (temperatura versus porcentagem em volume vaporizado) e composição dos *light-ends* no petróleo. *Light-ends* são todos os componentes puros do petróleo com baixo ponto de ebulição, por exemplo, hidrocarbonetos de no máximo cinco carbonos (n-pentano). Estes componentes são caracterizados no petróleo, pois se tem interesse em que a corrente de GLP seja caracterizada com estes componentes por meio da composição. Desta forma, os componentes gerados para a corrente de petróleo seriam os próprios pseudocomponentes e os *light-ends*.

2.7) REFINARIA

O refino de petróleo consiste nas diversas etapas em que o petróleo é processado para a obtenção de produtos com a qualidade exigida pelo mercado. Devido à diferença na demanda dos produtos, a refinaria deve ser flexível para que certos produtos não se acumulem demais nos reservatórios. Por isso, a necessidade de unidades que possam converter o excesso de um produto em outro produto como a unidade de craqueamento catalítico e a unidade de destilação a vácuo. Além dessa necessidade, é interessante para as refinarias que outros produtos mais pesados como óleo combustível (produto de fundo de barril) que têm pouco valor agregado transformem-se em outros de maior valor como nafta e diesel.

A evolução das refinarias de petróleo mostra como um simples processo de destilação tornou-se um complexo e integrado conjunto de unidades distintas para atender as necessidades do mercado consumidor. As primeiras refinarias eram predominantemente unidades de destilação. Tinham como objetivo principal a produção de querosene. No

século XIX, querosene era o principal combustível para iluminação. Nafta e piche eram também produzidos. Entretanto, com o surgimento da iluminação elétrica e a invenção dos motores de combustão interna, essa situação mudou. Desta forma, gasolina e diesel passaram a ser os combustíveis de maior interesse.

A partir da década de 30, as refinarias tornaram-se um pouco mais complexas, mas eram essencialmente unidades de destilação. Nesta mesma época, unidades de craqueamento e coqueamento começaram a surgir para atender a crescente demanda de gasolina. Estas unidades foram introduzidas com o objetivo de não somente aumentar a produção de gasolina, mas também melhorar a qualidade e desempenho da gasolina em termos de número de octanos. Isso ocorreu devido principalmente à necessidade dos motores de alta compressão e da evolução da aviação daquela época exigirem uma gasolina com melhor qualidade (melhor característica antidetonação).

Após a Segunda Guerra Mundial, ocorreram grandes evoluções e desenvolvimento de outros processos, permitindo que as refinarias tornam-se complexas de modo a produzir uma variedade de produtos exigidos pelo mercado consumidor.

Uma refinaria de petróleo pode ser dividida em cinco áreas básicas:

1. Fracionamento - é a separação do petróleo em frações.
2. Conversão - processos que mudam o tamanho e/ou a estrutura das moléculas de hidrocarbonetos. Estes processos incluem:
 - Decomposição (divisão) por craqueamento térmico ou catalítico
 - União (combinação) através da alquilação e polimerização
 - Alteração (rearranjo) com isomeração e reforma catalítica.
3. Tratamento - Processos com o objetivo de preparar os produtos finais. Podem incluir a remoção ou separação dos aromáticos e naftenos assim como as impurezas e contaminantes indesejáveis. Alguns exemplos: dessalinização, remoção de enxofre (hidrotratamento), entre outros.
4. *Blending* (mistura) - é o processo de mistura e combinação de frações de hidrocarbonetos, aditivos, e outros componentes para produzir produtos finais com propriedades específicas.

5. Outras operações - incluem processo de produção de hidrogênio, recuperação de enxofre, tratamento e resfriamento de água.

Os principais processos (unidades) que compõem as cinco áreas definidas anteriormente de uma refinaria são:

- 1) Destilação: Atmosférica e a Vácuo. Na destilação Atmosférica, ocorre a separação do petróleo em frações. Já, na Destilação a Vácuo, ocorre a separação do resíduo da Coluna Atmosférica em frações.
- 2) Craqueamento Térmico: Processo no qual os hidrocarbonetos com alto ponto de ebulição são submetidos à alta temperatura e transformados em hidrocarbonetos de menor ponto de ebulição. Desta forma, as frações de maior ponto de ebulição são transformadas em frações de menor (mais valorizadas).
- 3) Craqueamento Catalítico (Fluid Catalytic Cracking - FCC): Processo responsável pela conversão de frações mais pesadas em frações mais leves, principalmente, como a gasolina. A corrente de alimentação deste processo pode ser o resíduo da destilação atmosférica, de vácuo, gasóleo ou uma combinação destas correntes. Neste processo, usa-se um catalisador sólido. O termo *fluid* refere-se ao fato da alimentação entrar em contato com o catalisador sólido fluidizado do reator.
- 4) Coqueamento: Processo térmico no qual o resíduo pesado do petróleo (asfalto) é convertido em diesel e querosene, gerando coque como produto residual.
- 5) Desasfaltação: Processo no qual se converte o resíduo mais pesado em frações como o gasóleo, gerando asfalto como produto residual.
- 6) Reforma: Processo no qual se convertem os hidrocarbonetos parafínicos de cadeia aberta e os naftenos em aromáticos, aumentando-se o número de octanos da nafta. Gera hidrogênio como subproduto e acaba sendo utilizado em processos de hidrotatamento.
- 7) Hidrotatamento: Processos que utilizam hidrogênio com catalisadores apropriados para a remoção de contaminantes e compostos indesejados dos produtos.
- 8) Alquilação: Combina hidrocarbonetos de baixo ponto de ebulição (de cadeia pequenas) para gerar gasolina com alto número de octanos.

A Figura 2.5 apresenta um diagrama básico, exemplificando uma refinaria de petróleo composta de algumas importantes unidades.

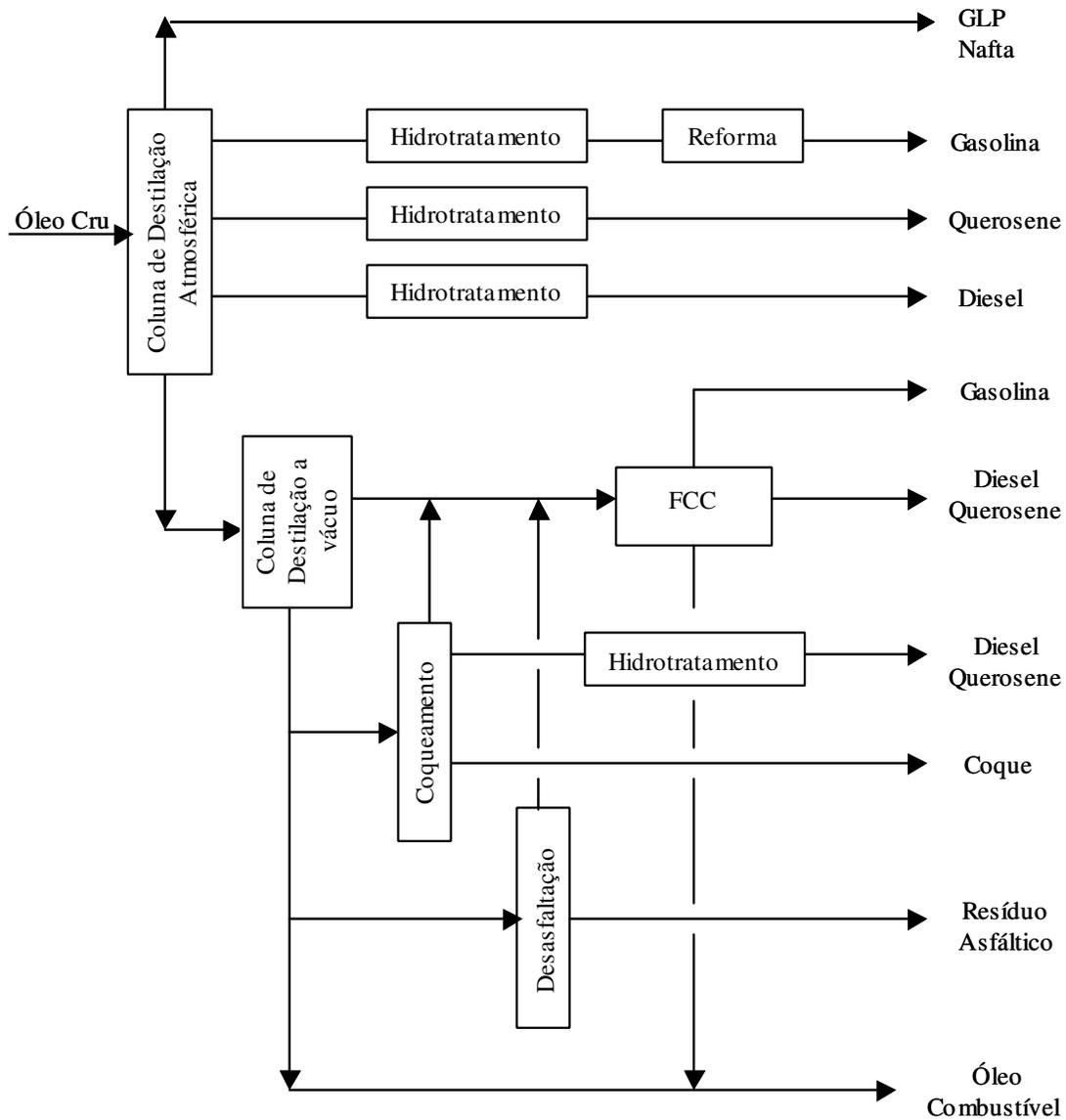


Figura 2.5: Diagrama simplificado de uma refinaria de petróleo.

2.7.1) UNIDADE DE DESTILAÇÃO

A unidade de destilação é uma das etapas mais importantes do processamento do petróleo em refinaria, já que esta é responsável pelo fracionamento inicial do petróleo em

diversos produtos tais como nafta, querosene, diesel, entre outros. Duas colunas principais fazem parte desta unidade: Coluna de Destilação Atmosférica e Coluna de Destilação a Vácuo. Outros equipamentos podem fazer parte desta unidade como, por exemplo, Coluna Pré-Fracionadora ou Torre Pré-Flash ou Colunas Debutanizadoras (Estabilizadoras). A Figura 2.6 apresenta um diagrama de blocos mostrando um exemplo da unidade de destilação de uma refinaria, considerando uma Torre Pré-Flash, Coluna Atmosférica, Debutanizadora e de Vácuo. Refinarias podem apresentar no lugar da Torre Pré-Flash, Coluna Pré-Fracionadora e outras refinarias podem apresentar somente Coluna Atmosférica e de Vácuo.

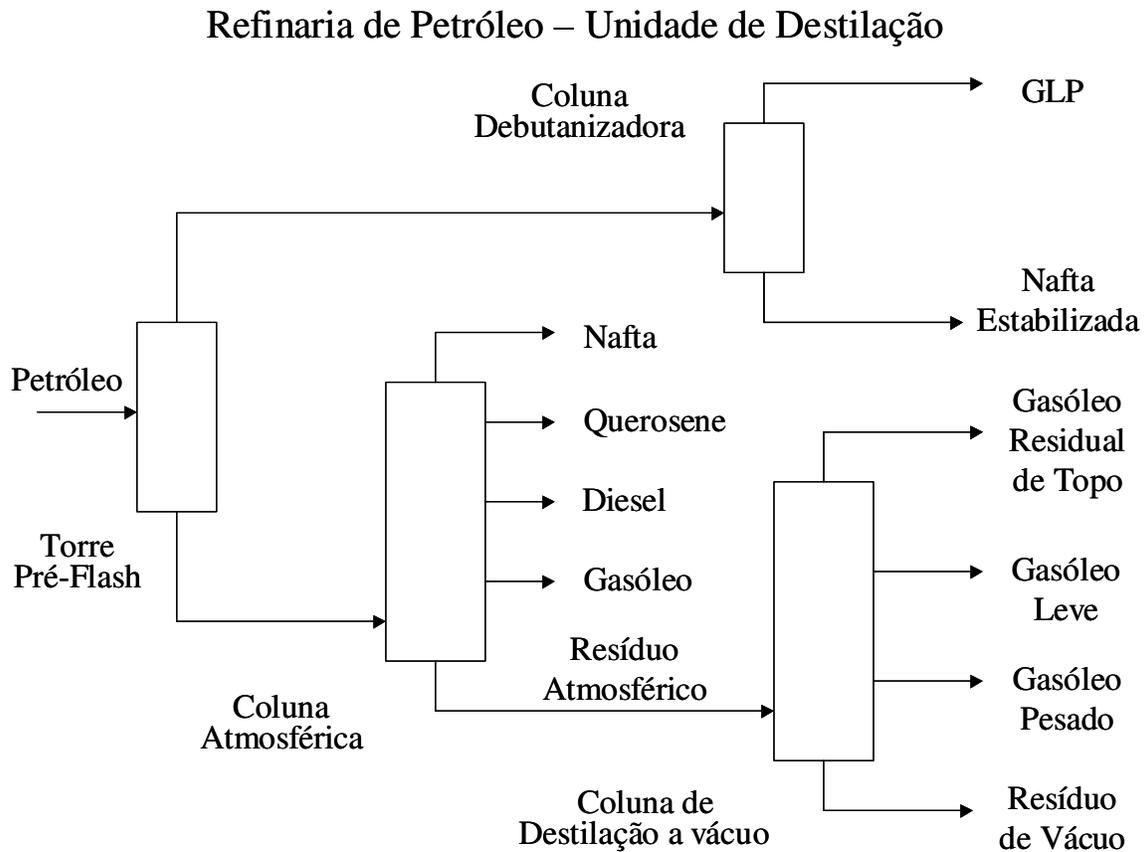


Figura 2.6: Diagrama de blocos de uma unidade de destilação de refinaria.

2.7.1.1) PRÉ-TRATAMENTO

Antes de ser processado na unidade de destilação, o petróleo é previamente tratado para a retirada de água e sais. Caso, os sais não sejam removidos do petróleo, os equipamentos e tubulações serão expostos ao ataque dos íons cloreto e ao ácido clorídrico que é formado em altas temperaturas. Como o petróleo na unidade de destilação é submetido a altas temperaturas, a formação do ácido é possível e, conseqüentemente, a existência da corrosão dos equipamentos.

O processo de dessalgação é, normalmente, realizado submetendo o petróleo previamente aquecido por uma rede de trocadores de calor a cargas eletrostáticas de alta tensão para concentrar a água com sais no fundo da dessalgadora. Neste caso, água quente é adicionada ao petróleo para que os sais se dissolvam nesta. Outra maneira de retirar os sais é adicionar água e surfactantes ao petróleo. Aquecendo-se a mistura, a água contendo os sais e impurezas deslocam-se para o fundo de onde é retirada. Ambos os processos são contínuos. Além disso, um processo menos utilizado envolve filtrar o petróleo aquecido.

2.7.1.2) COLUNA ATMOSFÉRICA

Após o processo de dessalgação, o petróleo é submetido a uma rede de trocadores de calor para pré-aquecimento antes de alimentar o forno e em seguida, a Coluna Atmosférica. Caso, a Unidade de Destilação possua pré-fracionamento, o petróleo é processado em coluna pré-fracionadora ou torre pré-flash, obtendo-se nafta instável produto de topo. O produto de fundo obtido através do pré-fracionamento é aquecido novamente por uma rede de trocadores de calor e em seguida, um forno. Finalmente, após este aquecimento, o produto de fundo é processado na Coluna Atmosférica.

Geralmente, em processos de destilação do petróleo, a alimentação de coluna atmosférica é aquecida em temperaturas em torno de 340°-370°C. A máxima temperatura possível para a corrente de alimentação é em torno de 377°C, segundo Nelson (1969). Acima desta temperatura, o petróleo começa a sofrer degradação térmica, levando à

formação de coque. Isto pode causar falha no funcionamento da unidade devido ao depósito de coque na tubulação e na coluna.

Devido à própria complexidade do petróleo (que pode ser considerada como mistura de uma série de componentes), a Coluna Atmosférica, denominada também como Torre Atmosférica, torna-se extremamente complexa. Esta não é uma coluna de destilação convencional. Segundo Bagajewicz *et al.* (2001), quando comparada a uma destilação convencional, a destilação do petróleo tem características específicas como: grande quantidade de processamento, grande variação de temperatura ao longo da coluna e ausência de refeedor. Produtos de destilação de misturas complexas são misturas complexas em si (Perry, 1997). De fato, todos os produtos originários da destilação do petróleo na Coluna Atmosférica são misturas de vários componentes (hidrocarbonetos), especificadas em termos de suas temperaturas de destilação dentro de normas estabelecidas (ensaio de destilação ASTM D86). Além dos produtos principais, a Coluna Atmosférica gera como produto de fundo, o Resíduo Atmosférico.

Duas seções fazem parte da Coluna Atmosférica: esgotamento e retificação. A seção de esgotamento localiza-se abaixo da alimentação, enquanto que a de retificação, acima. A corrente de alimentação parcialmente vaporizada entra na zona de expansão, onde ocorre a separação de vapor e líquido. O fluxo líquido desce abaixo da zona de expansão e entra em contato com o fluxo de vapor do fundo da coluna. Os componentes mais leves do fluxo líquido são removidos pelo vapor de água que é injetado no fundo da coluna e passam a ser incorporados no fluxo de vapor.

Em geral, uma quantidade a mais da corrente de alimentação é vaporizada pelo forno. Esta vaporização extra da alimentação da coluna atmosférica é denominada de sobrevaporizado (*overflash*). Segundo Bagajewicz (1996), o sobrevaporizado é definido como a razão entre a vazão volumétrica proveniente do primeiro estágio acima da zona de expansão e a vazão de alimentação da coluna atmosférica.

Supondo que a lei de Dalton fosse válida, a equação para a pressão parcial dos hidrocarbonetos em um sistema é:

$$p_{HC} = \frac{n_{HC}}{n_{HC} + n_{\text{água-vapor}}} P \quad (2.5)$$

p_{HC} é a pressão parcial dos hidrocarbonetos, P é a pressão do sistema, n_{HC} é a vazão molar de hidrocarbonetos na fase vapor e $n_{\text{água-vapor}}$ é a vazão molar de vapor de água (assumindo que toda a água esteja na fase vapor). De acordo com a equação acima, se a vazão de vapor aumentar, a pressão parcial dos hidrocarbonetos diminui. A existência de vapor de água no sistema faz com que a pressão parcial dos hidrocarbonetos seja menor em comparação a um sistema composto somente de hidrocarbonetos, considerando como válida a Lei de Dalton.

De uma maneira simplificada, se a lei de Raoult for válida para as equações de equilíbrio do sistema em questão, tem-se:

$$y_i P = x_i P_i^{sat} \quad (2.6)$$

$$x_i = \frac{y_i P}{P_i^{sat}} \quad (2.7)$$

y_i é a composição do hidrocarboneto na fase vapor, x_i é a composição do hidrocarboneto na fase líquida e P_i^{sat} é a pressão de saturação do hidrocarboneto.

Se a pressão parcial dos hidrocarbonetos na mistura é reduzida quando se introduz vapor de água, a pressão de saturação também deve ser reduzida para se obter uma fixa composição dos hidrocarbonetos na fase líquida e, a lei de Raoult seja válida. Se a pressão de saturação diminui, por consequência, a temperatura de vaporização diminui. Desta forma, pode-se observar que a presença do vapor de água reduz a pressão parcial dos hidrocarbonetos e, portanto, reduz a temperatura de vaporização da mistura (Gary e Handwerk, 1994). A energia para a vaporização é obtida, não do vapor de água, mas do líquido a ser vaporizado (fluxo de líquido que desce abaixo da zona de expansão), segundo Liebmann *et al* (1998). Por isso, a temperatura nos estágios abaixo da zona de expansão diminui ao longo da seção de esgotamento. O vapor de água do fundo da Coluna Atmosférica não arrasta os componentes mais leves do resíduo. Se isto ocorresse, estes componentes do resíduo estariam presentes na corrente de topo, ou seja, no destilado. E é exatamente o que não ocorre porque a nafta (produto de topo) é composta principalmente por componentes mais leves do petróleo.

A Coluna Atmosférica opera com condensador. O vapor do topo da coluna é condensado e enviado a um tanque onde nafta (produto de topo) e água são separadas. Parte da nafta é retirada e outra parte retorna à coluna como refluxo interno. Além disso, as correntes laterais são enviadas para colunas de *stripping*. Os componentes mais leves das correntes laterais são removidos pelo vapor de água do fundo desta coluna e retornam à coluna principal em estágios acima da corrente lateral. Os produtos são retirados na corrente de fundo das colunas de *stripping*.

O uso de refeedor não é aconselhável, principalmente, devido às altas temperaturas que a região abaixo da alimentação pode alcançar. Geralmente, as Colunas Atmosféricas não apresentam refeedor. Os principais motivos da ausência de refeedor para Colunas Atmosféricas em geral são:

- A alta temperatura em que os estágios da seção de esgotamento podem alcançar. Com o refeedor, a temperatura destes estágios facilmente pode ultrapassar a temperatura de formação de coque que não deve ocorrer de forma alguma. Segundo Liebmann *et al.* (1998), a qualidade do produto pode estar comprometida quando um refeedor é utilizado devido à formação de coque e decomposição do produto.
- Refeedor tem um custo extremamente alto de instalação no caso da destilação do petróleo.
- A fração da alimentação vaporizada utilizando vapor quente no refeedor é menor se comparada ao uso de vapor de água diretamente na coluna. Isto é válido somente para uma pequena faixa de vazão de vapor de água. Conforme comparação apresentada no trabalho de Liebmann *et al.* (1998), o uso de vapor de água é mais eficiente que o de refeedor quando uma pequena fração de alimentação vaporizada é requerida.

Segundo Watkins (1979), há três tipos de Coluna Atmosférica: tipo U, tipo A e tipo R. A Coluna do tipo U opera sem *pump-back* e *pump-around*. A Coluna do tipo A opera com *pump-around*, enquanto a do tipo R opera com *pump-back*.

Pump-around (refluxo circulante) consiste na retirada e no resfriamento de uma corrente líquida de pontos da coluna. Neste caso, a corrente líquida retorna em estágios acima da retirada. Já, *pump-back* consiste na retirada e resfriamento de uma corrente líquida da coluna. Em seguida, esta corrente retorna estágios abaixo da retirada.

2.7.1.3) COLUNA DEBUTANIZADORA

A principal função da Coluna Debutanizadora (Estabilizadora) é a estabilização da nafta que contem componentes mais voláteis e leves de baixo ponto de ebulição, ou seja, a remoção destes componentes. A presença destes componentes faz com que a nafta tenha uma alta pressão de vapor. Se a nafta não for estabilizada, ou seja, se não forem retirados estes componentes mais leves, a nafta à pressão atmosférica será volatilizada, não podendo ser armazenada adequadamente em reservatórios.

A Coluna Debutanizadora permite a obtenção de GLP como produto de topo e Nafta Estabilizada como produto de fundo. Neste trabalho, a coluna será operada com condensador e refeedor. O condensador permite que o vapor do topo da coluna seja condensado. Já, o refeedor permite que parte do produto de fundo seja aquecido e vaporizado, retornando à coluna.

Normalmente, condensadores operam com água como fluido refrigerante. Assim, a pressão de operação de uma Coluna Debutanizadora deve ser aquela necessária de modo que o vapor possa ser condensado a uma faixa de temperatura superior à temperatura de entrada da água no condensador. A nafta é comprimida para colunas estabilizadoras mantidas a uma pressão de aproximadamente 100 psi (689 kPa) e operadas com refluxo, segundo Speight (1999).

2.7.1.4) COLUNA DE DESTILAÇÃO A VÁCUO

Para que ocorra a separação em diversas frações a partir do resíduo atmosférico (produto de fundo da Coluna Atmosférica), seriam necessárias altas temperaturas na coluna de destilação se operada à pressão atmosférica. Desta forma, a Coluna de Destilação a Vácuo é operada a baixas pressões para que suas temperaturas de alimentação e de operação não sejam altas e excedam à temperatura de formação de coque e craqueamento. Os principais produtos retirados nas correntes laterais desta coluna são o gasóleo leve e pesado, enquanto que o produto de fundo é o Resíduo de Vácuo.

As Colunas de Destilação de Vácuo são, geralmente, operadas em pressões em torno de 50-100 mmHg e com injeção de vapor no fundo. Já, as colunas de destilação de vácuo sem injeção de vapor no fundo operam em pressões em torno de 10-20 mmHg.

2.8) REVISÃO DE LITERATURA

O processo de destilação do petróleo é extremamente complexo. Esforços e mudanças têm sido realizados desde os anos 70 em que o consumo energético tornou-se uma questão econômica importante.

Segundo Liebmann *et al.* (1998), o projeto de destilação de petróleo é, geralmente, governado por experiência, guia de projetos e tentativas de simulação. De fato, especificações de equipamento de projeto para Coluna Atmosférica foram encontradas como recomendações. Neste caso, por exemplo, Watkins (1979) apenas recomenda que o número de estágios entre diferentes retiradas seja seguido. Com o objetivo de contribuir para a área de destilação do petróleo de forma diferenciada, Liebmann *et al.* (1998) desenvolveram um procedimento de projeto de destilação do petróleo. Entretanto, um trabalho anterior foi desenvolvido de forma menos detalhada (Liebmann *et al.* (1995)). Neste estudo, foram levadas em consideração a coluna, a rede de trocadores de calor do processo e suas interações entre si simultaneamente para a minimização do custo de utilidades. Para isto, a coluna principal atmosférica é dividida em seqüência de simples colunas. Em seguida, ocorrem a instalação de refeedores e o acloppamento térmico para a minimização do consumo de utilidades, utilizando as curvas *grand composite*. Após todas as modificações para a redução do consumo de utilidades, as seqüências de colunas transformam-se em uma só. Nesta mesma linha de pesquisa, Bagajewicz *et al.* (2001, a) propõem também um outro procedimento para coluna atmosférica, utilizando diagramas de consumo-demanda de energia através do estabelecimento e interação dos circuitos dos refluxos circulantes e do fluxo de vapor para o menor consumo energético possível. Os diagramas de demanda-consumo, construídos por Bagajewicz *et al.* (2001, a) são uma extensão dos conceitos de diagramas de temperatura-entalpia (Terranova (1989) e Huang (1976)). A diferença entre metodologias está no fato de que a proposta por Liebmann *et al.* (1998) permite atingir uma eficiência energética através do acloppamento, enquanto que

Bagajewicz *et al.* (2001, a) propõem de forma direta através dos diagramas de demanda-consumo. Após este trabalho, Bagajewicz *et al.* (2001, b) desenvolveram um método para rede de trocadores de calor que melhor se ajuste às necessidades de máxima eficiência para uma variedade de petróleo ao mesmo tempo.

Com o objetivo de estudo do processo de destilação do petróleo, Bagajewicz (1998) estudou a influência de alguns parâmetros na coluna atmosférica sob determinadas especificações. Segundo o autor, o circuito dos refluxos circulantes tem grande importância para a integração energética, o vapor da coluna de *stripping* não tem efeito na distribuição da composição de produto, o efeito do aumento do vapor principal pode compensar ao da redução de sobrevaporizado e o uso de refeedor não é recomendado. Neste projeto de tese, estes parâmetros serão estudados sob diferentes especificações e condições para analisar e complementar de outra forma e ponto de vista o estudo dos diferentes efeitos na coluna atmosférica e no processo global.

Os autores Ji e Bagajewicz desenvolveram trabalhos para a área de destilação do petróleo. Pode-se destacar três, dentre estes. Os principais resultados e conclusões de cada trabalho são apresentados a seguir:

1. Ji e Bagajewicz (2002, a) - Unidades de destilação com colunas pré-fracionadoras ou tambor pré-flash (com sua corrente de vapor alimentando a coluna atmosférica) não são tão eficientes energeticamente, se comparadas com uma unidade com apenas a coluna atmosférica para as mesmas condições de retirada de produtos.
2. Ji e Bagajewicz (2002, b) – Uma configuração de coluna atmosférica denominada *stripping – type* foi estudada. De acordo com as simulações realizadas neste trabalho, esta coluna não pode alcançar a mesma retirada de resíduo de uma coluna convencional se a alimentação não for aquecida acima da temperatura que previne a formação de coque. Deste modo, os autores mostraram que esta configuração não apresenta vantagens em relação à convencional.
3. Ji e Bagajewicz (2002, c) – O uso da coluna de vácuo processando o resíduo da coluna atmosférica foi estudado para três diferentes tipos de configuração para a unidade de destilação: convencional (coluna atmosférica e de vácuo), com tambor pré-flash (corrente de vapor alimentando a coluna atmosférica) e *stripping – type*. O calor fornecido pelos produtos da coluna de vácuo não pode ser utilizado no caso da unidade com coluna

configuração *stripping – type*. A configuração convencional e com tambor pré-flash podem ser consideradas equivalentes devido ao fato de que o consumo energético da configuração com tambor pré-flash é um pouco menor do que a configuração convencional.

Alguns dos principais trabalhos pesquisados, envolvendo modelagem de processos de destilação do petróleo são apresentados a seguir:

- Mizoguchi *et al.* (1995): A solução do modelo (estágio por estágio) levou em conta o tempo computacional que deve estar adequado às aplicações em tempo real. Além disso, as condições ótimas operacionais em estado estacionário foram determinadas. Os resultados otimizados foram discutidos com o objetivo de desenvolver uma estratégia de controle para manter o processo nas melhores condições possíveis frente às perturbações.
- Kumar *et al.* (2001): Desenvolveu um modelo multicomponente em estado estacionário para destilação do petróleo, utilizando C+3 variáveis independentes (C é o número de componentes). Segundo os autores, a escolha das variáveis (Temperatura, Fração molar dos componentes, Fluxo total de líquido e vapor de cada estágio) tornou o modelo estável e robusto. Os resultados obtidos foram comparados com aqueles obtidos no simulador ASPEN PLUS e na literatura. A partir da análise destes resultados, foi verificada uma boa concordância entre aqueles apresentados pelos autores e pelo simulador, além daqueles apresentados pela literatura.
- Rasmusway *et al.* (2002): Baseado no trabalho de Kumar *et al.* (2001) e combinando um método de Edmister (1943), apresentou um método para redução do número de equações para destilação do petróleo.
- Dave *et al.* (2003): Usando parâmetros medidos da planta, um modelo *TBP (True Boiling Point) backcalculation* foi desenvolvido para a estimativa da curva TBP de alimentação.
- Chatterjee *et al.* (2004): Usa o modelo para destilação do petróleo estudado com o objetivo de prever as propriedades a cada minuto para o controle em tempo real.
- Basak *et al.* (2002): Desenvolveu um modelo para otimização em tempo real de uma unidade industrial de destilação do petróleo. Além disso, um procedimento para recalculá-la a curva TBP (True Boiling Point) foi estudado, utilizando informações em tempo real da planta.

- Gadalla *et al.* (2003, a): Apresenta modelos *shortcut* para *retrofit* de vários tipos de coluna de destilação, inclusive para a coluna de destilação de petróleo. Os resultados deste modelo de destilação de petróleo foram comparados aos modelos rigorosos. Os autores mostraram boa concordância entre os resultados. Assim, com base neste modelo *shortcut*, os autores em outro trabalho (Gadalla *et al.* (2003, b)) desenvolveram um método de otimização, considerando a rede de trocadores de calor existente para a redução do consumo energético e o aumento da capacidade da coluna. O método de otimização utilizado foi o SQP (Sucessive Quadratic Promming).

Atualmente, o desenvolvimento de melhorias no processo em refinarias ou em qualquer indústria é extremamente importante para que a produção gere o maior lucro possível e minimize o consumo energético e de utilidades. Desta forma, grandes esforços têm sido realizados no sentido de melhorar e aperfeiçoar o processo. Os trabalhos de Briones *et al.* (1999) e Kesler *et al.* (1998) ilustram exemplos de *retrofit* para a minimização do consumo energético. Neste caso, o trabalho de Briones *et al.* (1999) refere-se ao *retrofit* de uma unidade de destilação de petróleo, enquanto o de Kesler *et al.* (1998), ao de refinaria e plantas petroquímicas.

Segundo Sharma *et al.* (1999), a área de destilação de petróleo é uma das principais para a integração energética por *revamping*. Alguns trabalhos importantes ilustram a importância do *revamp* em refinarias, dentre os quais se pode citar: Martin *et al.* (1999), Martin *et al.* (2000) e Barletta (1998).

CAPÍTULO 3 - ESTUDO DAS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO DO PETRÓLEO

A Destilação do petróleo é um dos processos mais importantes em uma refinaria, pois esta é responsável pelo fracionamento do petróleo em uma série de produtos como nafta, querosene, diesel, entre outros. Tendo em vista sua importância e o objetivo estabelecido anteriormente, este capítulo apresenta o estudo e análise do processo de destilação do petróleo, envolvendo a Coluna Atmosférica, Coluna Debutanizadora e Torre Pré-Flash.

Inicialmente, foram realizadas a descrição do processo em estudo e a caracterização da corrente de petróleo para as simulações. Em seqüência, foram realizadas diversas simulações para a avaliação (análise sensitiva) das principais variáveis, mostrando os principais efeitos sobre a Torre Pré-Flash, a Coluna Atmosférica, a Coluna Debutanizadora e todo o processo. Neste caso, o Simulador Comercial HYSYS (Hyprotech Ltd) foi utilizado. Desta forma, pode-se concluir o estudo completo das principais variáveis do processo de destilação.

3.1) DESCRIÇÃO DO PROCESSO EM ESTUDO

Inicialmente, é realizado o processo de dessalgação do petróleo. Este processamento inicial do petróleo deve ser feito para a retirada de sais inorgânicos. Há vários tipos de processo de dessalgação. Normalmente, a separação ocorre por um processo eletrostático, no qual são gerados potenciais de energia. Neste caso, não será estabelecido este processo no simulador, considerando já estabelecida a corrente de alimentação de petróleo inicial gerada pelo simulador (mais detalhes serão realizados a seguir) através de dados de entrada. O processo em estudo envolve a destilação do petróleo para a obtenção de diversas frações por meio de uma Torre Pré-Flash, uma Coluna Atmosférica Principal composta de Refluxos Circulantes e Colunas de *Stripping* e uma Coluna Debutanizadora (Estabilizadora).

A Figura 3.1 mostra o fluxograma do processo. A corrente de alimentação inicial do petróleo é processada, inicialmente, pela Torre Pré-Flash, obtendo-se duas correntes: Líquida (Corrente Líquido_Flash na Figura 3.1) e Vapor (Corrente Vapor_Flash na Figura 3.1). A corrente de vapor é a corrente de alimentação da coluna debutanizadora (Corrente al_debutanizadora), enquanto que a corrente líquida é a alimentação da coluna atmosférica (Corrente al_atmosférica). As correntes CVP, CVQ, CVD e CVGO são as correntes de vapor de água utilizadas. Mais especificamente, a corrente CVP é utilizada na Coluna Atmosférica e as correntes CVQ, CVD e CVGO, nas colunas de *stripping*. Mais adiante serão explicadas, com mais detalhes, estas correntes e suas funções. Segundo a Figura 3.1, o vapor do topo da coluna atmosférica é condensado e logo após, nafta (produto de topo) e água são separadas num decantador. Porém, para as simulações realizadas, o condensador será responsável pela condensação do vapor e separação da nafta e água. Querosene, Diesel e Gasóleo são retirados das respectivas colunas de *stripping* (conforme Figura 3.1) associadas à Coluna Atmosférica. Enquanto que Resíduo Atmosférico na Figura 3.1 é retirado do fundo da Coluna Atmosférica.

No processo em estudo, a Torre Pré-Flash é operada como um flash isotérmico, considerando que a temperatura e a pressão das correntes líquida e vapor são iguais a de operação do pré-flash. Desta forma, esta Torre permite um fracionamento inicial, retirando os componentes mais leves do petróleo, em uma determinada temperatura e pressão de operação. As condições de operação da Torre Pré-Flash serão especificadas de modo a se obter uma quantidade vaporizada e composição adequada de nafta na corrente de vapor. A nafta (corrente de vapor) obtida na torre pré-flash é instável, pois contém os principais componentes do GLP (Gás Liquefeito do Petróleo). Desta forma, se a nafta instável for submetida à pressão atmosférica, haverá vaporização de uma parcela da mesma, já que os componentes do GLP se volatilizam a esta pressão. Assim, a Coluna Debutanizadora tem como principal função a separação do GLP da nafta, tornando-a estável.

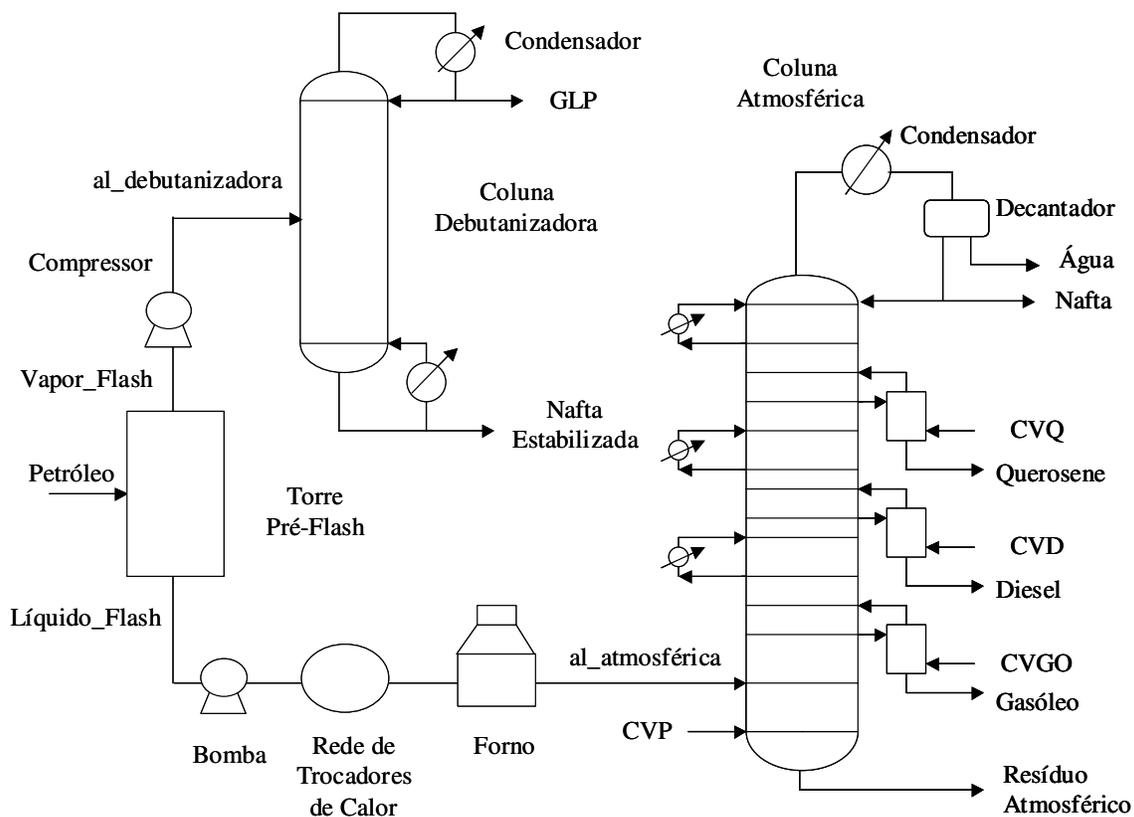


Figura 3.1: Fluxograma básico do processo.

A pressão da corrente de vapor da Torre Pré-Flash (Vapor_Flash) será elevada até uma determinada pressão por um compressor. Esta corrente de saída do compressor é a corrente de alimentação da Coluna Debutanizadora (Corrente al_debutanizadora na Figura 3.1).

A Coluna Debutanizadora do processo a ser estudado é composta por um condensador total e um refeedor. Deste modo, a condensação de todo o vapor do topo da Coluna Debutanizadora é realizada pelo condensador. Uma parte do vapor condensado (refluxo) volta à coluna enquanto que, a outra é retirada como produto de topo (GLP). Já, o refeedor possibilita a vaporização de parte da corrente líquida do fundo; a outra parte não vaporizada é retirada como produto de fundo (nafta estabilizada).

Geralmente, em processos de destilação do petróleo, a alimentação de coluna atmosférica é aquecida em temperaturas em torno de 340°-370°C. Segundo Nelson (1969), em temperaturas elevadas em torno de 710°F (377°C), ocorre a degradação térmica do petróleo. Por este motivo, a máxima temperatura de alimentação de colunas atmosféricas é

a temperatura limite de degradação térmica, ou seja, a temperatura limite para não haver coqueamento do petróleo. Deste modo, a corrente líquida da torre pré-flash será aquecida no processo até uma determinada temperatura. Inicialmente, nas simulações realizadas no simulador comercial HYSYS, o aquecimento desta corrente será feito por dois equipamentos denominados *heater*, um, representando a rede de trocadores de calor e o outro, o forno. Esta simplificação no ambiente de simulação será necessária porque não será realizada a integração energética do processo por meio da rede de trocadores de calor utilizando correntes do processo e, desta forma, as condições da corrente de alimentação da coluna atmosférica (corrente líquida da torre pré-flash aquecida pelos *heater's*) poderão ser especificadas. Isso significa que o processo não estará limitado à carga térmica para o aquecimento da corrente de alimentação da coluna atmosférica, ou seja, há disponibilidade total da carga térmica necessária para todas as simulações do processo e especificações em relação ao aquecimento da corrente de alimentação da coluna atmosférica a uma determinada condição especificada. A temperatura da corrente de saída da rede de trocadores de calor será especificada em 250°C, inicialmente. Além disso, uma bomba será adicionada ao processo para que a corrente de alimentação da coluna atmosférica (corrente líquida da torre pré-flash) esteja na pressão especificada, já que há queda de pressão na rede de trocadores de calor e forno. Neste caso, para a simulação, é necessário que a pressão da alimentação da coluna atmosférica (condição de alimentação) esteja especificada.

A coluna atmosférica é operada com injeção de vapor de água (Corrente CVP da Figura 3.1) no fundo da coluna e sem a presença de refeedor.

A fase vapor e líquida da alimentação são separadas na zona de expansão. O fluxo de vapor segue em direção ao topo da coluna, enquanto o fluxo de líquido segue em direção ao fundo da coluna. Os componentes mais leves que estão presentes neste fluxo de líquido entram em contato com o vapor de água alimentado no fundo da coluna e assim, são vaporizados. A vaporização dos componentes mais leves presentes no fluxo de líquido ocorre devido à redução da pressão parcial destes na fase vapor. A presença de vapor faz com que a pressão parcial dos componentes mais leves seja reduzida. Conseqüentemente, a temperatura de vaporização é reduzida. Deste modo, a energia para ocorrer a vaporização é obtida do próprio fluxo de líquido e não do vapor de água (Liebmann *et al.*, 1998).

A Figura 3.2 apresenta a Coluna Atmosférica operando com três Refluxos Circulantes (RC1, RC2 e RC3) e três colunas de *stripping* numeradas de 1 a 3. As correntes

de energia para os Refluxos Circulantes RC1, RC2 e RC3 são Q-RC1, Q-RC2 e Q-RC3, respectivamente. Será utilizado um condensador para a Coluna Atmosférica, responsável pela condensação do vapor de topo por meio de uma corrente térmica (Q-COND da Figura 3.2).

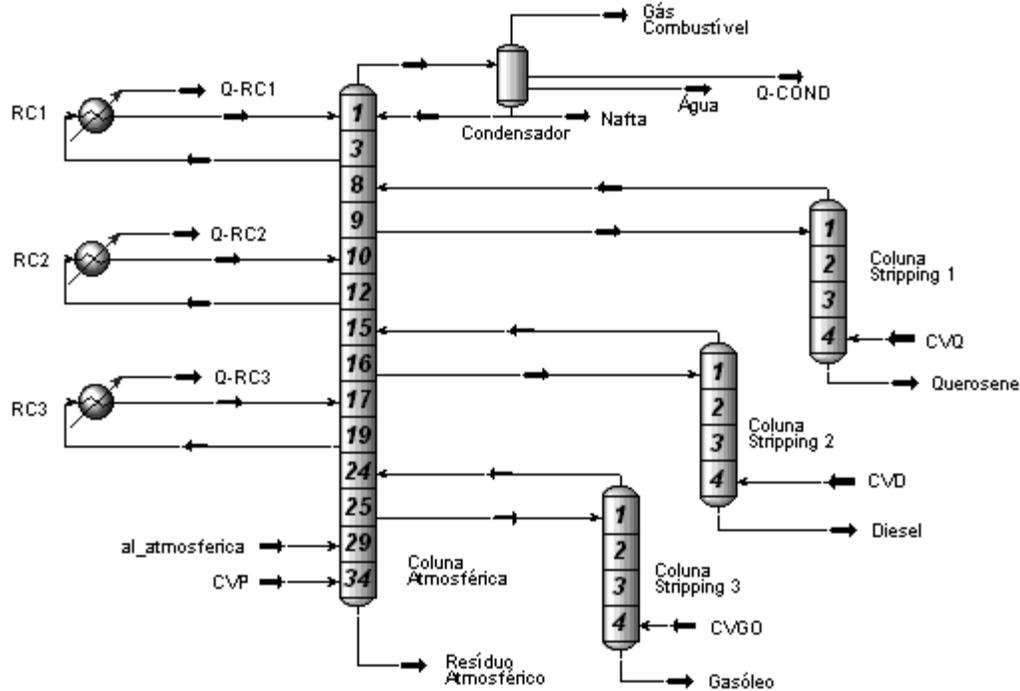


Figura 3.2: Coluna Atmosférica composta por refluxos circulantes e colunas de *stripping*.

As correntes laterais serão enviadas às colunas de *stripping*, operando com injeção de vapor de água no fundo da coluna. Querosene, Diesel e Gasóleo são retirados como produtos das colunas de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente. Desta forma, cada corrente de vapor de água CVQ, CVD e CVGO será utilizada na coluna de *stripping* cujos produtos (querosene, diesel e gasóleo) são retirados. A função da coluna de *stripping* é a remoção dos componentes mais leves da corrente lateral. Uma vez que os componentes mais leves são removidos, estes retornam à coluna principal em estágios acima da corrente lateral retirada.

Três refluxos circulantes são adicionados à coluna atmosférica. Os refluxos circulantes consistem na remoção e no resfriamento de correntes líquidas retiradas em

determinados estágios da coluna. A principal função dos refluxos circulantes é a redução de fluxo de vapor no topo da coluna e, conseqüentemente, a redução na carga do condensador da coluna. Na simulação, são utilizadas as correntes de energia Q-RC1, Q-RC2 e Q-RC3 para o resfriamento das correntes removidas da coluna atmosférica. Cada corrente retirada é resfriada por meio de um trocador de calor, utilizando a respectiva corrente de energia. Em grandes refinarias, o resfriamento destas correntes do refluxo circulante se dá por meio de vários trocadores de calor que utilizam correntes frias do processo e / ou de outros, ou seja, o refluxo circulante possibilita a integração energética, utilizando correntes frias que precisam ser aquecidas para resfriar as do refluxo circulante. Para as simulações em estudo, esta integração energética não será realizada. Assim, o resfriamento das correntes dos refluxos circulantes será feito por meio das correntes de energia especificadas anteriormente.

Além disso, o condensador desta coluna permite que o vapor do topo seja condensado. Após o vapor ser condensado, uma parte deste volta à coluna como refluxo e, a outra é retirada como destilado (produto de topo). Nas simulações, o vapor de água que foi condensado é separado da nafta e retirado no próprio condensador. Os produtos obtidos nesta coluna serão: nafta (destilado), querosene, diesel, gasóleo e resíduo atmosférico (produto de fundo). Gás combustível é o vapor que não foi totalmente condensado pelo condensador. Entretanto, todas as simulações serão realizadas de modo que o vapor seja totalmente condensado e, portanto, não ocorra a saída da corrente de gás combustível. As especificações destes produtos obtidos serão detalhadas mais adiante.

3.1.1) ESPECIFICAÇÕES DE EQUIPAMENTO DA COLUNA ATMOSFÉRICA E DEBUTANIZADORA

Para as simulações do processo, todas as especificações de projeto da Coluna Atmosférica e Debutanizadora serão mantidas constantes, exceto para as simulações nas quais os parâmetros de projeto de colunas serão avaliados e desta forma, sendo necessária sua variação. A Tabela 3.1 apresenta as especificações de projeto (equipamento) da Coluna Atmosférica. Os estágios das Colunas Atmosférica e Debutanizadora são numerados do topo para o fundo. Os números de estágios, utilizados para a separação entre as frações

retiradas seguem a recomendação proposta por Watkins (1979) e o número de estágios total da Coluna Atmosférica, bem como a localização das retiradas, são baseados no trabalho de Bagajewicz *et al.* (2001).

A Coluna Debutanizadora tem 30 estágios e é operada com refervedor e condensador. A posição do estágio de alimentação encontra-se no 15º prato (numerado de cima para baixo). GLP e Nafta Estabilizada são retirados, respectivamente, como produto de topo e fundo.

Tabela 3.1: Especificações de projeto da coluna atmosférica.

| Coluna Atmosférica | |
|--|---------------------------|
| Número de estágios | 34 |
| Número de estágios das colunas de stripping | 4 |
| Corrente | Posição de estágio |
| Alimentação | 29 |
| Nafta | Condensador |
| Querosene | 9 |
| Diesel | 16 |
| Gasóleo | 25 |
| Corrente de retorno da coluna de <i>stripping</i> de querosene | 8 |
| Corrente de retorno da coluna de <i>stripping</i> de diesel | 15 |
| Corrente de retorno da coluna de <i>stripping</i> de gasóleo | 24 |
| Corrente de retirada do primeiro refluxo circulante | 3 |
| Corrente de retirada do segundo refluxo circulante | 12 |
| Corrente de retirada do terceiro refluxo circulante | 19 |
| Corrente de retorno do primeiro refluxo circulante | 1 |
| Corrente de retorno do segundo refluxo circulante | 10 |
| Corrente de retorno do terceiro refluxo circulante | 17 |

3.1.2) CARACTERIZAÇÃO DAS FRAÇÕES OBTIDAS NO PROCESSO

As definições para as frações de petróleo em termos de faixa de temperatura de ebulição ASTM D86, segundo Watkins (1979), serão consideradas. Muitas refinarias definem seus produtos conforme especificações próprias adotadas ou especificações exigidas pelo mercado. Para todas as simulações, as definições de Watkins (1979) serão seguidas. Neste trabalho, as principais frações (produtos) obtidas pela destilação do petróleo e estudadas são: GLP, Nafta, Querosene, Diesel e Gasóleo. As definições destes produtos estão estabelecidas na Tabela 2.3.

Normalmente, as frações são especificadas e caracterizadas segundo ensaios de destilação em laboratório descritos anteriormente de acordo com normas estabelecidas. Por exemplo, as frações da Tabela 2.3 são especificadas em faixas de temperatura de ebulição, de acordo com o teste de destilação ASTM D86. ASTM significa “Association Society for Testing and Materials” e é uma entidade responsável pela padronização de testes de laboratório (ensaios).

3.1.3) CARACTERIZAÇÃO DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO: GERAÇÃO DE PSEUDOCOMPONENTES

Os dados da caracterização do petróleo do artigo de Bagajewicz e Ji (2001 a) foram utilizados nas simulações realizadas pelo simulador comercial HYSYS. As Tabelas 3.2 e 3.3 apresentam os dados de caracterização do petróleo simulado. O petróleo considerado nas simulações é leve.

Tabela 3.2: Dados do petróleo – Densidade e Curva PEV.

| | |
|-------------|--------------------------------|
| Densidade | 845 kg/m ³ (36°API) |
| % em volume | Temperatura (°C) |
| 5 | 45 |
| 10 | 82 |
| 30 | 186 |
| 50 | 281 |
| 70 | 382 |
| 90 | 552 |

Tabela 3.3: Composição dos *light-ends* do petróleo.

| Componente | % em Volume |
|-------------|-------------|
| Etano | 0,13 |
| Propano | 0,78 |
| Iso-butano | 0,49 |
| n-butano | 1,36 |
| Iso-pentano | 1,05 |
| n-pentano | 1,30 |
| Total | 5,11 |

Através destes dados, o simulador irá gerar os pseudocomponentes para a caracterização da corrente de alimentação do petróleo.

O petróleo pode ser dividido em pseudocomponentes. Cada pseudocomponente representa um componente discreto, com propriedades médias, em toda a mistura. Mas na verdade, o pseudocomponente é uma mistura de vários componentes.

No simulador, há opções para a criação dos pseudocomponentes: automática ou através de números de pontos ou intervalos de temperatura, adotando-se uma faixa de temperatura para o corte do pseudocomponente. A opção escolhida foi a criação automática de pseudocomponentes, gerando 38. Este número de pseudocomponentes foi determinado com base no número de cortes, ou seja, com base em faixas de temperatura (faixa de corte - pseudocomponentes) do petróleo por intervalo de temperatura de ebulição:

- $PIE_{light-end}$ até $426,67^{\circ}C$ ($800^{\circ}F$): $13,89^{\circ}C$ ($25^{\circ}F$) por corte, gerando 28 pseudocomponentes ($(800 - PIE_{light-end})/25$).
- $426,67^{\circ}C$ ($800^{\circ}F$) até $648,89^{\circ}C$ ($1200^{\circ}F$): $27,78^{\circ}C$ ($50^{\circ}F$) por corte, gerando 8 pseudocomponentes.
- $648,89^{\circ}C$ ($1200^{\circ}F$) até $760^{\circ}C$ ($1400^{\circ}F$): $55,56^{\circ}C$ ($100^{\circ}F$) por corte, gerando 2 pseudocomponentes.

Neste caso, o $PIE_{light-end}$ é a temperatura normal de ebulição do componente mais pesado (n-pentano) dos dados da composição dos *light-ends*.

As composições em fração molar de todos os pseudocomponentes que foram gerados pelo HYSYS encontram-se na Tabela 3.4. Neste caso, foram utilizados os dados de caracterização do petróleo das Tabelas 3.2 e 3.3.

Tabela 3.4: Composição em fração molar dos componentes e pseudocomponentes gerados pelo simulador HYSYS.

| Componente / pseudocomponente | Fração molar | Pseudocomponente | Fração molar |
|-------------------------------|--------------|------------------|--------------|
| Etano | 0,0034 | NBP_266 | 0,0265 |
| Propano | 0,0200 | NBP_280 | 0,0253 |
| i-butano | 0,0106 | NBP_294 | 0,0242 |
| n-butano | 0,0305 | NBP_208 | 0,0226 |
| i-pentano | 0,0203 | NBP_322 | 0,0215 |
| n-pentano | 0,0254 | NBP_336 | 0,0210 |
| NBP_45 | 0,0105 | NBP_350 | 0,0190 |
| NBP_57 | 0,0369 | NBP_364 | 0,0167 |
| NBP_71 | 0,0366 | NBP_378 | 0,0138 |
| NBP_85 | 0,0519 | NBP_392 | 0,0115 |
| NBP_98 | 0,0376 | NBP_406 | 0,0102 |
| NBP_114 | 0,0311 | NBP_420 | 0,0093 |
| NBP_127 | 0,0430 | NBP_441 | 0,0168 |
| NBP_141 | 0,0415 | NBP_469 | 0,0160 |
| NBP_155 | 0,0404 | NBP_497 | 0,0135 |
| NBP_169 | 0,0395 | NBP_523 | 0,0139 |
| NBP_183 | 0,0380 | NBP_552 | 0,0117 |
| NBP_197 | 0,0360 | NBP_577 | 0,0116 |
| NBP_211 | 0,0341 | NBP_606 | 0,0056 |
| NBP_225 | 0,0322 | NBP_634 | 0,0037 |
| NBP_238 | 0,0300 | NBP_677 | 0,0047 |
| NBP_252 | 0,0281 | NBP_745 | 0,0034 |

3.2) TORRE PRÉ-FLASH

A Torre Pré-Flash é responsável pelo fracionamento inicial do petróleo. Para as simulações em estudo, será considerado um flash isotérmico. Desta forma, as condições da corrente de alimentação do Pré-Flash (Petróleo) serão as mesmas das correntes de saída (Líquido_Flash e Vapor_Flash). Conforme mencionado anteriormente, há duas correntes de saída: Líquida (produto de fundo) e Vapor (produto de topo). A corrente de vapor é composta, basicamente, de nafta instável, já que o flash possibilitou a retirada de parte dos componentes mais leves do petróleo. A quantidade a ser vaporizada na Torre Pré-Flash depende da temperatura e da pressão de operação, ou seja, da temperatura e pressão de alimentação do petróleo, considerando esta coluna como um flash isotérmico. Espera-se que um aumento na temperatura e/ou redução na pressão resulte em um aumento na quantidade vaporizada.

3.2.1) AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA

Inicialmente, a temperatura de alimentação do flash será estudada, avaliando seu efeito no processo. Desta forma, as simulações foram realizadas para cinco diferentes temperaturas de alimentação do Pré-Flash (135°C, 140°C, 145°C, 150°C e 155°C) a uma pressão de 3 atm e vazão de 1000 m³/h (8,450.10⁵ kg/h) constantes. Os resultados destas simulações possibilitam conhecer o comportamento da vaporização dos componentes do petróleo em função da temperatura. Além da quantidade vaporizada, será possível observar quais porções do petróleo serão vaporizadas ou quais permanecerão na corrente líquida (mais leves e pesadas) por meio da temperatura de ensaio de destilação da corrente de vapor.

A Tabela 3.5 apresenta os resultados obtidos nas simulações para verificar o efeito da temperatura no flash e da quantidade vaporizada de petróleo.

Tabela 3.5: Principais resultados obtidos - Temperatura de operação da Torre Pré-Flash.

| | Temperatura de operação da Torre Pré-Flash (°C) | | | | |
|----------------------------------|--|------------|------------|------------|------------|
| Corrente | 135 | 140 | 145 | 150 | 155 |
| Vapor (m³/h) | 26,55 | 34,43 | 43,07 | 52,45 | 62,52 |
| Líquido (m³/h) | 973,45 | 965,57 | 956,93 | 947,55 | 937,48 |
| ASTM D86 | Temperatura (°C) - corrente de vapor | | | | |
| 95% vaporizado em volume | 132,4 | 137,9 | 143,4 | 148,9 | 154,6 |
| 100% vaporizado em volume | 168,4 | 174,2 | 179,8 | 185,4 | 190,7 |

Os principais resultados apresentam as vazões volumétricas das correntes líquidas e vapor e a caracterização da corrente de vapor (nafta instável) em termos de temperatura de ensaio de destilação ASTM D86 em que 95% e 100% (PFE – ponto final de ebulição) do volume é vaporizado. Observa-se de acordo com a Tabela 3.5 que, com o aumento da temperatura, uma maior quantidade é vaporizada conforme esperado, ou seja, ocorre um aumento da vazão de vapor. Além disso, pode-se ver que mais componentes pesados da fração de nafta foram volatilizados, já que a temperatura de destilação ASTM D86 aumentou (PFE e 95% do volume vaporizado). Quanto maior o PFE de uma fração (ou a temperatura em que 95% do volume é vaporizado), maior é a quantidade de componentes pesados que está presente nesta fração. Isso ocorre porque são necessárias maiores temperaturas para se volatilizar um determinado volume contendo componentes mais pesados. Desta forma, conclui-se que um aumento da temperatura de alimentação do Pré-Flash provocou não somente uma maior vaporização do petróleo (maior vazão de vapor), mas também a incorporação de componentes mais pesados da nafta na corrente de vapor. Com estes resultados, tem-se conhecimento de como a temperatura de alimentação do flash afeta a vaporização do petróleo e, conseqüentemente, a carga da Coluna Estabilizadora e Atmosférica.

A corrente de alimentação da Coluna Estabilizadora é a corrente de vapor da Torre Pré-Flash. Desta forma, os rendimentos de nafta estabilizada e GLP estão diretamente ligados à quantidade vaporizada da Torre Pré-Flash. Através dos resultados acima, pode-se verificar que a produção desejada de ambos os produtos (nafta estabilizada e GLP)

dependerá da quantidade vaporizada na Torre Pré-Flash. Esta quantidade vaporizada dependerá do próprio petróleo e das condições de alimentação do flash.

3.2.2) AVALIAÇÃO DA PRESSÃO

O efeito da pressão na Torre Pré-Flash sobre a vaporização inicial do petróleo foi estudado. A temperatura da corrente de alimentação (Petróleo) foi mantida constante em 145°C. Espera-se que um aumento da pressão de operação do Pré-Flash dificulte a vaporização do petróleo, ou seja, uma menor vazão de vapor será obtida.

A Tabela 3.6 apresenta os resultados do efeito da pressão na Torre Pré-Flash.

Tabela 3.6: Principais resultados obtidos - Pressão de operação da Torre Pré-Flash.

| | Pressão de operação da Torre Pré-Flash (atm) | | | |
|----------------------------------|---|------------|----------|------------|
| Corrente | 2 | 2,5 | 3 | 3,5 |
| Vapor (m³/h) | 88,56 | 62,82 | 43,07 | 27,6 |
| Líquido (m³/h) | 911,4 | 937,2 | 956,9 | 972,4 |
| ASTM D86 | Temperatura (°C) - Corrente de vapor | | | |
| 95% vaporizado em volume | 158,2 | 149,7 | 143,4 | 138,3 |
| 100% vaporizado em volume | 193,5 | 185,8 | 179,8 | 174,7 |

Com o aumento da pressão, a nafta instável (corrente de vapor) tornou-se mais “leve” devido à diminuição da temperatura de ensaio de destilação ASTM D86 na qual 95% e 100% em volume são vaporizados, de acordo com os resultados da Tabela 3.6. Quanto menor for o valor da temperatura ASTM D86 na qual 95% e 100% em volume são vaporizados, mais componentes leves devem estar presentes na fração. Isso ocorre porque para se volatilizar componentes mais leves, a temperatura de ensaio de destilação necessária deve ser menor se comparada a componentes mais pesados. Não somente a temperatura ASTM D86 diminuiu, mas a vazão vaporizada na Torre Pré-Flash.

3.3) COLUNA ATMOSFÉRICA

A Coluna Atmosférica é uma das principais colunas de destilação da Unidade de Destilação de uma refinaria. Esta é responsável pelo fracionamento do petróleo para a obtenção dos principais produtos. Para o estudo desta coluna, foi realizada uma avaliação das variáveis do sistema em relação aos seus efeitos e influências. Estas avaliações permitem de uma forma geral avaliar o comportamento e flexibilidade das variáveis afetadas devido às influências das variáveis estudadas. As simulações foram feitas em estado estacionário, mantendo-se uma série de especificações constantes e fixas, enquanto que somente uma variável de estudo foi alterada de cada vez. Desta forma, através das simulações realizadas, foram observadas algumas das principais variáveis afetadas pelas modificações da variável em estudo. Foram avaliadas as seguintes variáveis: Temperatura da corrente de alimentação, Refluxo circulante, Vapor de água da Coluna de *Stripping*, Rendimentos das frações e Número de Estágios (Coluna Atmosférica e Colunas de *Stripping*).

3.3.1) ESTABELECIMENTO DE UM CASO BASE: CONSIDERAÇÕES ADOTADAS

Para a avaliação dos principais efeitos causados pelas variáveis mais relevantes da Coluna Atmosférica, será estabelecido um caso base de estudo. Desta forma, as simulações serão feitas em estado estacionário, alterando-se apenas uma variável, enquanto que as demais que foram especificadas serão mantidas constantes.

A Torre Pré-Flash do processo é operado a uma temperatura e pressão de operação de 145° C e 3 atm. Nestas condições, a corrente Líquida do Pré-Flash tem uma vazão de $8,171 \cdot 10^5$ kg/h (equivalente a 956,9 m³/h) de acordo com resultados da Tabela 3.5. Esta corrente é aquecida pela rede de trocadores e forno e alimenta a Coluna Atmosférica especificada de acordo com a Tabela 3.1. Assim, a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica é operada nesta vazão e especificada a uma temperatura de 345°C e uma pressão de 1,8 atm. Em todas as simulações realizadas para a Coluna Atmosférica, a composição e a vazão são mantidas constantes, ou seja, o Pré-Flash é operado em condições fixas e constantes. Além disso, as especificações de projeto da Tabela 3.1 não

são alteradas. A coluna é operada de modo que todo o vapor do topo seja condensado. Na Tabela 3.7, estão presentes todas as principais especificações para a Coluna Atmosférica.

Tabela 3.7: Apresentação das principais especificações do caso base para a Coluna Atmosférica.

| Condições da corrente de alimentação | |
|--|-----------------------------------|
| Temperatura | 345°C |
| Pressão | 1,8 atm |
| Vazão | 956,9 m ³ /h |
| Queda de pressão na coluna (do condensador ao último estágio) | 1-1,7atm |
| Vazão de Vapor de água (200°C e 3 atm) | |
| <i>Stripping</i> de querosene (VQ) | 4690 kg/h |
| <i>Stripping</i> de diesel (VD) | 4630 kg/h |
| <i>Stripping</i> de gasóleo (VGO) | 3200 kg/h |
| Principal (VP) | 8000 kg/h |
| Refluxo Circulante | |
| Carga térmica do 1° e 2° Refluxo Circulante | 19,44 MW (7.10 ⁷ kJ/h) |
| Carga térmica do 3° Refluxo Circulante | 16,67 MW (6.10 ⁷ kJ/h) |
| Vazão do 1° e 2° Refluxo Circulante | 400 m ³ /h |
| Vazão do 3° Refluxo Circulante | 200 m ³ /h |
| Rendimentos das frações retiradas | |
| Nafta | 275 m ³ /h |
| Querosene | 162 m ³ /h |
| Diesel | 165 m ³ /h |
| Gasóleo | 61,5 m ³ /h |

Os principais resultados da simulação do Caso Base para a Coluna Atmosférica foram apresentados nas Figuras 3.3 a 3.5. Nesta simulação, todas as considerações adotadas acima e as especificações da Tabela 3.7 foram mantidas constantes. As Figuras 3.3 e 3.4

apresentam os perfis de Vazão de Líquido e Vapor e de Temperatura na Coluna Atmosférica em função dos estágios obtidos na simulação do Caso Base, respectivamente. Além disso, a Figura 3.5 apresenta a temperatura do ensaio de destilação (ASTM D86) em função da porcentagem em volume vaporizado, para as frações de querosene, diesel e gasóleo obtidas na simulação do Caso Base.

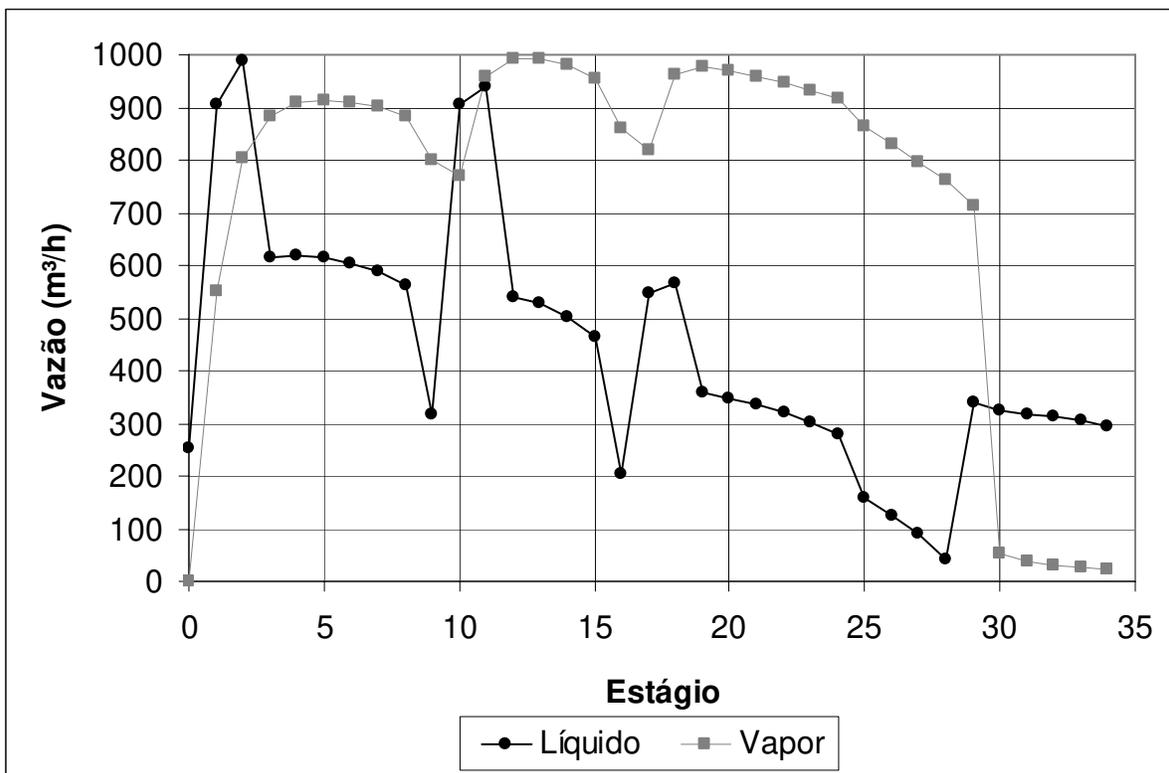


Figura 3.3: Perfis de Vazão de Líquido e Vapor na Coluna Atmosférica em função do número de estágios para o Caso Base.

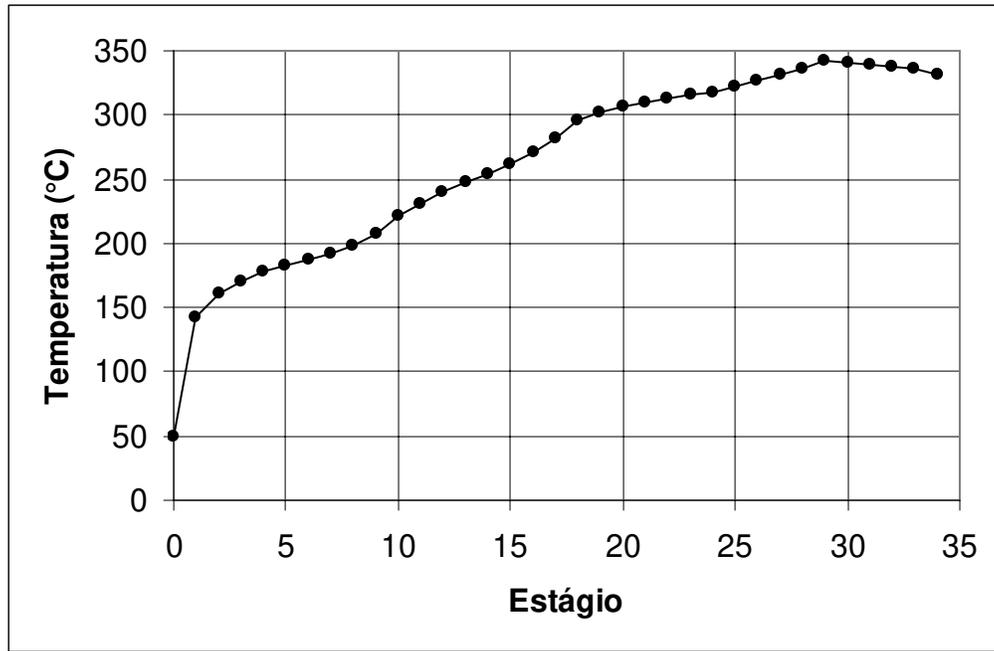


Figura 3.4: Perfil de Temperatura em função do número de estágios da Coluna Atmosférica para o Caso Base.

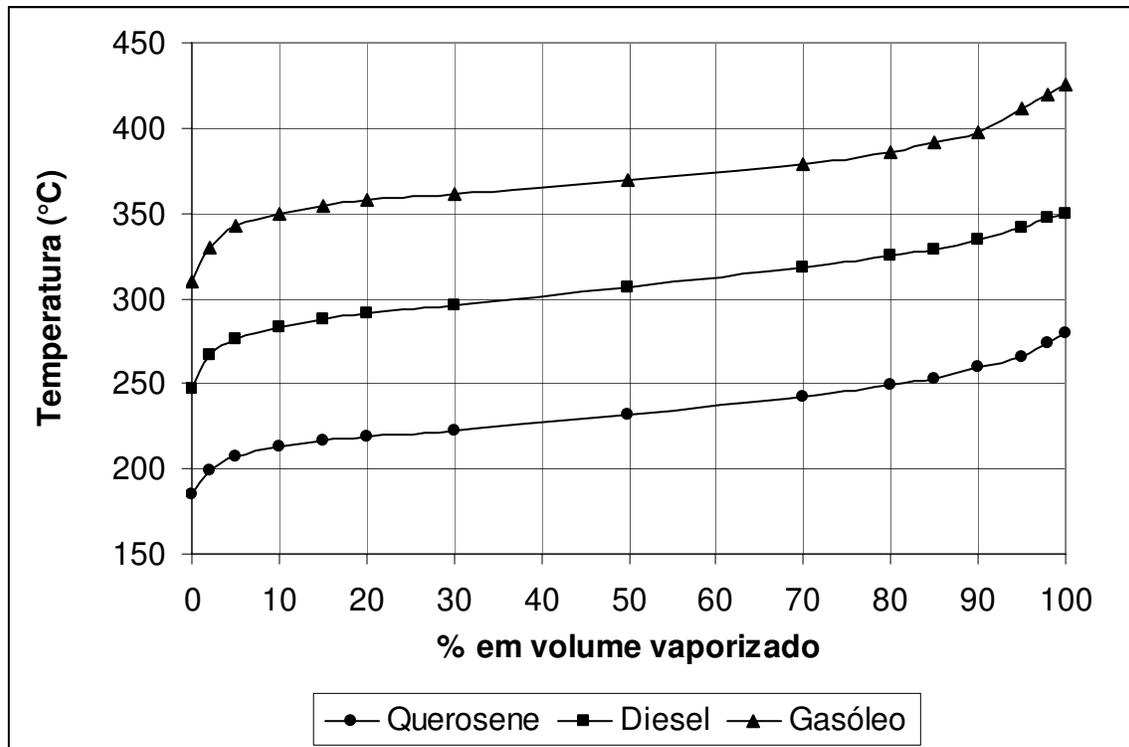


Figura 3.5: Temperatura em função da porcentagem em volume vaporizado para os ensaios de destilação (ASTM D86) das frações obtidas de querosene, diesel e gasóleo.

A Tabela 3.8 apresenta os principais resultados: os PFE dos produtos obtidos e a vazão de resíduo atmosférico na simulação do caso base em estudo. Neste caso, o PFE de querosene, diesel e gasóleo foram obtidos por meio dos resultados da Figura 3.5.

Tabela 3.8: Principais resultados obtidos da simulação do caso base.

| | |
|---------------------|---------------------------------|
| Produtos | |
| Nafta | PFE (ASTM D86) = 190°C |
| Querosene | PFE (ASTM D86) = 280°C |
| Diesel | PFE (ASTM D86) = 350°C |
| Gasóleo | PFE (ASTM D86) = 425°C |
| Resíduo Atmosférico | Vazão = 293,6 m ³ /h |

3.3.2) AVALIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CORRENTE DE ALIMENTAÇÃO

Neste caso, as simulações serão realizadas, mantendo todas as especificações constantes do caso base de estudo estabelecido anteriormente, exceto a temperatura da corrente de alimentação. Cada temperatura de alimentação representa uma simulação realizada, incluindo o caso base, com todas as especificações mantidas constantes. Conseqüentemente, o efeito será verificado na mudança das principais variáveis afetadas. Desta forma, pode-se ter um enfoque na análise do efeito que a temperatura provoca na separação dos componentes presentes ao longo da coluna e das retiradas laterais.

As Figuras 3.6 a 3.9 apresentam os principais resultados obtidos nesta avaliação da temperatura de alimentação da Coluna Atmosférica. Neste caso, as principais variáveis afetadas estão representadas em função da temperatura de alimentação nestas figuras.

O Resíduo é caracterizado através da curva de destilação TBP (PEV). Por isso, as variáveis estudadas referentes ao resíduo são obtidas da curva de destilação TBP. Desta forma, a Figura 3.6 apresenta o gráfico de temperatura TPB (PIE, vol 5%, vol 10% vaporizados) para o resíduo em função da temperatura da corrente de alimentação. Nesta Figura 3.6, ocorreu o aumento da temperatura TBP (PIE, vol. 5% e vol. 10%) do resíduo em função da temperatura de alimentação.

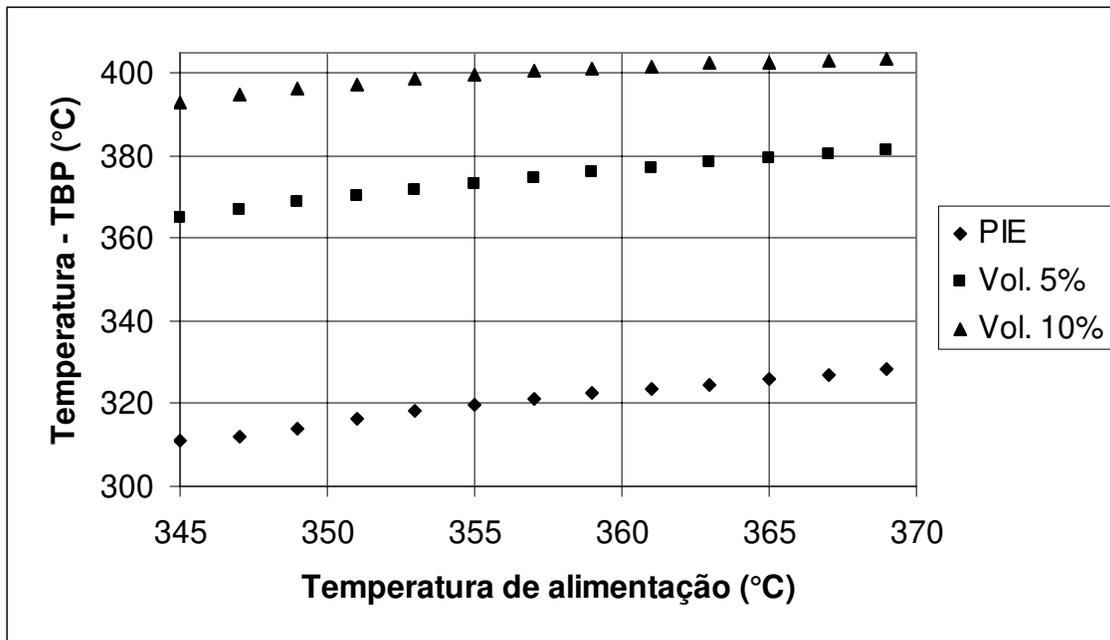


Figura 3.6: Efeito da temperatura de alimentação na temperatura TBP (PEV) do resíduo.

Na Figura 3.7, pode-se observar uma redução do PFE do gasóleo ASTM D86 (PFE) em função da temperatura da corrente de alimentação.

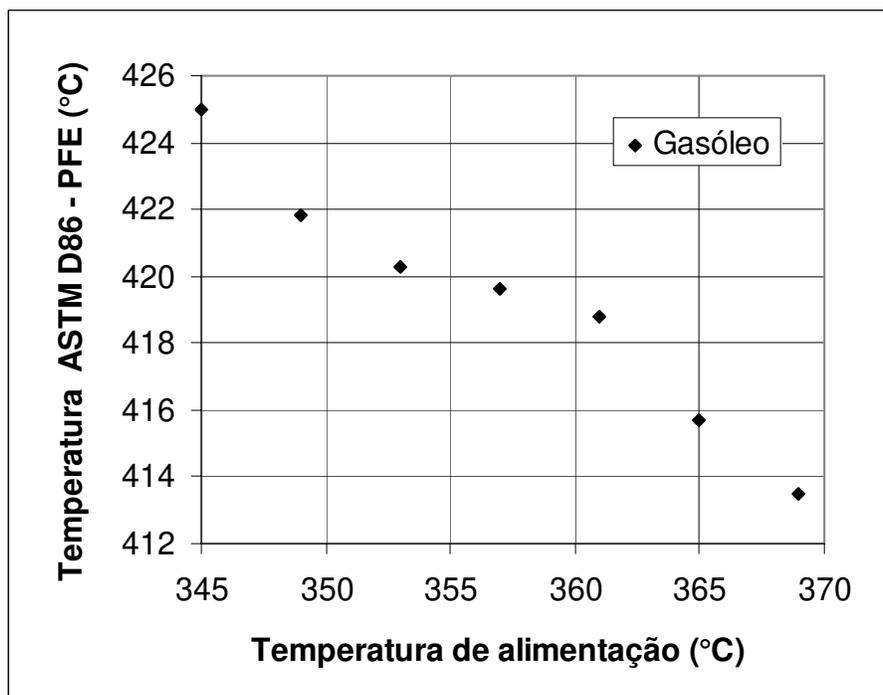


Figura 3.7: Efeito da temperatura de alimentação no PFE (ASTM D86) do gasóleo.

Com o aumento da temperatura de alimentação, ocorre uma maior vaporização dos componentes da alimentação na zona de expansão da Coluna Atmosférica. Por isto, os componentes mais leves que estavam na corrente de resíduo foram vaporizados em função do aumento da temperatura de alimentação.

Se o PIE e a temperatura da curva de destilação TBP (PEV) na qual 5% e 10% do volume são vaporizados aumentam, isso significa que os primeiros componentes que são vaporizados no ensaio de destilação PEV tornaram-se mais pesados. Devido a uma maior remoção dos componentes mais leves do resíduo com o aumento de temperatura de alimentação, os primeiros componentes que são vaporizados no ensaio de destilação PEV tornaram-se mais pesados. Assim, isto provocou o aumento do PIE e a temperatura TBP na qual 5% e 10% do volume são vaporizados conforme o aumento de temperatura de alimentação, de acordo com a Figura 3.6.

Com o aumento da temperatura de alimentação, o principal efeito na Coluna Atmosférica foi apresentado na Figura 3.7. Analisando-se esta figura, observa-se que ocorreu uma redução do PFE (Ponto Final de Ebulição) ASTM D86 em função da temperatura de alimentação para o gasóleo.

Uma maior temperatura permite um maior fluxo de vapor na zona de expansão. O aumento da temperatura de alimentação permitiu que uma maior quantidade de componentes mais leves do gasóleo, originários da alimentação, fosse vaporizada. Este fato permitiu a redução do PFE do gasóleo (ASTM D86) em função do aumento de temperatura, já que gasóleo com uma maior quantidade de componentes mais leves faz com que seja necessária uma menor temperatura para volatilizá-lo totalmente em um ensaio de destilação ASTM D86.

De acordo com os resultados obtidos, diesel, querosene e nafta não foram afetados significativamente da mesma forma que Gasóleo e Resíduo Atmosférico.

Analisando-se a Figura 3.8, pode-se observar que a carga térmica do condensador sofreu um aumento em função do acréscimo da temperatura da corrente de alimentação. Um aumento do sobrevaporizado implica em um aumento do fluxo de vapor ao longo da coluna, já que as retiradas mantiveram-se constantes. Deste modo, o fluxo de vapor no topo da coluna aumentou. Isso significa que o fluxo de vapor a ser condensado aumentou e, conseqüentemente, a carga térmica do condensador.

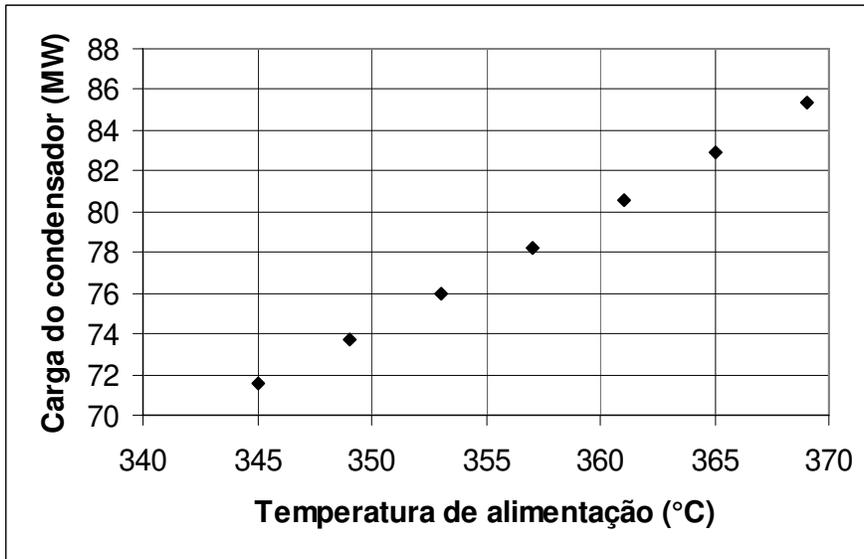


Figura 3.8: Efeito da temperatura de alimentação na carga térmica do condensador.

A Figura 3.9 apresenta o aumento da porcentagem de sobrevaporizado em função da temperatura da corrente de alimentação. Desta forma, confirma-se o aumento do sobrevaporizado devido ao aumento da temperatura da corrente de alimentação.

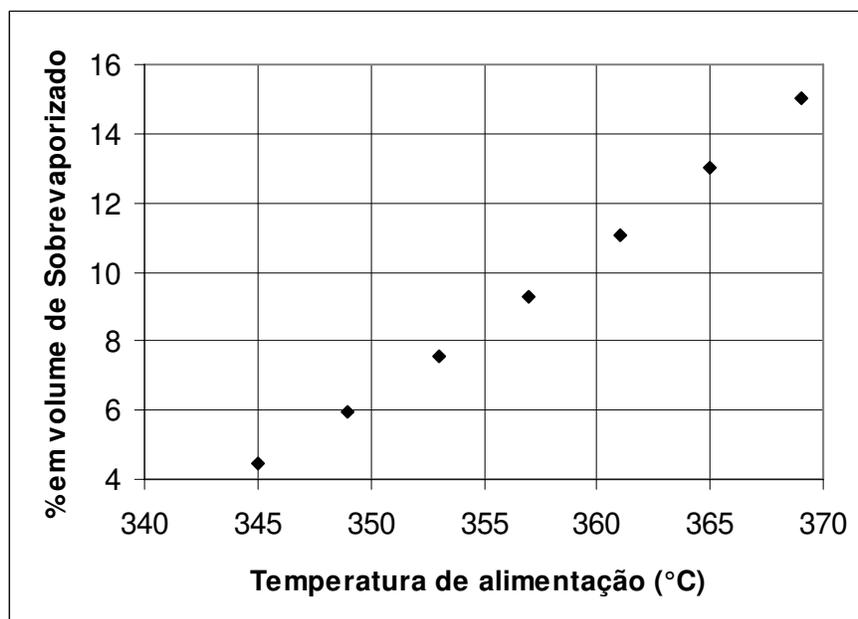


Figura 3.9: Efeito da temperatura de alimentação na porcentagem em volume de sobrevaporizado.

Através dos resultados obtidos com as simulações na Tabela 3.9, pode-se observar o aumento da razão de refluxo em função do aumento da temperatura de alimentação da coluna atmosférica. Conforme mencionado anteriormente, ocorreu um aumento na porcentagem de sobrevaporizado. Como as vazões de retirada de produtos mantiveram-se as mesmas e a porcentagem de sobrevaporizado aumentou, a vazão de refluxo sofreu um aumento. O consumo energético da Tabela 3.9 refere-se ao consumo total para aquecer a corrente líquida que sai do fundo do Pré-Flash (135°C) até a temperatura de alimentação da Coluna Atmosférica.

Tabela 3.9: Razão de Refluxo e Consumo energético em função da temperatura de alimentação da Coluna Atmosférica.

| Temperatura de alimentação (°C) | Razão de Refluxo | Consumo energético (MW) |
|---------------------------------|------------------|-------------------------|
| 345 | 0,93 | 155,4 |
| 347 | 0,96 | 156,9 |
| 349 | 1,00 | 158,5 |
| 351 | 1,04 | 160,1 |
| 353 | 1,07 | 161,6 |
| 355 | 1,11 | 163,2 |
| 357 | 1,15 | 164,7 |
| 359 | 1,19 | 166,3 |
| 361 | 1,23 | 167,8 |
| 363 | 1,26 | 169,4 |
| 365 | 1,30 | 170,9 |
| 367 | 1,34 | 172,5 |
| 369 | 1,38 | 174,1 |

3.3.3) AVALIAÇÃO DO VAPOR PRINCIPAL

A corrente de vapor de água que alimenta o fundo da Coluna Atmosférica é a corrente de vapor principal (corrente CVP da Figura 3.1) desta coluna. O efeito do vapor principal foi verificado por meio das simulações mantendo-se todas as especificações do caso base, exceto a vazão de vapor principal (VP). As condições da corrente de alimentação e variáveis operacionais da coluna foram mantidas constantes de acordo com o caso base. Neste caso, as simulações apresentam os resultados para diversas vazões de vapor principal, incluindo o caso base.

As Figuras 3.10 a 3.15 mostram o comportamento das principais variáveis afetadas pela variação de vazão de Vapor Principal.

A Figura 3.10 apresenta o efeito da vazão de vapor principal sobre o PIE e a Temperatura TBP (vol. 5% e vol.10%) para o Resíduo. As Figuras 3.11 e 3.12 mostram a variação da Temperatura ASTM D86 (vol. 95% e vol.100%) para o Gasóleo e Diesel em função da vazão de Vapor Principal, respectivamente. Além disso, as Figuras 3.13 a 3.15 mostram o efeito do Gap 5-95, porcentagem de sobre vaporizado e carga térmica do condensador em função da vazão de Vapor Principal, respectivamente.

Observando-se a Figura 3.10, é possível ver que o PIE e a temperatura TBP (vol. 5% e 10%) do resíduo aumentam conforme o aumento da vazão de vapor principal. Isto significa que o vapor permitiu que mais componentes leves do resíduo fossem vaporizados, alterando e aumentando o PIE e a temperatura TBP (vol. 5% e vol. 10%). Esse aumento do PIE e temperatura TBP (vol. 5% e vol. 10%) indicam que os componentes mais leves do resíduo foram reduzidos e agora, componentes menos leves que estes passaram a estar presentes em maior quantidade. Este comportamento observado foi o mesmo da Figura 3.6.

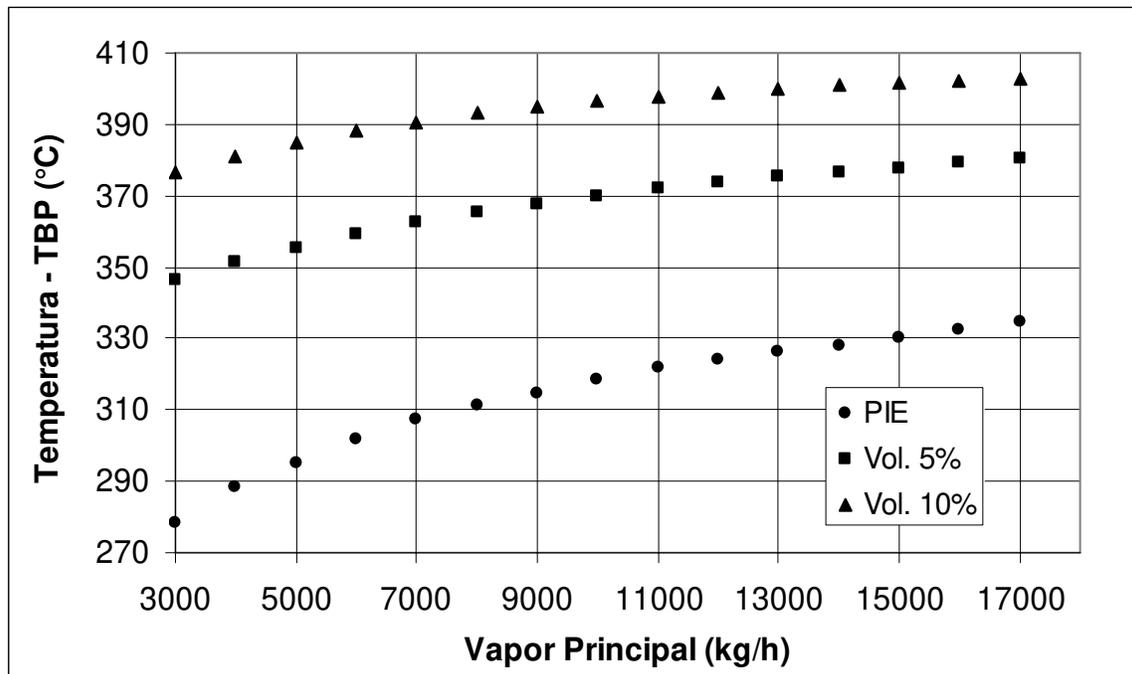


Figura 3.10: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o PIE (TBP) e a temperatura TBP na qual 5% e 10% do volume é vaporizado para o resíduo.

No caso do Gasóleo e Diesel (Figuras 3.11 e 3.12), a Temperatura ASTM D86 (vol. 95% e vol. 100%) diminuiu ao se aumentar a vazão de vapor. Isso significa que os componentes mais pesados destas frações não estão mais presentes nas correntes e os componentes menos pesados que estes passaram a ter uma presença maior.

Uma maior vazão de vapor principal permite uma maior vaporização dos componentes do gasóleo presentes na corrente de resíduo. Componentes mais pesados da corrente de gasóleo que antes eram retirados na própria corrente, passaram a ser incorporados e retirados na corrente de Resíduo. Isso ocorreu porque os componentes menos pesados que estes do gasóleo foram vaporizados mais, devido ao aumento de vapor e passaram a incorporar, neste momento, a corrente de Gasóleo, conforme resultados obtidos nas Figuras 3.10 e 3.11.

Os componentes menos pesados do Diesel que estavam presentes em menores quantidades na corrente de Resíduo e Gasóleo passaram a se incorporar em maior quantidade na corrente de Diesel. Isto ocorreu devido a uma maior vaporização provocada pelo aumento da vazão de vapor. Devido ao efeito apresentado nas Figuras 3.10 e 3.11,

componentes menos pesados do diesel que antes do aumento da vazão de vapor principal estavam na corrente de Gasóleo e de Resíduo passaram, provavelmente, para a corrente de Diesel, fazendo com que o PFE e a temperatura ASTM D86 (volume 95% vaporizado) reduzissem. Essa redistribuição geral de componentes menos pesados nas duas principais frações mais afetadas e no resíduo implicou em mudanças na temperatura ASTM D86, para Resíduo, Gasóleo e Diesel nas Figuras 3.10, 3.11 e 3.12, respectivamente.

Comparando-se o PFE de Gasóleo (ASTM D86) da Figura 3.11 com o apresentado na Figura 3.7, o comportamento foi o mesmo: a diminuição do PFE (ASTM D86) com o aumento da variável modificada (temperatura na Figura 3.7 e vazão de vapor na Figura 3.11). Desta forma, o efeito do vapor principal e da temperatura de alimentação foi o mesmo para o Gasóleo; entretanto, este efeito foi maior no caso do vapor principal de acordo com a Figura 3.11.

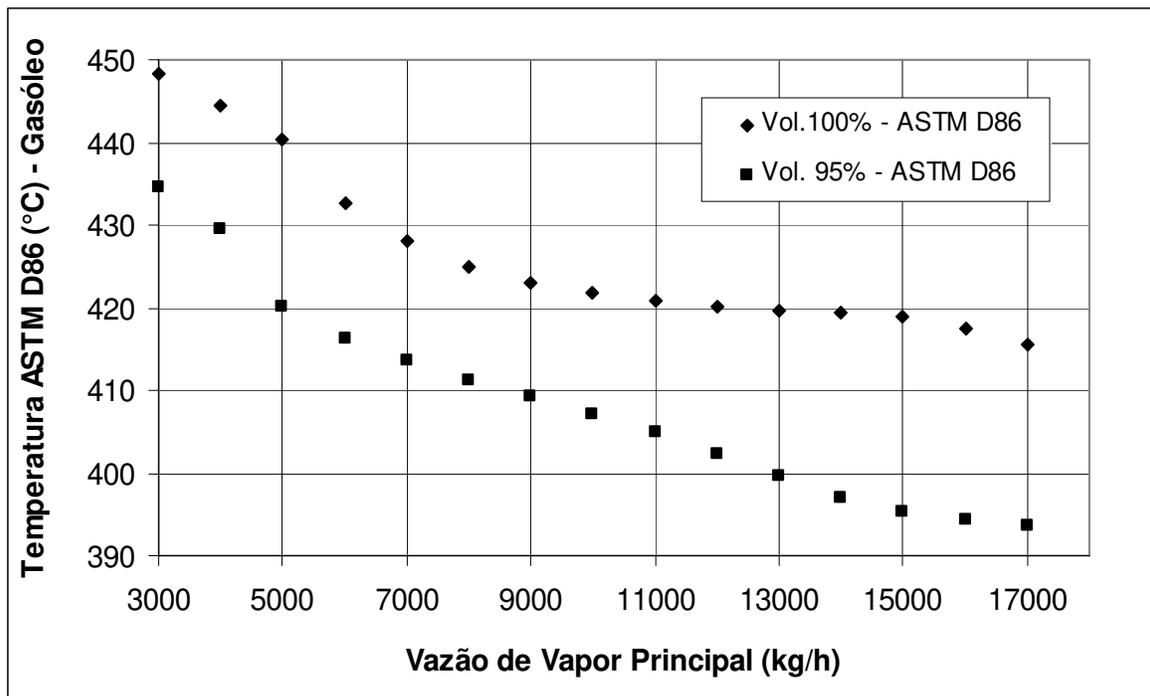


Figura 3.11: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o PFE (ASTM D86) e a temperatura ASTM D86 na qual 95% do volume é vaporizado para o Gasóleo.

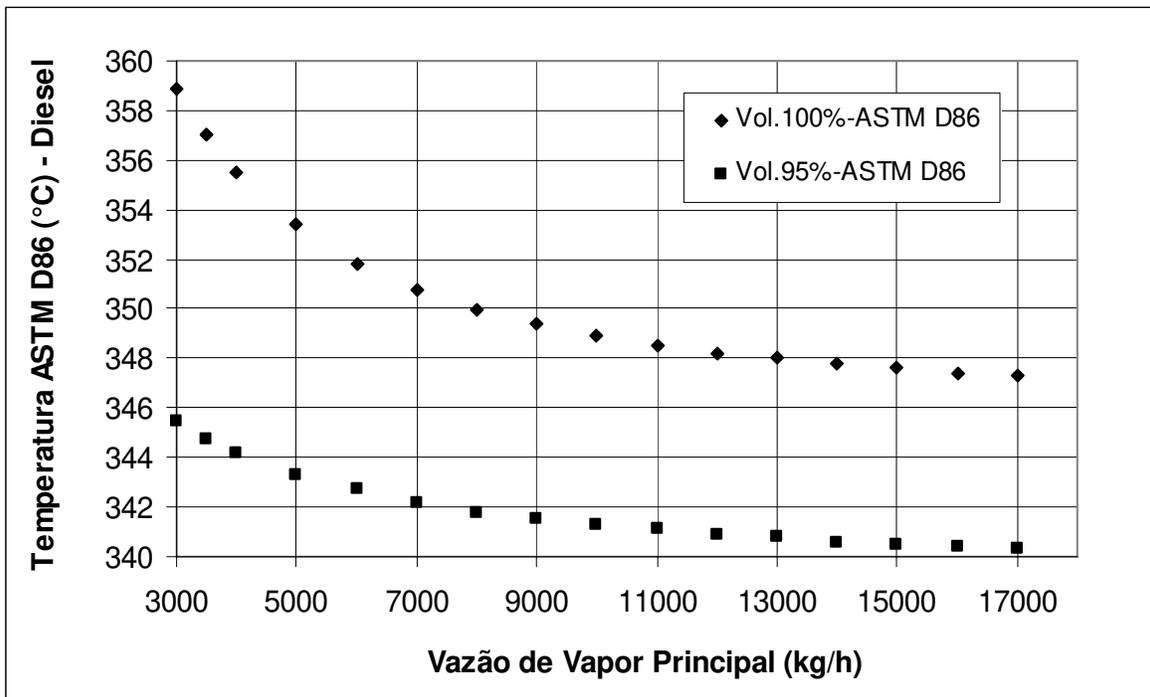


Figura 3.12: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o PFE (ASTM D86) e a temperatura ASTM D86 na qual 95% do volume é vaporizado para o Diesel.

Pelos resultados obtidos na Figura 3.13, observa-se a diminuição do Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) em função do aumento de vapor principal. Este comportamento indica que o grau de fracionamento entre Gasóleo e Diesel diminuiu.

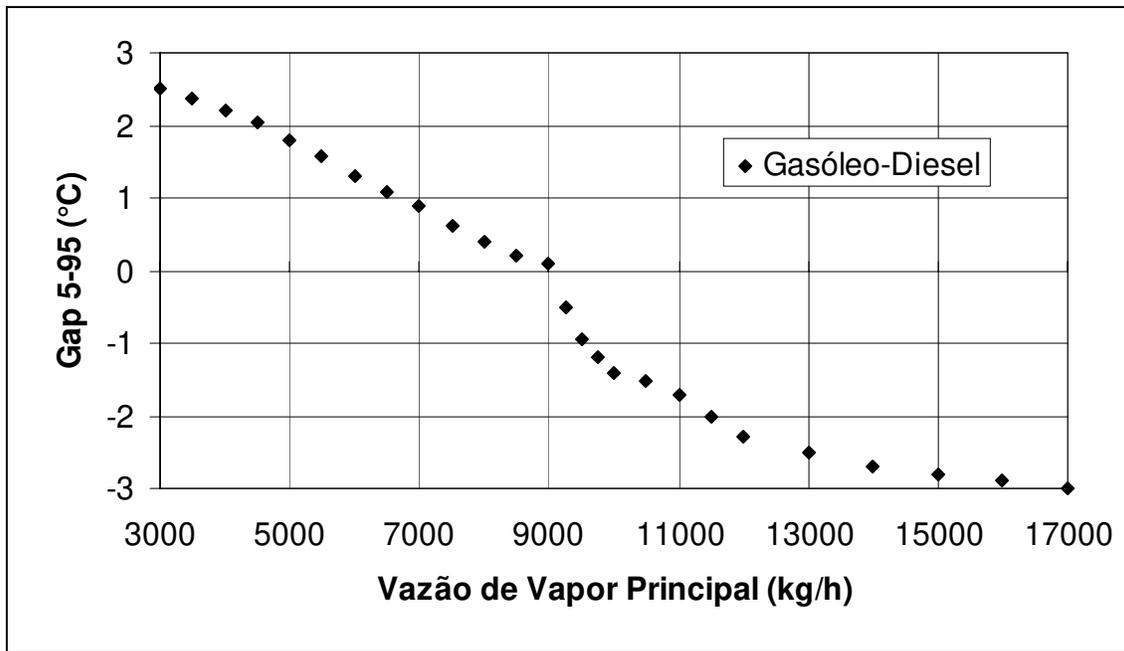


Figura 3.13: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Gasóleo-Diesel.

A Figura 3.14 apresenta o comportamento da porcentagem de sobrevaporizado em função da vazão de vapor. Assim, pode-se observar o aumento do sobrevaporizado em função do aumento da vazão de vapor principal. Esse comportamento era esperado já que o vapor principal da Coluna Atmosférica é responsável pela vaporização dos componentes mais leves presentes no Resíduo. Assim, uma maior vazão de vapor principal permite uma maior vaporização destes componentes. Isto é evidenciado pelo resultado obtido na Figura 3.10 e analisado anteriormente.

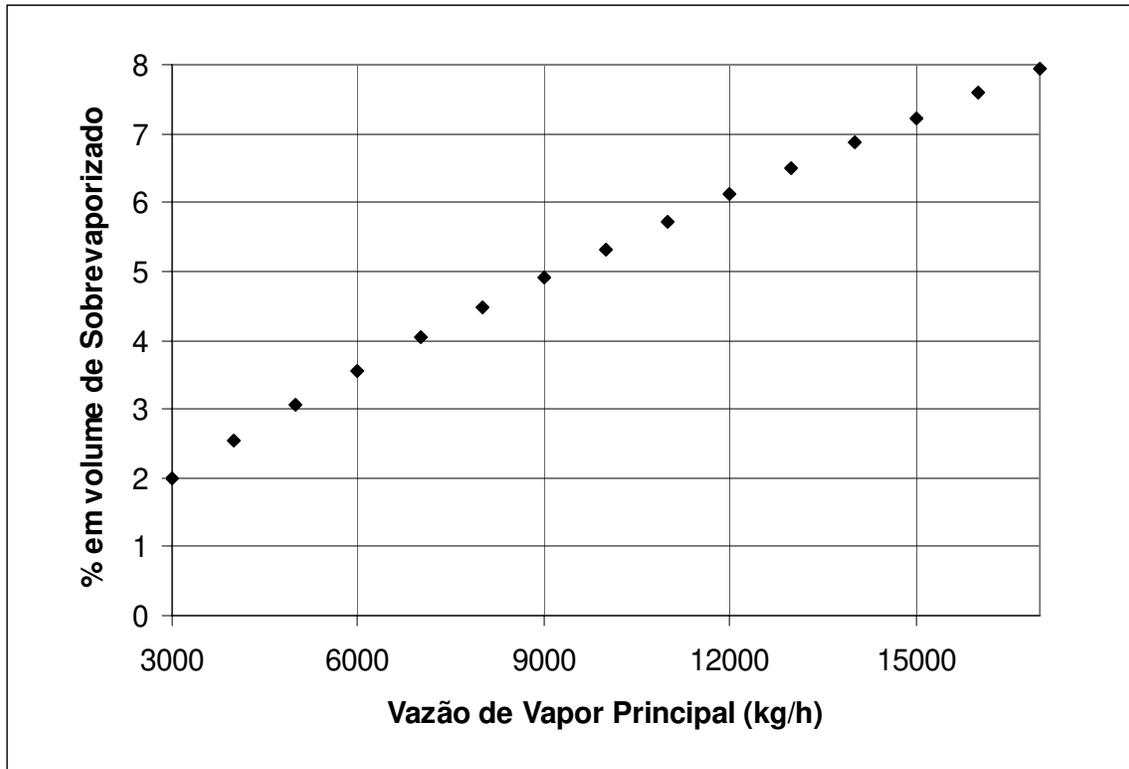


Figura 3.14: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre a porcentagem de sobrevaporizado.

É possível observar o aumento da carga térmica do condensador em função do aumento da vazão de vapor principal, de acordo com a Figura 3.15. Esse resultado era esperado porque quanto maior a vazão de vapor, maior é a carga (vazão) de vapor de topo a ser condensada, já que todo o vapor de água condensado é retirado do condensador.

Esta avaliação do efeito do vapor principal nas variáveis estudadas mostra as principais mudanças geradas na Coluna Atmosférica. Indiretamente, pelos resultados obtidos, um aumento de vapor principal pode afetar os produtos retirados. Isso indica que há possibilidade de modificar a vazão para alterar as especificações desejadas de produtos de maneira conveniente. Entretanto, um aumento do vapor significa um aumento na carga térmica do condensador conforme mencionado anteriormente. Isso tem como consequência uma elevação tanto do custo do consumo de vapor utilizado como do condensador. Este fato deve ser levado em conta se otimizações e cortes em custos operacionais são desejados.

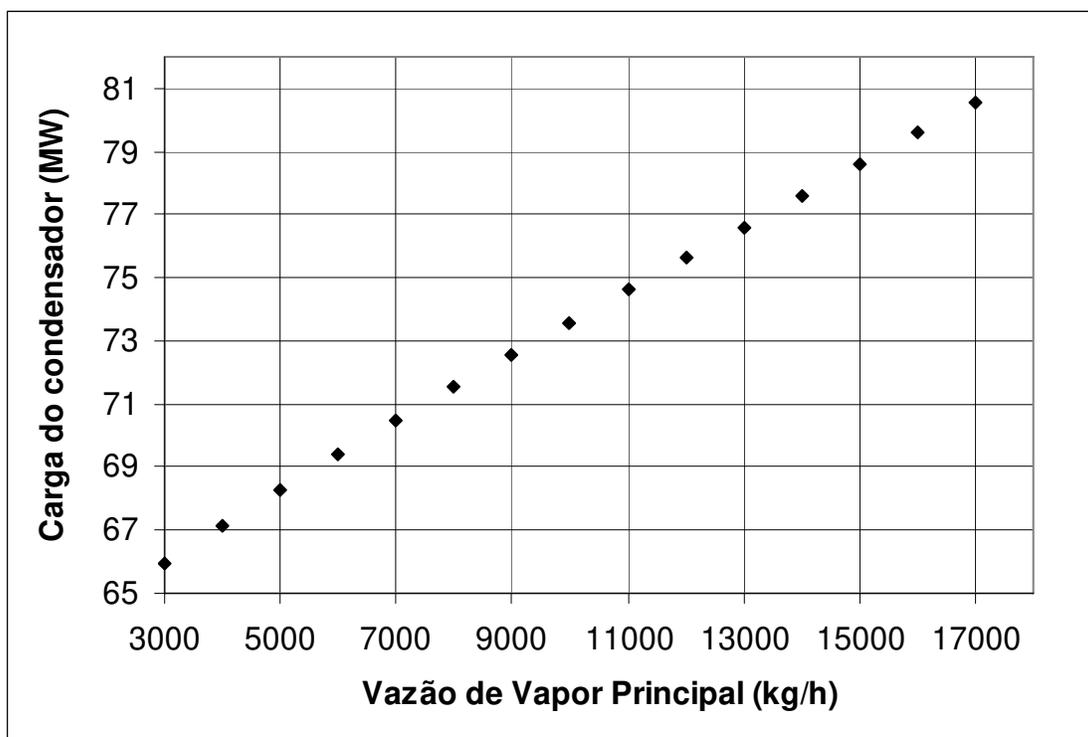


Figura 3.15: Efeito da vazão de vapor principal (kg/h) sobre a carga térmica do Condensador (MW).

O trabalho de Bagajewicz (1996) apresentou o efeito do vapor principal para coluna atmosférica com determinadas especificações de projeto, operação e de produtos (temperatura ASTM D86 para querosene, diesel e gasóleo). Sob estas especificações, o autor avaliou de forma diferente o efeito sobre outras variáveis (rendimentos de gasóleo e diesel, distribuição dos pseudocomponentes do gasóleo em função da vazão de vapor principal, entre outros), destacando importância deste sobre a carga do forno. Neste trabalho, a carga térmica do forno foi mantida constante.

Neste caso, o comportamento da carga térmica do condensador neste trabalho e no de Bagajewicz (1998) foi o mesmo, ou seja, ocorreu o aumento nestes dois trabalhos. Entretanto, não foi apresentado por Bagajewicz o grau de fracionamento entre as frações, principalmente, entre gasóleo (produto que mais sofreu modificação) e diesel. Neste trabalho procurou-se avaliar os produtos e outras importantes variáveis da coluna atmosférica para diferentes especificações, mas principalmente em termos da modificação

da temperatura de ensaio de destilação (ASTM D86) dos componentes nas correntes de retirada cujas vazões foram mantidas constantes.

3.3.4) AVALIAÇÃO DO VAPOR DA COLUNA DE *STRIPPING*

Para verificar o efeito do vapor de água injetado no fundo da coluna de *stripping*, as mesmas especificações para o caso do vapor principal (caso base) foram mantidas, entretanto a variável que sofre modificações é a vazão de vapor da coluna de *stripping*. Neste caso, a vazão de vapor principal foi fixada em 8000 kg/h, conforme Tabela 3.7. Foram avaliadas as vazões de vapor de água de cada coluna de *stripping* (1, 2 e 3 – Figura 3.2) separadamente numa determinada faixa, incluindo os valores de vazões do caso base. Para as simulações, as vazões de vapor (kg/h) de água das colunas de *stripping* 1, 2 e 3 foram denominadas como VQ, VD e VGO, respectivamente. As principais variáveis afetadas e estudadas neste caso são: Temperatura ASTM D86, Gap 5-95, Carga térmica do condensador e Porcentagem em volume removido das correntes laterais de produtos.

Segundo Nelson (1969), o ponto inicial de ebulição (PIE) dos produtos retirados nas correntes laterais deve ser modificado por vapor de água na coluna de *stripping*. Um dos principais resultados da avaliação da influência do vapor de *stripping* mostra o efeito sobre o PIE (ASTM D86) e a temperatura ASTM D86 (vol. 5% vaporizado). A função da coluna de *stripping* é remover os componentes mais leves presentes na corrente lateral e retorná-los à coluna principal. Desta forma, devido ao aumento da vazão de vapor, a quantidade de componentes leves que retornam à coluna principal aumenta. Conseqüentemente, com a redução de componentes mais leves na corrente de produto (que sai da coluna de *stripping*), há a elevação do PIE (ASTM D86) do mesmo.

Com o aumento do vapor no fundo da coluna de *stripping* 3, uma quantidade maior de componentes leves foi retirada do gasóleo removido da Coluna Atmosférica, resultando no aumento do PIE (ASTM D86) de gasóleo e a temperatura ASTM D86 (vol. 5% vaporizado) conforme a Figura 3.16. Inicialmente, observa-se que para vazões de vapor de coluna de *stripping* 3 superiores a, aproximadamente, 6000 kg/h, a temperatura ASTM D86 (PIE e vol. 5%) do gasóleo em função da vazão de vapor não sofreu variações significativas.

De acordo com a Figura 3.17, verifica-se o aumento da temperatura ASTM D86 (PIE e vol. 5%) para o diesel em função do aumento da vazão de vapor (VD). Além disso, para vazões de vapor de coluna de *stripping* 2 superiores a 11000 kg/h, aproximadamente, a temperatura ASTM D86 (PIE e vol. 5%) do diesel em função da vazão de vapor não sofreu variações significativas. É possível observar que a temperatura ASTM D86 (vol. 5%) do diesel sofreu variações menores em relação às variações do seu PIE.

Para Querosene, o PIE foi afetado e sofreu elevação devido ao aumento de vapor da coluna de *stripping* (VQ), conforme Figura 3.18, entretanto, observa-se que a temperatura ASTM D86 (vol. 5%) em função do aumento do vapor da coluna de *stripping* não sofreu grandes variações em comparação à variação do PIE, mostrando apenas um pequeno aumento conforme elevação da vazão de vapor. Para vazões de vapor de água da coluna de *stripping* 1 maiores que 11000 kg/h, aproximadamente, o PIE de querosene não sofre variações significativas.

O aumento do vapor de cada coluna de *stripping* afetou praticamente somente o produto da respectiva coluna de *stripping*. Por exemplo, o aumento de vapor da coluna de *stripping* 3 afetou, principalmente e praticamente, o Gasóleo removido. Nafta, Querosene e Diesel em termos de temperatura ASTM D86 não foram afetados devido à variação do vapor da coluna de *stripping* 3. O mesmo ocorre para o caso de variação da vazão de vapor das colunas de *stripping* 1 e 2.

Pelos resultados obtidos nas Figuras 3.16, 3.17 e 3.18, é possível verificar que a variável estudada mais afetada foi o PIE de Gasóleo, Diesel e Querosene em função da variação do vapor da coluna de *stripping* 3, 2 e 1, respectivamente. A remoção de componentes mais leves das correntes laterais por meio do aumento da vazão de vapor da coluna de *stripping* tem como consequência a elevação da temperatura ASTM D86 (PIE e vol.5%) para as três frações em função do aumento do vapor de acordo com os resultados obtidos. Este efeito mostrado com base nos resultados acima e causado pela mudança da vazão de vapor de *stripping* pode ser utilizado para modificações do Ponto Inicial de Ebulição das frações de acordo com Nelson (1969).

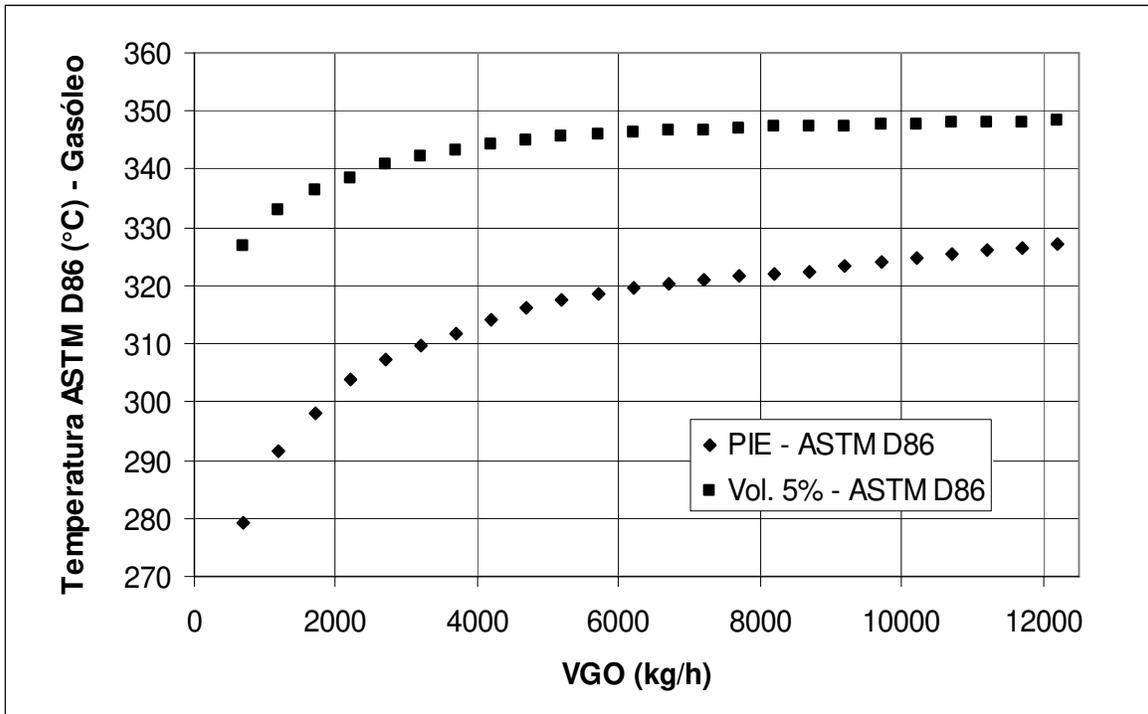


Figura 3.16: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 3 (kg/h) na fração de Gasóleo.

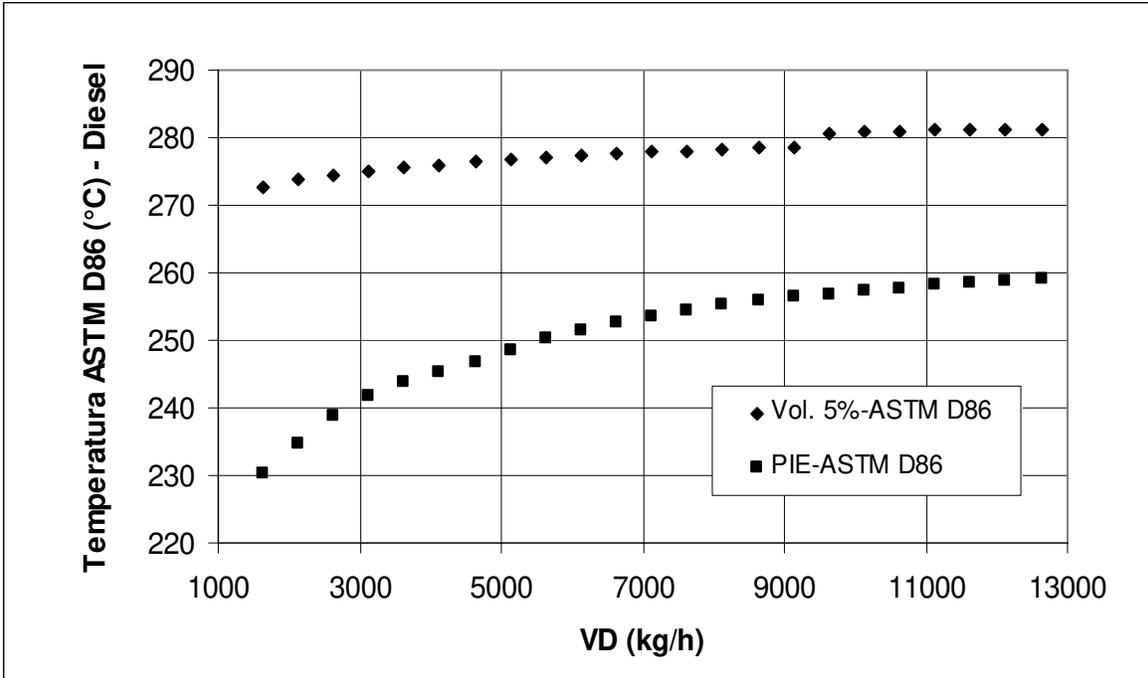


Figura 3.17: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 2 (kg/h) na fração de Diesel.

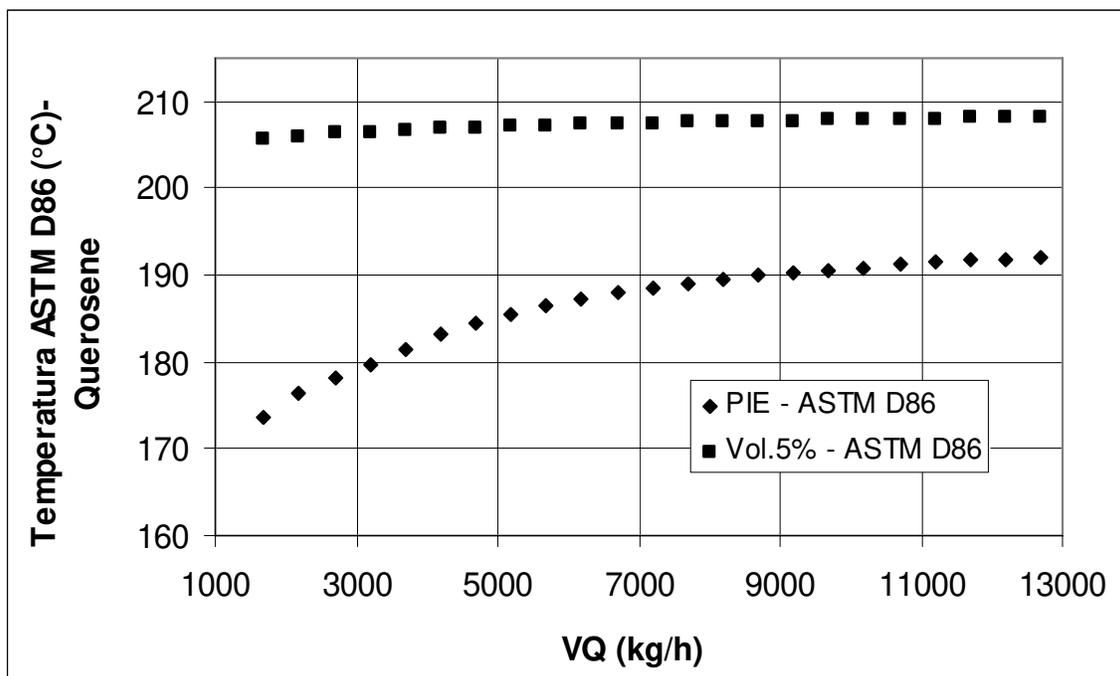


Figura 3.18: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 1 (kg/h) na fração de Querosene.

Para verificar o comportamento do fracionamento entre duas frações em função do aumento de vapor da coluna de *stripping*, é necessário analisar o comportamento da variável Gap 5-95. Gap 5-95 entre duas frações é a diferença entre a temperatura ASTM D86 na qual 5% da fração mais pesada é vaporizada e a temperatura na qual 95% da fração mais leve é vaporizada. Desta forma, o Gap 5-95 é uma variável que indica o grau de fracionamento entre duas frações. Assim, um aumento no Gap5-95 indica um aumento (melhora) no fracionamento.

Observando-se as Figuras 3.19, 3.20 e 3.21, é possível verificar o aumento do Gap 5-95 Gasóleo – Diesel, Diesel – Querosene e Querosene – Nafta em função do aumento do vapor da coluna de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente. O Gap 5-95 Gasóleo – Diesel, Diesel – Querosene e Querosene – Nafta foram as variáveis mais afetadas com o aumento de vapor das colunas de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente. Desta forma, por exemplo, o Gap 5-95 Diesel – Querosene não foi afetado, praticamente, pelo aumento de vapor da coluna de *stripping* 3.

Pelos resultados obtidos nas Figuras 3.19, 3.20 e 3.21, pode-se concluir que o aumento de vapor na coluna de *stripping* melhorou o fracionamento entre o respectivo produto da coluna e o produto retirado na corrente superior devido ao aumento da variável Gap 5-95.

De acordo com a Figura 3.19, o Gap 5-95 não sofre grandes variações para vazões de vapor maiores aproximadamente que 6500 kg/h. Isso significa que a partir desta vazão de vapor o vapor da coluna de *stripping* 3 não tem mais efeito praticamente na variação do Gap 5-95 Gasóleo-Diesel. Conseqüentemente, isso mostra que o grau de fracionamento não sofreu mudanças significativas.

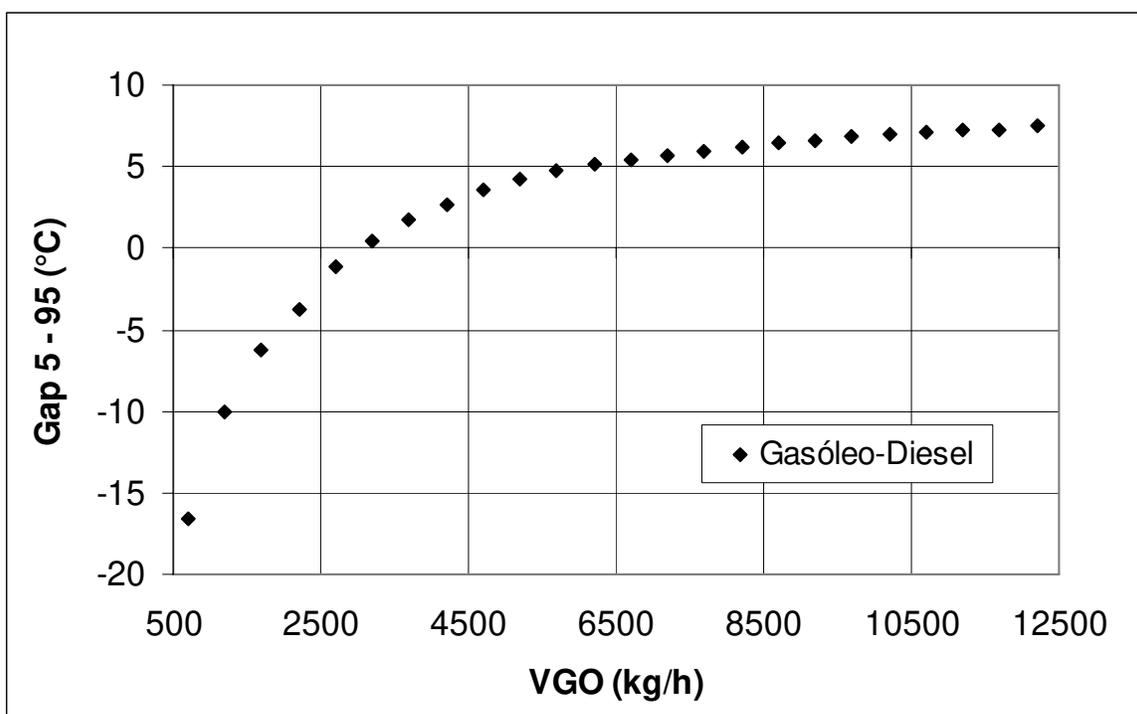


Figura 3.19: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 3 (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Gasóleo-Diesel.

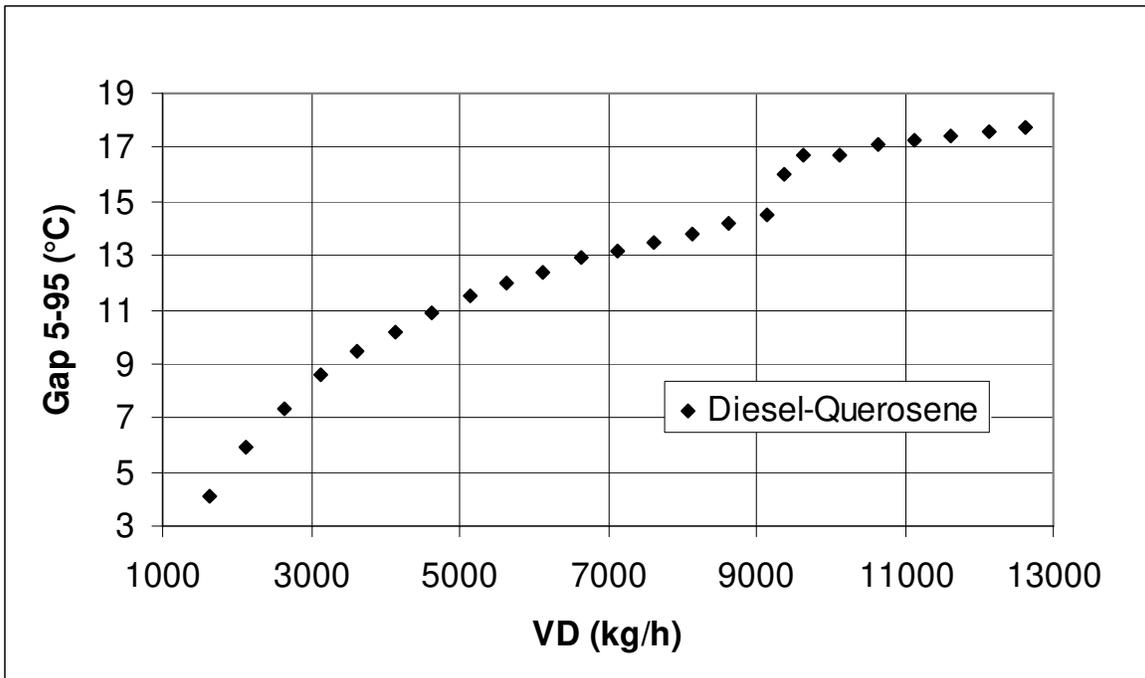


Figura 3.20: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 2 (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Diesel-Querosene.

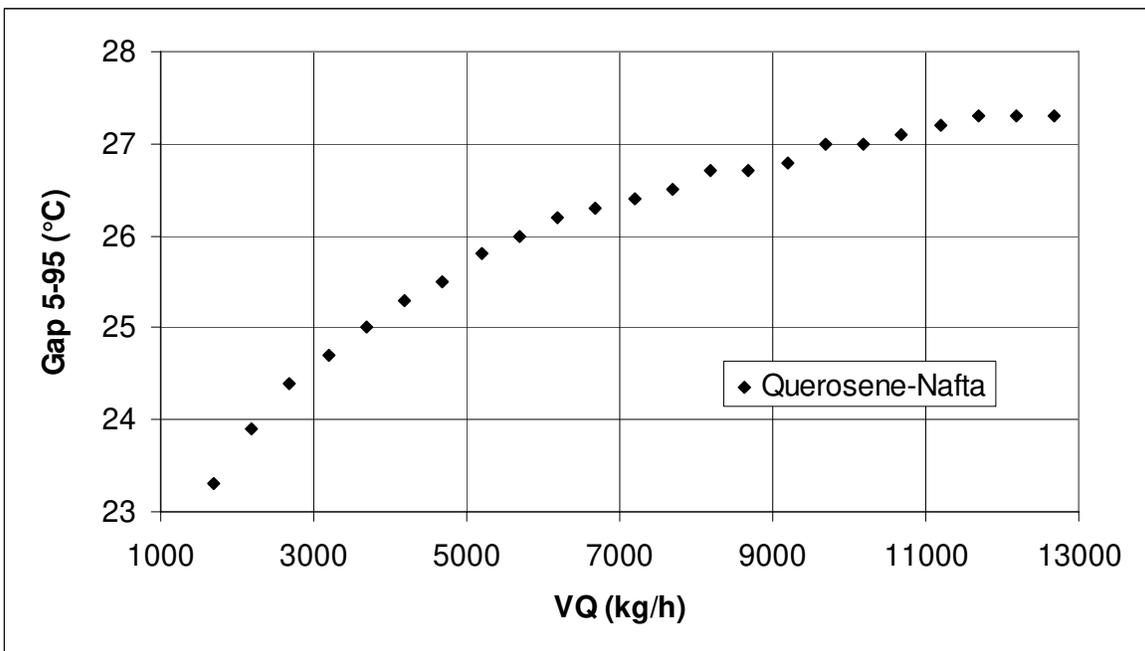


Figura 3.21: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 1 (kg/h) sobre o Gap 5-95 de Querosene-Nafta.

Um aumento na vazão de vapor de água na coluna de *stripping* provoca um aumento na vazão de vapor que sai do topo da Coluna Atmosférica. Isso ocorre porque o vapor injetado no fundo da coluna de *stripping* sai juntamente com os componentes mais leves desta coluna e vai para a Coluna Atmosférica. Conseqüentemente, isso provoca um aumento da vazão mássica de vapor total a ser condensado pelo condensador, levando a uma maior carga térmica a ser consumida para condensar todo o vapor. Neste caso, foi especificado em todas as simulações que não há vapor saindo do condensador, ou seja, todo o vapor é condensado. Este fato pode ser observado nas Figuras 3.22, 3.23 e 3.24 que apresentam o aumento da carga térmica do condensador em função do aumento da vazão de vapor das colunas de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente.

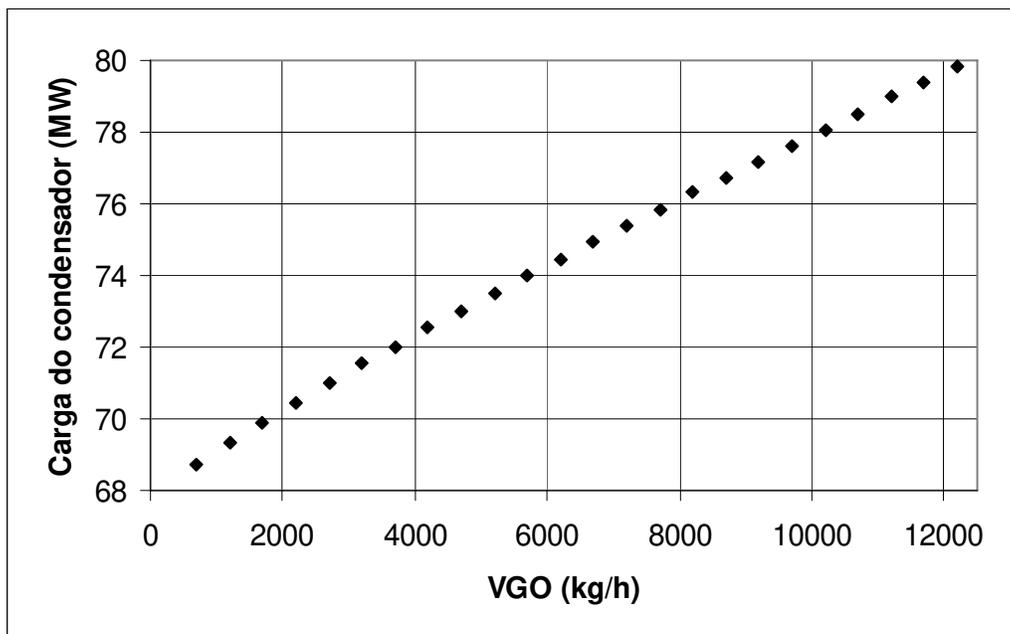


Figura 3.22: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 3 (kg/h) sobre a carga térmica do condensador.

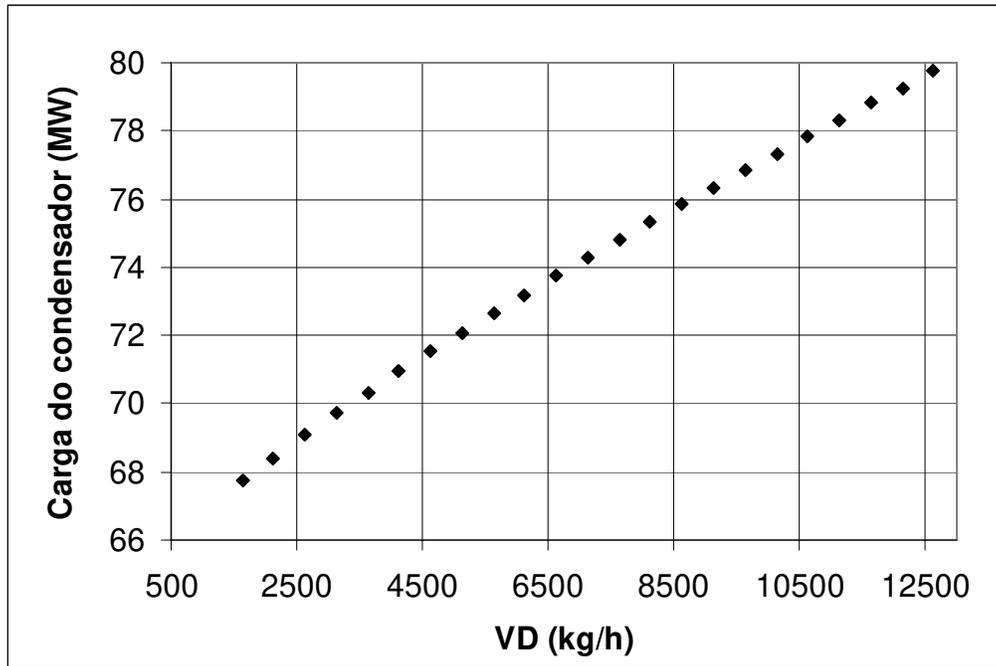


Figura 3.23: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 2 (kg/h) sobre a carga térmica do condensador.

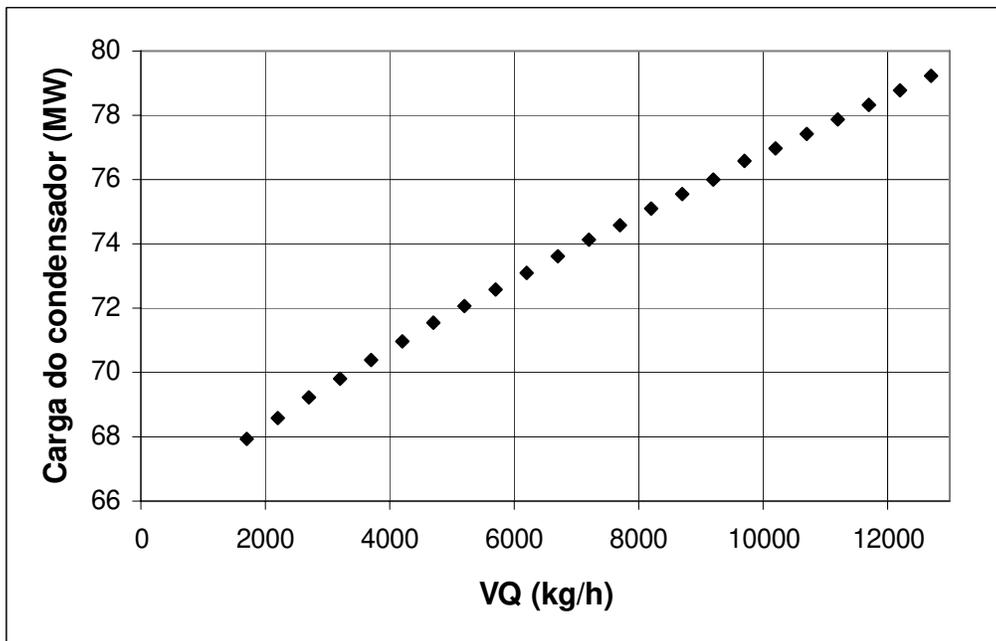


Figura 3.24: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 1 (kg/h) sobre a carga térmica do condensador.

As Figuras 3.25, 3.26 e 3.27 apresentam a porcentagem em volume removida da corrente lateral da Coluna Atmosférica dos estágios 9, 16 e 25 (Querosene, Diesel e Gasóleo) em função do vapor de água das colunas de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente. Esta porcentagem foi calculada da seguinte forma. Para cada simulação foram obtidos os resultados da vazão da corrente lateral (F_{CL}) cuja vazão de vapor de água da respectiva coluna de *stripping* foi variada. Assim, a vazão que foi efetivamente removida ($F_{removida}$) é a diferença entre F_{CL} e a vazão de produto ($F_{produto}$) obtida na saída da coluna de *stripping*. Desta forma, esta porcentagem em volume removida da corrente lateral da Coluna Atmosférica pode ser calculada pela equação (3.1):

$$\%volume = \frac{(F_{CL} - F_{produto})}{F_{CL}} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Os resultados obtidos nas Figuras 3.25, 3.26 e 3.27 apresentaram-se coerentes, já que um aumento de vapor permite que uma maior quantidade de componentes seja removida.

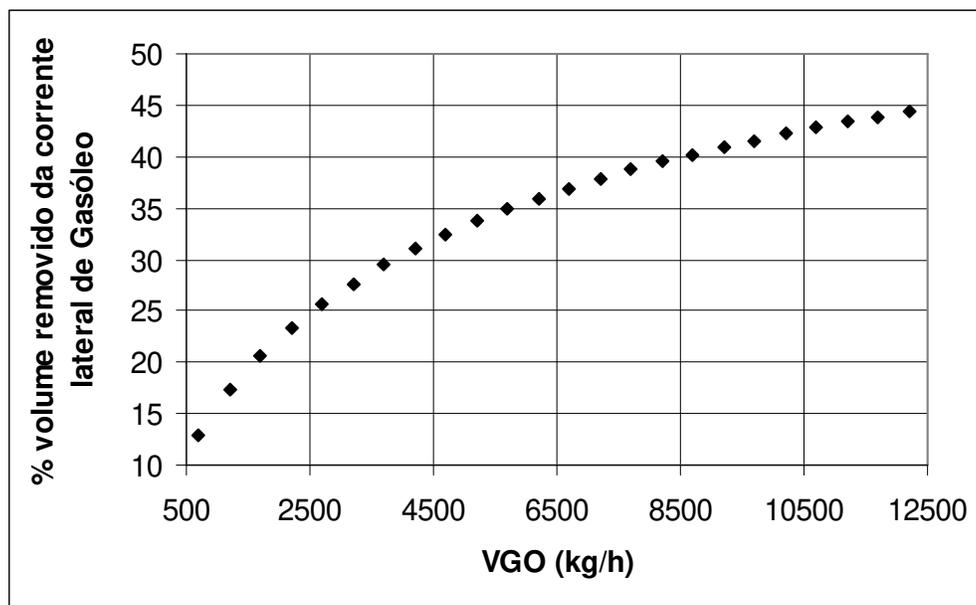


Figura 3.25: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 3 (kg/h) sobre a porcentagem em volume removido da corrente lateral de Gasóleo.

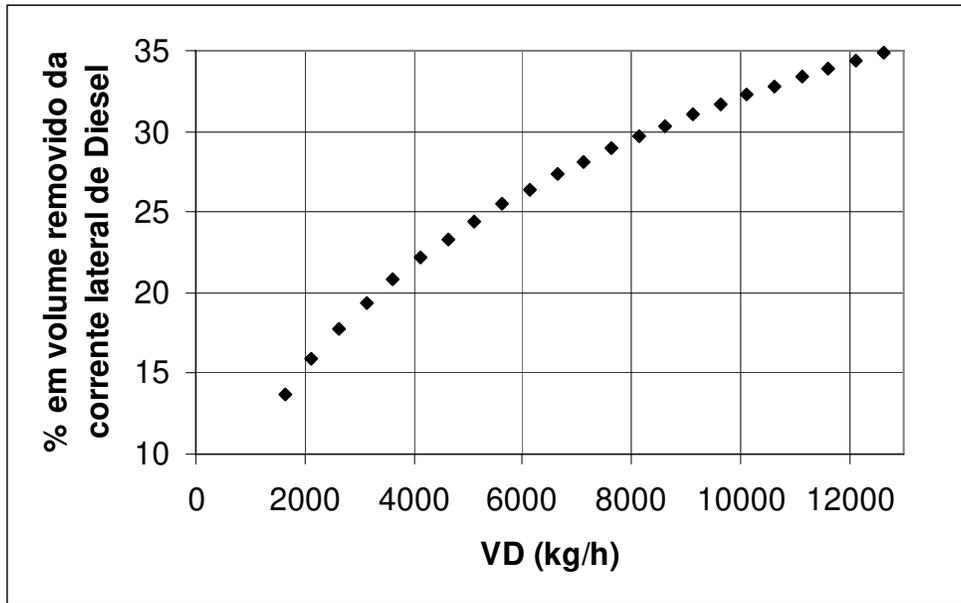


Figura 3.26: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 2 (kg/h) sobre a porcentagem em volume removido da corrente lateral de Diesel.

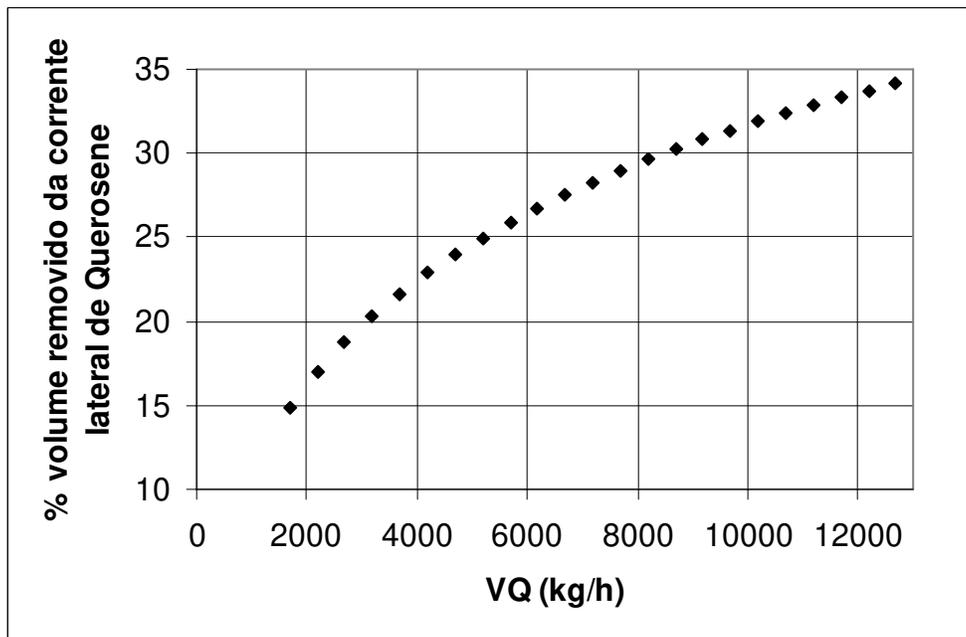


Figura 3.27: Efeito da vazão de vapor de água da coluna de *stripping* 1 (kg/h) sobre a porcentagem em volume removido da corrente lateral de querosene.

3.3.5) AVALIAÇÃO DOS RENDIMENTOS

Segundo Nelson (1969), os rendimentos retirados da Coluna Atmosférica podem ser um meio de operação para ajustar (regular) as especificações em termos de propriedade das frações (PFE). Desta forma, a retirada de cada produto influencia diretamente na fração obtida. Se forem necessárias mudanças nas especificações de produtos (temperatura ASTM D86), a vazão dos rendimentos dos respectivos produtos é uma das variáveis que podem ser alteradas para que as especificações desejadas sejam alcançadas.

O objetivo deste item é apresentar como os rendimentos afetam o Ponto Inicial e Final de cada produto. Esta análise permite verificar como as vazões de retirada influenciam nas propriedades das frações retiradas e conseqüentemente, como estas podem ser alteradas para que, por exemplo, novas especificações de produtos (temperatura ASTM D86) possam ser alcançadas.

Esta avaliação será baseada nas especificações do caso base de estudo da Coluna Atmosférica. O aumento da retirada de uma corrente lateral tem como conseqüência principal o aumento de temperatura nos estágios abaixo da retirada. Isso ocorre porque há a redução do fluxo de líquido que desce ao longo da coluna abaixo da retirada em questão. Esse fluxo de líquido permite a redução de temperatura dos estágios abaixo, resfriando-os. Como há redução do fluxo de líquido nos estágios abaixo da retirada (incluindo-a) com o aumento da vazão da retirada, ocorre um menor resfriamento nestes estágios. Esse menor resfriamento causa um aumento de temperatura nos estágios abaixo. Conseqüentemente, esse aumento de temperatura favorece a vaporização dos componentes mais pesados e ao mesmo tempo, ocorre a incorporação destes componentes na própria corrente e nos estágios abaixo da corrente lateral que houve aumento da vazão de retirada. Este fato tem como conseqüência direta o aumento do PFE das frações retiradas logo abaixo e a redução de resíduo, se os rendimentos de todos os produtos não forem alterados, exceto a retirada que foi aumentada. O efeito provocado pelo aumento da retirada pode ser compensado, de certa forma, pelo efeito da redução da corrente lateral abaixo daquela que foi retirada.

Mantendo-se as especificações do caso base e variando-se somente a retirada de diesel para 140 m³/h, a Tabela 3.10 apresenta o perfil de temperatura obtido nas simulações para estes dois rendimentos (caso base – 165,2 m³/h e 140 m³/h). A Tabela 3.10 apresenta a

temperatura dos estágios em duas situações para mostrar a diminuição destas quando se reduz a retirada de uma corrente lateral.

Tabela 3.10: Temperatura nos estágios para a retirada em duas situações: 165,2 m³/h e 140 m³/h de diesel.

| Vazão de Diesel | 140 m ³ /h | Caso base -165,2 m ³ /h |
|-----------------|-----------------------|------------------------------------|
| Estágio | Temperatura (°C) | Temperatura (°C) |
| 14 | 253,9 | 254,6 |
| 15 | 260,4 | 261,7 |
| 16 | 268,5 | 271 |
| 17 | 277,5 | 282,4 |
| 18 | 289,3 | 295,4 |
| 19 | 295,7 | 302,1 |
| 20 | 300,7 | 307,2 |
| 21 | 304,1 | 310,5 |
| 22 | 306,8 | 313 |
| 23 | 309,2 | 315,4 |
| 24 | 311,8 | 317,9 |
| 25 | 315,2 | 321,7 |
| 26 | 319,4 | 326,7 |
| 27 | 323,9 | 331,7 |
| 28 | 329,7 | 336,4 |
| 29 | 341 | 343 |
| 30 | 338,2 | 340,1 |
| 31 | 336,9 | 338,8 |
| 32 | 335,8 | 337,8 |
| 33 | 334,2 | 336,2 |
| 34 | 328,7 | 330,7 |

Na Figura 3.28, pode-se verificar o aumento da temperatura nos estágios quando a vazão de retirada de diesel é aumentada de 140 m³/h para 165,2 m³/h. Não ocorreu praticamente aumento de temperatura nos estágios menores que o décimo quarto. Por isso, não foram apresentadas as temperaturas nestes estágios para ambas as vazões de diesel na Figura 3.28.

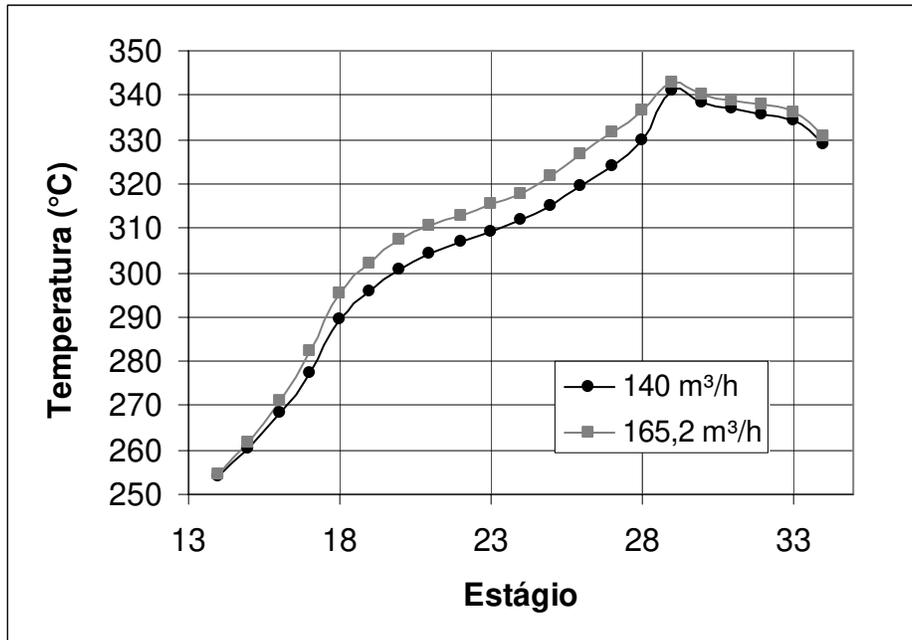


Figura 3.28: Perfil de temperatura em função dos estágios para a retirada de diesel do caso base e igual a 140 m³/h.

Inicialmente, para verificar o efeito que o aumento na retirada provoca nos produtos, as simulações serão realizadas, mantendo-se as especificações do caso de estudo constantes e variando-se a vazão de retirada de um dos produtos. Neste caso, diesel será analisado. A Tabela 3.11 apresenta os principais resultados do efeito do aumento de retirada de diesel sobre as correntes de produtos. Os resultados consistem na temperatura ASTM D86 (°C) de cada corrente para cada vazão de diesel modificada.

Tabela 3.11: Efeito do aumento de retirada de Diesel sobre as correntes de produtos.

| Diesel (m³/h) | | 165,2 | 160,0 | 155,0 | 150,0 | 145,0 | 140,0 |
|---------------------------------|----------------------------|----------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Corrente | % Volume Vaporizado | Temperatura ASTM D86 (°C) | | | | | |
| Resíduo | PIE | 322,8 | 322,3 | 321,6 | 320,7 | 319,7 | 318,6 |
| | 5% | 358,8 | 358,1 | 357,3 | 356,3 | 355,1 | 353,8 |
| | Gasóleo | PIE | 309,7 | 308,0 | 306,1 | 304,0 | 301,9 |
| | 5% | 342,2 | 338,4 | 336,4 | 334,7 | 333,0 | 331,3 |
| | 95% | 411,3 | 405,3 | 396,2 | 391,7 | 388,1 | 384,0 |
| | PFE | 425,0 | 421,1 | 419,3 | 413,2 | 407,7 | 404,4 |
| Diesel | PIE | 246,7 | 246,4 | 246,2 | 245,9 | 245,7 | 245,4 |
| | 5% | 276,4 | 275,9 | 275,4 | 274,9 | 274,4 | 273,9 |
| | 95% | 341,8 | 340,4 | 338,8 | 336,5 | 332,5 | 330,8 |
| | PFE | 350,0 | 347,9 | 346,7 | 346,2 | 341,8 | 338,1 |
| Querosene | PIE | 184,5 | 184,5 | 184,4 | 184,4 | 184,4 | 184,4 |
| | 5% | 207,0 | 207,0 | 207,0 | 207,0 | 207,0 | 207,0 |
| | 95% | 265,5 | 265,4 | 265,4 | 265,3 | 265,2 | 265,1 |
| | PFE | 280,0 | 279,8 | 279,6 | 279,4 | 279,2 | 279,0 |
| Nafta | 95% | 181,5 | 181,5 | 181,5 | 181,5 | 181,5 | 181,5 |
| | PFE | 190,0 | 190,0 | 190,0 | 190,0 | 190,0 | 190,0 |

Analisando-se a Tabela 3.11, observa-se que o diesel, gasóleo e resíduo sofreram modificações em termos da temperatura ASTM D86. Esse resultado era esperado de acordo com os comentários descritos anteriormente, ou seja, a incorporação de componentes mais pesados na própria corrente cuja retirada foi aumentada e nas correntes inferiores, resultando no aumento da temperatura ASTM D86 obtida de gasóleo e principalmente, do PFE e da temperatura ASTM D86 na qual 95% do volume vaporizado do diesel, nas simulações. Assim, variando-se a vazão de diesel, o próprio diesel é afetado e o produto inferior (gasóleo) também conforme Tabela 3.11. O PIE e a temperatura ASTM D86 na qual 5% do volume vaporizado do resíduo e diesel tiveram praticamente uma variação muito pequena com o aumento da retirada de diesel, mostrando nenhum efeito nestas variáveis com o aumento da vazão de diesel.

Para se modificar o PFE de um produto sem alterar o produto inferior, ambos os rendimentos destes produtos devem ser alterados. Este é o efeito de compensação, quando se deseja alterar o PFE de um produto sem alterar o inferior. Retirando-se mais diesel, seu PFE é elevado. Ao mesmo tempo em que mais diesel é retirado, gasóleo deve ter sua vazão reduzida para que o seu PFE não seja alterado. Desta forma, ocorre uma espécie de “regulagem” do PFE de diesel sem modificar o PFE da retirada inferior. Isso pode ser verificado nos resultados da Tabela 3.12. Nas simulações para a obtenção dos resultados da Tabela 3.12, todas as especificações do caso base foram mantidas, exceto as vazões de diesel e gasóleo. Neste caso, cada simulação foi realizada, alterando e considerando as vazões de diesel nos seguintes valores: 155 m³/h, 160 m³/h, 175 m³/h, 170 m³/h e incluindo o caso base 165,2 m³/h, com o PFE do gasóleo especificado e fixado em 425°C. A vazão de gasóleo em cada simulação foi obtida como resultado para cada valor de vazão de diesel considerada com o PFE do gasóleo fixado em 425°C.

Tabela 3.12: Resultados obtidos para regulagem do PFE do Diesel, variando o rendimento de Gasóleo.

| | Case base | | | | |
|---|------------------|-------|-------|-------|-------|
| Vazão de Diesel (m³/h) | 155,0 | 160,0 | 165,2 | 170,0 | 175,0 |
| Vazão de Gasóleo (m³/h) | 73,1 | 67,4 | 61,5 | 55,9 | 50,0 |
| ASTM D86 | Diesel | | | | |
| PIE (°C) | 246,2 | 246,4 | 246,7 | 247,0 | 247,2 |
| PFE (°C) | 346,9 | 348,0 | 350,0 | 353,2 | 358,0 |
| ASTM D86 | Gasóleo | | | | |
| PIE (°C) | 305,3 | 307,5 | 309,7 | 312,4 | 316,1 |
| PFE (°C) | 425,0 | 425,0 | 425,0 | 425,0 | 425,0 |

Os resultados da Tabela 3.12 mostram o PIE e PFE obtido de diesel e gasóleo quando ambas as vazões são alteradas. Para que o PFE de uma fração aumente, é necessário

aumentar sua vazão de retirada, conforme descrito anteriormente e mostrado nos resultados da Tabela 3.11. Entretanto, para que o PFE do produto retirado abaixo também não aumente, é necessário reduzir sua vazão de retirada. Desta forma, de acordo com a Tabela 3.12, para que o PFE de diesel aumente sem que o PFE de gasóleo também aumente, a vazão de retirada de diesel deve aumentar, enquanto que a de gasóleo, deve diminuir. Por exemplo, se a vazão de diesel especificada em 165,2 m³/h (caso base) for aumentada para 170 m³/h, a retirada de gasóleo deverá ser de 55,9 m³/h para que o PFE de diesel possa aumentar de 350°C para 353,2 °C e o PFE de gasóleo não seja alterado no valor de 425°C.

É possível verificar que o PIE do diesel não variou, enquanto que o de gasóleo aumentou conforme aumento da retirada de diesel. Isto pode ter ocorrido devido à incorporação de componentes mais pesados do diesel na corrente de gasóleo. Como a vazão de retirada de diesel aumentou, a vazão de líquido na coluna abaixo da retirada foi reduzida. Com isso, a temperatura nos estágios abaixo aumentou, já que menores vazões de líquido descendo na coluna permitem um menor resfriamento nestes estágios. Desta forma, os componentes mais pesados do diesel tiveram uma maior volatilização devido ao aumento de temperatura nos estágios. Conseqüentemente, ocorreu uma maior incorporação destes componentes na corrente de gasóleo e diesel. Isso provocou o aumento do PFE de diesel e do PIE de gasóleo, conforme resultados da Tabela 3.12. Além disso, de acordo com os resultados da Tabela 3.12, o PFE de gasóleo não foi alterado, já que sua vazão foi reduzida para compensar o efeito provocado pelo aumento da vazão de diesel.

Pelos resultados da Tabela 3.12, o PFE de diesel não se enquadra nas especificações da Tabela 2.3, quando a vazão de retirada de diesel é de 175 m³/h e a de gasóleo é de 50 m³/h. Neste caso, o PFE de diesel é maior que 357°C. Portanto, a vazão de retirada de diesel deve ser menor que 175 m³/h para que o PFE de diesel seja menor que 357°C.

Os resultados obtidos na Tabela 3.12 mostram, basicamente, o procedimento descrito por Nelson para regular o PFE de um produto lateral. Segundo Nelson (1969):

- 1) Para aumentar o PFE sem alterar o PIE, abra a válvula da corrente lateral (neste caso, aumentar a vazão de diesel) e fechar a válvula do produto abaixo (diminuir a vazão de gasóleo) por uma quantidade correspondente.

- 2) Para aumentar o PIE sem alterar o PFE, feche a válvula da corrente lateral (diminuir a vazão de gásóleo) e abra a válvula do produto (aumentar a vazão de diesel) superior por uma quantidade correspondente.

Observando-se os resultados da Tabela 3.12, pode-se verificar que o aumento da vazão de diesel e a redução da vazão de gásóleo, simultaneamente, provocaram o aumento do PFE do diesel sem alterar seu PIE (segundo item 1 descrito acima) e ao mesmo tempo que ocorreu o aumento do PIE do gásóleo sem variar seu PFE (segundo item 2).

Analisando-se o grau de fracionamento quando as vazões de diesel e gásóleo variam de acordo com valores da Tabela 3.13, podem ser verificados os seguintes resultados da Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Gap 5-95 Gásóleo-Diesel para cada respectiva vazão de Diesel e Gásóleo.

| | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|
| Vazão de Diesel (m³/h) | 155,0 | 160,0 | 165,2 | 170,0 | 175,0 |
| Vazão de Gásóleo (m³/h) | 73,06 | 67,4 | 61,45 | 55,9 | 50,0 |
| Gap 5-95 Gásóleo-Diesel | -1,7 | -1,2 | 0,4 | 0,9 | 0,9 |

3.3.6) AVALIAÇÃO DO REFLUXO CIRCULANTE

Inicialmente, a avaliação do refluxo circulante foi realizada, retirando-se completamente o circuito do refluxo circulante pertencente à Coluna Atmosférica. As especificações descritas no caso base foram consideradas e mantidas constantes. Neste caso, o efeito será estudado retirando-se totalmente cada um dos três refluxos circulantes, com carga de forno (temperatura de alimentação da coluna atmosférica fixada) e vazão de retirada de produtos constantes. Foram realizadas três simulações.

Na primeira simulação, o primeiro refluxo circulante será retirado e as especificações para o segundo e terceiro refluxo circulante estarão de acordo com a Tabela 3.7 (carga térmica e vazão de retirada). Na segunda simulação, o segundo refluxo circulante será retirado e as especificações para o primeiro e o terceiro refluxo circulante estarão de

acordo com a Tabela 3.7 (carga térmica e vazão de retirada) e assim, sucessivamente para a terceira simulação.

A análise do efeito de retirada de cada refluxo circulante mostrará o comportamento da Coluna Atmosférica com a eliminação em termos de carga térmica adicionada à coluna e fluxo de líquido retornando na coluna, principalmente nos estágios acima da corrente de retirada do refluxo circulante. Isto significa que será possível observar o efeito ao retirar uma corrente líquida, que retorna à coluna, em uma temperatura menor do que ao do estágio de entrada.

Os resultados obtidos nas simulações realizadas na presença de todos os refluxos circulantes e na ausência do primeiro refluxo circulante são apresentados na Tabela 3.14.

A Tabela 3.15 apresenta os principais resultados, retirando-se alternadamente o segundo e o terceiro refluxo circulante. Nestes dois casos, todas as especificações anteriores na presença de todos os refluxos circulantes permaneceram, entretanto as considerações para os respectivos refluxos circulantes (segundo e terceiro) não foram consideradas e para os refluxos circulantes que fazem parte da coluna foram consideradas de acordo com os valores da Tabela 3.7.

Tabela 3.14: Principais resultados das simulações para verificar o efeito de retirada do primeiro refluxo circulante.

| | Sem o primeiro Refluxo Circulante | | | Com todos os Refluxos Circulantes | | |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | Q _{condensador} | 91 MW | | Q _{condensador} | 71,6 MW | |
| | Razão de Refluxo | 1,566 | | Razão de Refluxo | 0,927 | |
| ASTM D86 | PFE da nafta | 187,6°C | | PFE da nafta | 190°C | |
| Estágios | Temperatura (°C) | Líquido (m ³ /h) | Vapor (m ³ /h) | Temperatura (°C) | Líquido (m ³ /h) | Vapor (m ³ /h) |
| Condensador | 49,4 | 430,1 | 0 | 49,3 | 254,7 | 0 |
| 1° | 143,7 | 558,9 | 725 | 141,9 | 907,3 | 549,7 |
| 2° | 167,4 | 607,9 | 853,9 | 160,8 | 987,5 | 802,3 |
| 3° | 176,3 | 619,8 | 902,9 | 170,1 | 614,2 | 882,5 |
| 4° | 181,4 | 620,3 | 914,7 | 177,5 | 618,1 | 909,1 |
| 5° | 185,2 | 615,7 | 915,3 | 182,6 | 614,7 | 913,1 |
| 6° | 188,8 | 606,3 | 910,7 | 187,1 | 605,6 | 909,7 |
| 7° | 193,1 | 589,5 | 901,2 | 191,9 | 588,9 | 900,6 |
| 8° | 198,8 | 561,4 | 884,5 | 198,1 | 560,6 | 883,8 |
| 9° | 208,1 | 316,6 | 800,4 | 207,7 | 316,0 | 799,7 |
| 10° | 220,7 | 907,1 | 769,1 | 220,7 | 906,6 | 768,6 |
| 11° | 231,5 | 939,8 | 959,7 | 231,5 | 939,6 | 959,1 |
| 12° | 239,3 | 540,7 | 992,4 | 239,3 | 540,7 | 992,2 |
| 13° | 247,7 | 526,9 | 993,3 | 247,7 | 527,0 | 993,3 |
| 14° | 254,6 | 502,2 | 979,5 | 254,6 | 502,2 | 979,5 |
| 15° | 261,7 | 463,2 | 954,8 | 261,7 | 463,2 | 954,8 |
| 16° | 271,0 | 204,2 | 860,9 | 271,0 | 204,2 | 860,9 |
| 17° | 282,4 | 547,7 | 817,3 | 282,4 | 547,7 | 817,3 |
| 18° | 295,4 | 564,8 | 960,8 | 295,4 | 564,8 | 960,8 |
| 19° | 302,1 | 358,2 | 977,9 | 302,1 | 358,2 | 977,9 |
| 20° | 307,2 | 346,9 | 971,4 | 307,2 | 346,9 | 971,4 |
| 21° | 310,5 | 334,5 | 960,0 | 310,5 | 334,5 | 960,0 |
| 22° | 313,0 | 320,6 | 947,6 | 313,0 | 320,6 | 947,6 |
| 23° | 315,4 | 303,1 | 933,7 | 315,4 | 303,1 | 933,7 |
| 24° | 317,9 | 277,9 | 916,2 | 317,9 | 277,9 | 916,2 |
| 25° | 321,7 | 158,1 | 864,3 | 321,7 | 158,1 | 864,3 |
| 26° | 326,7 | 123,7 | 829,4 | 326,7 | 123,7 | 829,4 |
| 27° | 331,7 | 90,71 | 795,1 | 331,7 | 90,71 | 795,1 |
| 28° | 336,4 | 42,84 | 762,1 | 336,4 | 42,84 | 762,1 |
| 29° | 343,0 | 338,0 | 714,2 | 343,0 | 338,0 | 714,2 |
| 30° | 340,1 | 323,0 | 52,44 | 340,1 | 323,0 | 52,44 |
| 31° | 338,8 | 317,3 | 37,49 | 338,8 | 317,3 | 37,49 |
| 32° | 337,8 | 312,9 | 31,8 | 337,8 | 312,9 | 31,8 |
| 33° | 336,2 | 306,8 | 27,34 | 336,2 | 306,8 | 27,34 |
| 34° | 330,7 | 293,6 | 21,28 | 330,7 | 293,6 | 21,28 |

Tabela 3.15: Principais resultados das simulações para verificar o efeito de retirada do segundo e terceiro refluxo circulante.

| | Sem o segundo Refluxo Circulante | | | Sem o terceiro Refluxo Circulante | | |
|-------------|----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| | Q _{condensador} | 90,64 MW | | Q _{condensador} | 87,47 MW | |
| | Razão de Refluxo | 1,557 | | Razão de Refluxo | 1,452 | |
| Estágios | Temperatura (°C) | Líquido (m ³ /h) | Vapor (m ³ /h) | Temperatura (°C) | Líquido (m ³ /h) | Vapor (m ³ /h) |
| Condensador | 49,4 | 427,8 | 0 | 49,4 | 398,9 | 0 |
| 1° | 143,5 | 1137 | 722,8 | 143,3 | 1098 | 693,9 |
| 2° | 164,5 | 1249 | 1032 | 164 | 1205 | 993,4 |
| 3° | 174,4 | 888,2 | 1143 | 173,8 | 842 | 1100 |
| 4° | 181,9 | 897,5 | 1183 | 181,2 | 850,4 | 1137 |
| 5° | 187,1 | 895,9 | 1192 | 186,5 | 848,4 | 1145 |
| 6° | 191,8 | 886,1 | 1191 | 191,2 | 838,7 | 1143 |
| 7° | 197,0 | 865,6 | 1181 | 196,3 | 819,1 | 1134 |
| 8° | 203,6 | 830,8 | 1161 | 202,9 | 785,9 | 1114 |
| 9° | 213,9 | 576,5 | 1063 | 212,9 | 532,7 | 1019 |
| 10° | 227,1 | 555,9 | 1029 | 226,1 | 1135 | 985,3 |
| 11° | 238,0 | 547,7 | 1009 | 236,5 | 1168 | 1187 |
| 12° | 245,9 | 539,5 | 1000 | 244,7 | 771,9 | 1221 |
| 13° | 251,8 | 525,4 | 992,1 | 253,4 | 759,1 | 1225 |
| 14° | 257,2 | 501,5 | 977,9 | 260,8 | 731,2 | 1212 |
| 15° | 263,2 | 463,5 | 954,0 | 268,8 | 684,3 | 1184 |
| 16° | 271,7 | 204,7 | 861,2 | 279,2 | 409,7 | 1073 |
| 17° | 282,6 | 548,3 | 817,8 | 291,9 | 379,1 | 1023 |
| 18° | 295,4 | 565,0 | 961,4 | 300,7 | 363,2 | 992,2 |
| 19° | 302,1 | 358,3 | 978,2 | 306,1 | 351,8 | 976,3 |
| 20° | 307,2 | 346,9 | 971,5 | 309,5 | 341,2 | 964,9 |
| 21° | 310,5 | 334,5 | 960 | 312 | 330,2 | 954,4 |
| 22° | 313,0 | 320,6 | 947,7 | 314 | 317,5 | 943,3 |
| 23° | 315,4 | 303,1 | 933,7 | 316 | 301,2 | 930,7 |
| 24° | 317,9 | 277,9 | 916,2 | 318,4 | 277,0 | 914,3 |
| 25° | 321,7 | 158,1 | 864,3 | 321,9 | 157,9 | 863,4 |
| 26° | 326,7 | 123,7 | 829,4 | 326,8 | 123,7 | 829,3 |
| 27° | 331,7 | 90,71 | 795,1 | 331,7 | 90,73 | 795,1 |
| 28° | 336,4 | 42,84 | 762,1 | 336,4 | 42,84 | 762,1 |
| 29° | 343,0 | 338,0 | 714,2 | 343,0 | 338,0 | 714,2 |
| 30° | 340,1 | 323,0 | 52,44 | 340,1 | 323,0 | 52,44 |
| 31° | 338,8 | 317,3 | 37,49 | 338,8 | 317,3 | 37,49 |
| 32° | 337,8 | 312,9 | 31,80 | 337,8 | 312,9 | 31,80 |
| 33° | 336,2 | 306,8 | 27,34 | 336,2 | 306,8 | 27,34 |
| 34° | 330,7 | 293,6 | 21,28 | 330,7 | 293,6 | 21,28 |

A Tabela 3.16 apresenta o PFE dos produtos obtidos e o Gap 5-95 ao retirar o segundo e o terceiro refluxo circulante.

Tabela 3.16: Alteração no PFE (ASTM D86) das frações com a retirada do segundo e do terceiro refluxo circulante.

| Com todos os Refluxos circulantes | PFE (ASTM D86) | Gap 5-95 | |
|--|-----------------------|------------------|--------|
| Nafta | 190°C | Querosene-Nafta | 25,6°C |
| Querosene | 280°C | Diesel-Querosene | 10,9°C |
| Diesel | 350°C | Gasóleo-Diesel | 0,4°C |
| Gasóleo | 425°C | | |
| Retirada do Segundo Refluxo circulante | PFE (ASTM D86) | Gap 5-95 | |
| Nafta | 188,5°C | Querosene-Nafta | 27,2°C |
| Querosene | 273,4°C | Diesel-Querosene | 13,2°C |
| Diesel | 350°C | Gasóleo-Diesel | 0,3°C |
| Gasóleo | 425°C | | |
| Retirada do Terceiro Refluxo circulante | PFE (ASTM D86) | Gap 5-95 | |
| Nafta | 188,6°C | Querosene-Nafta | 26,9°C |
| Querosene | 276,9°C | Diesel-Querosene | 14,5°C |
| Diesel | 348,1°C | Gasóleo-Diesel | 0,8°C |
| Gasóleo | 425°C | | |

Os perfis das Figuras 3.29 a 3.37 foram construídos, através dos dados da Tabela 3.14 e 3.15.

A Figura 3.29 apresenta os perfis de temperatura em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e no caso da retirada do primeiro refluxo circulante. Já, as Figuras 3.30 e 3.31 apresentam os perfis de temperatura na ausência do segundo e terceiro refluxo circulante, respectivamente, além de ambas apresentarem o perfil de temperatura na presença de todos os refluxos circulantes.

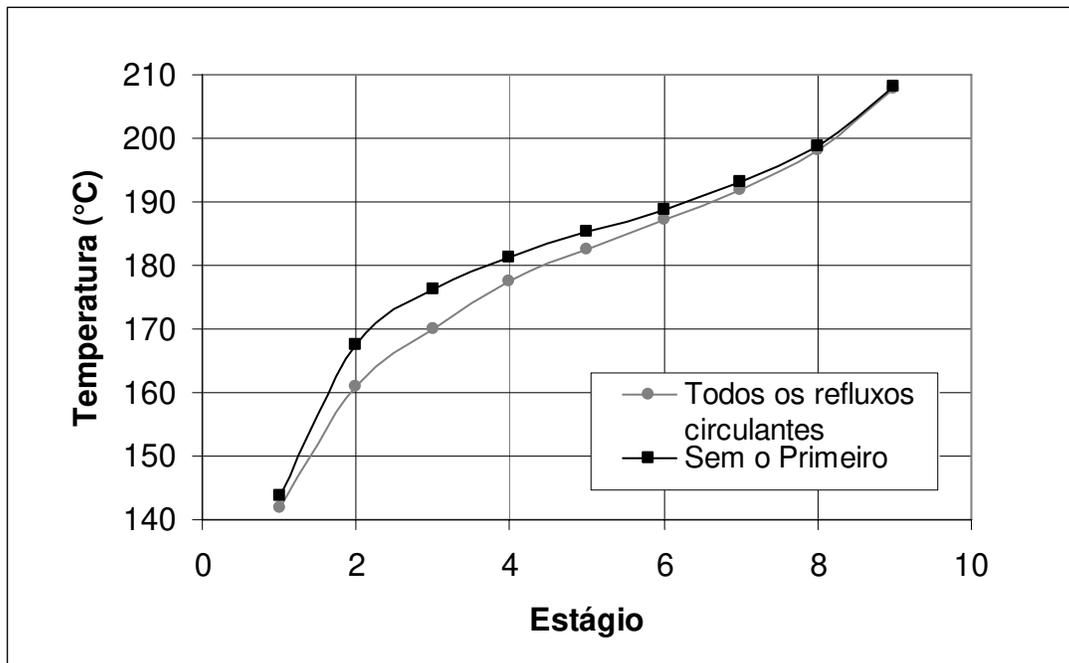


Figura 3.29: Perfil de temperatura dos estágios na presença e retirada do primeiro refluxo circulante.

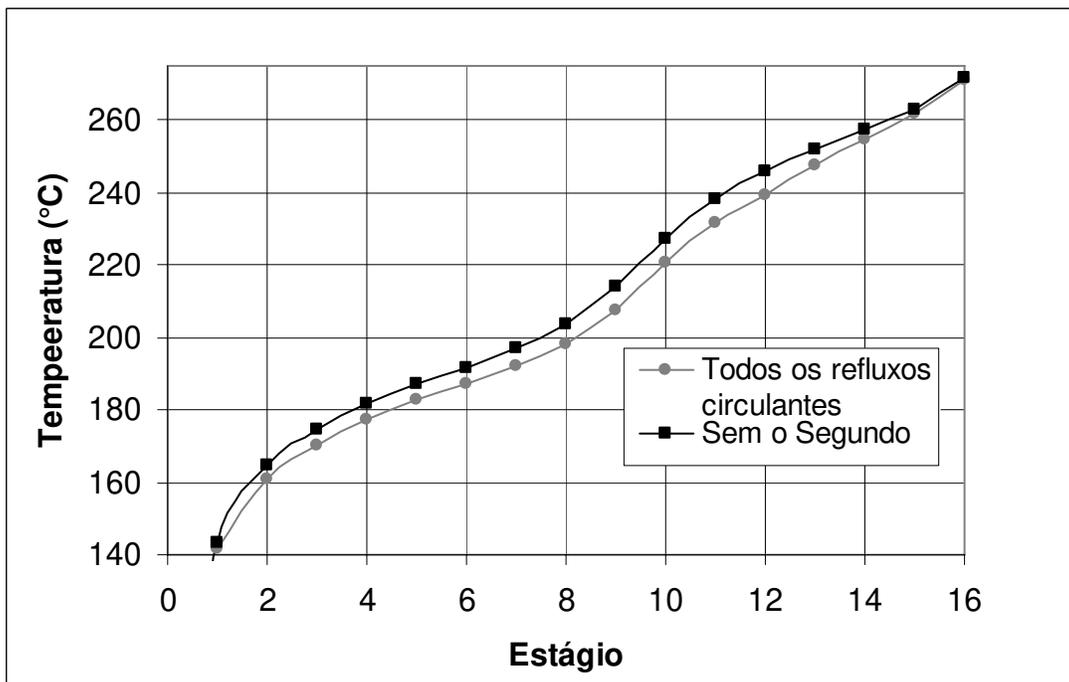


Figura 3.30: Perfil de temperatura dos estágios na presença e retirada do segundo refluxo circulante.

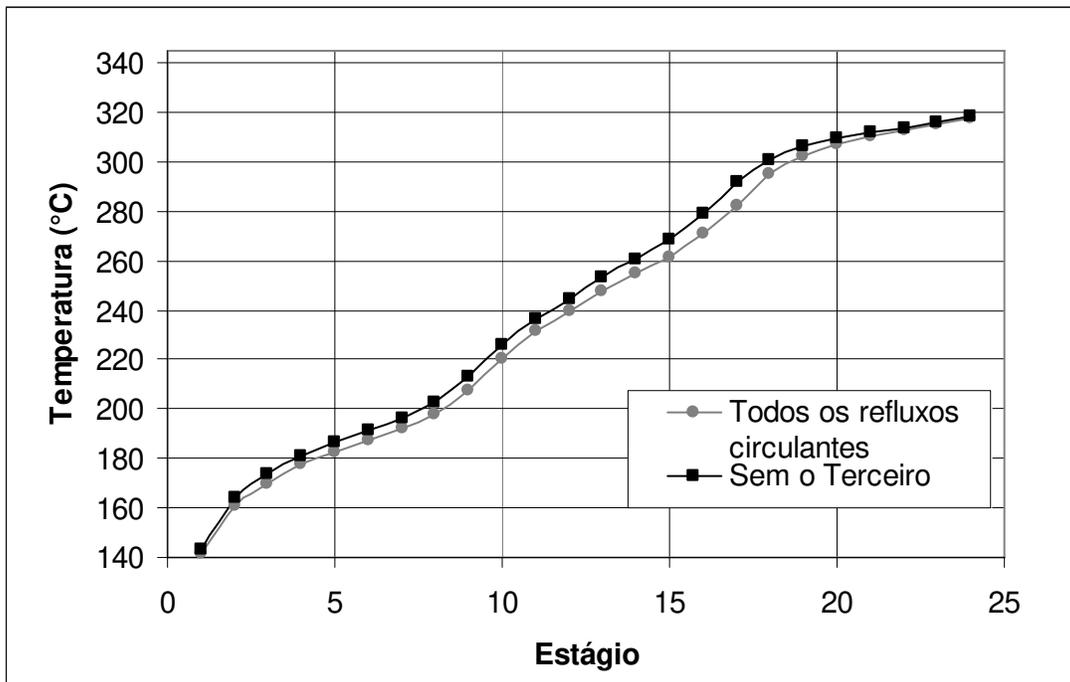


Figura 3.31: Perfil de temperatura dos estágios na presença e retirada do terceiro refluxo circulante.

Observando-se as Figuras 3.29, 3.30 e 3.31, as temperaturas dos estágios nas quais foram removidos o primeiro, o segundo e o terceiro refluxo circulante, respectivamente, apresentam um aumento em comparação àquelas na presença de todos os refluxos circulantes. Desta forma, com os resultados obtidos nas Figuras 3.29, 3.30 e 3.31, pode-se concluir que a retirada de um dos refluxos circulantes promoveu o aumento de temperatura em função dos estágios da coluna. Entretanto, este efeito ocorre até determinados estágios abaixo do circuito do refluxo circulante removido e não em todos os estágios da coluna. Isso pode ser verificado no comportamento dos perfis de temperatura apresentados e por meio das Tabelas 3.14 e 3.15.

Com a retirada do primeiro refluxo circulante, o efeito verificado ocorreu praticamente até o nono estágio, já que a temperatura neste estágio é a mesma na presença de todos os refluxos circulantes e na retirada do primeiro. O mesmo comportamento ocorre no caso da retirada do segundo e terceiro refluxo circulante. Nestes dois casos (retirada do segundo e terceiro refluxo circulante), o efeito é verificado até o 16° e 24° estágio, respectivamente.

As Figuras 3.32, 3.33 e 3.34 apresentam os perfis de vazão de líquido em função dos estágios da coluna na presença de todos os refluxos circulantes e no caso de retirada do respectivo refluxo circulante (primeiro, segundo e terceiro, respectivamente). Já as Figuras 3.35, 3.36 e 3.37 apresentam os perfis de vazão de vapor para os casos de retirada do primeiro, segundo e terceiro refluxo circulante, respectivamente.

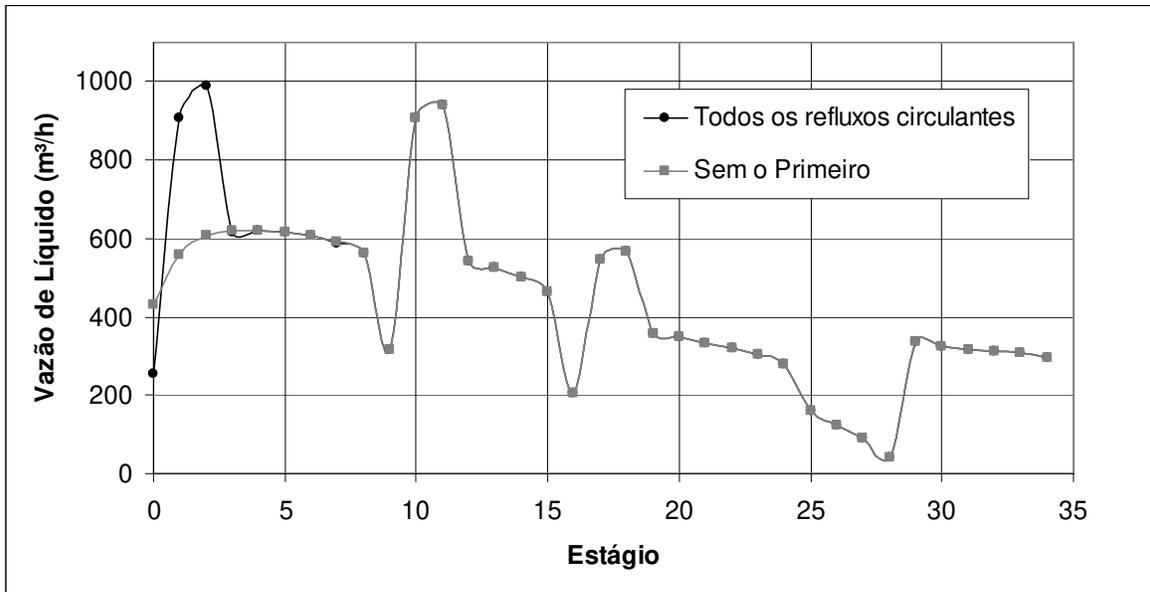


Figura 3.32: Perfil da vazão de líquido em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do primeiro refluxo circulante.

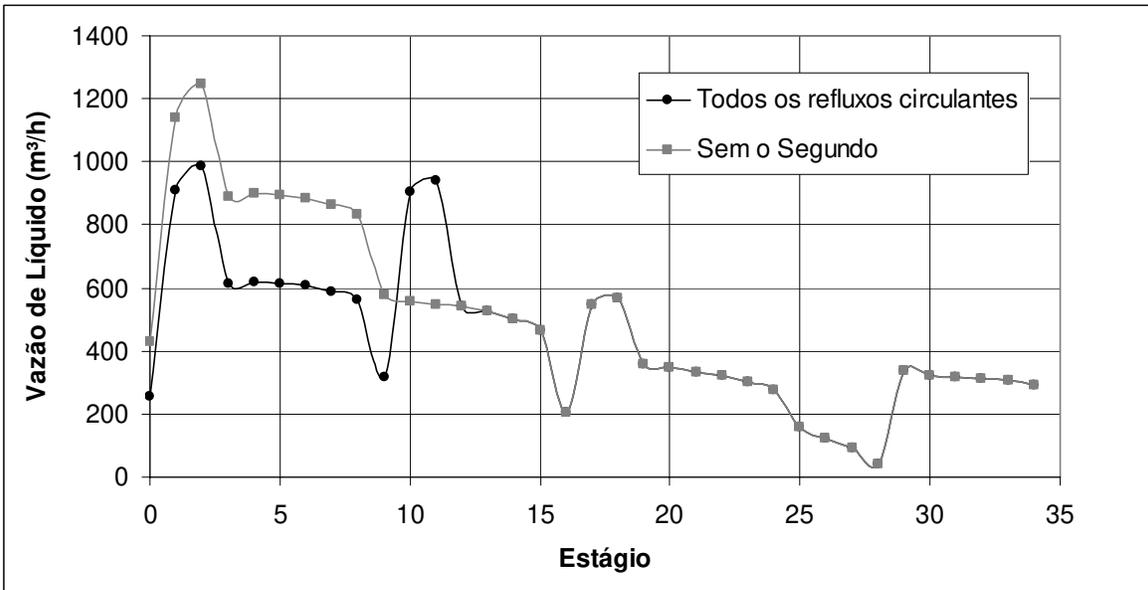


Figura 3.33: Perfil de vazão de líquido em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do segundo refluxo circulante.

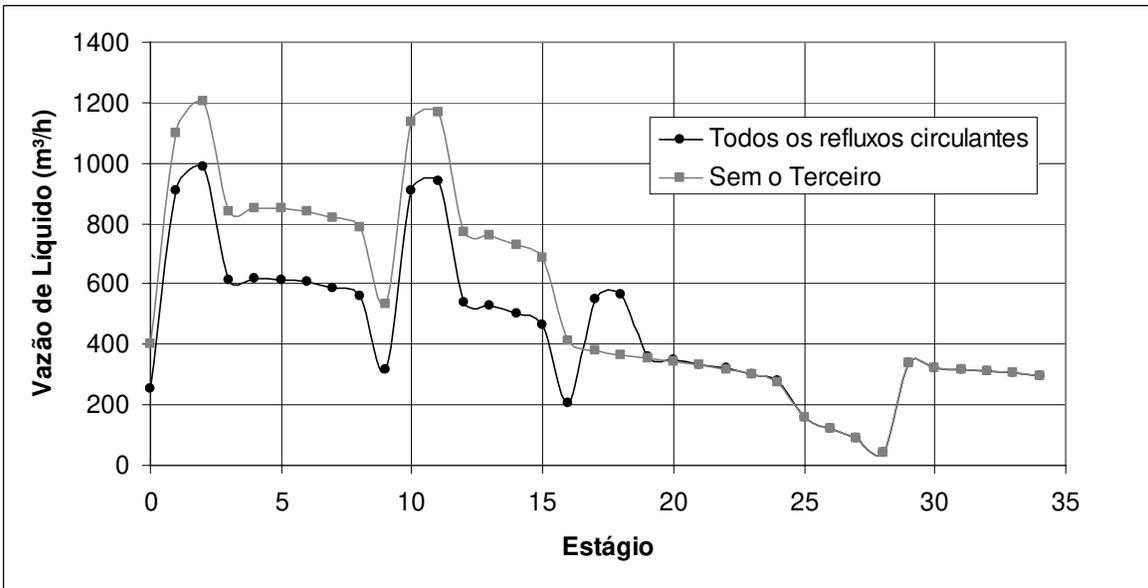


Figura 3.34: Perfil de vazão de líquido em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do terceiro refluxo circulante.

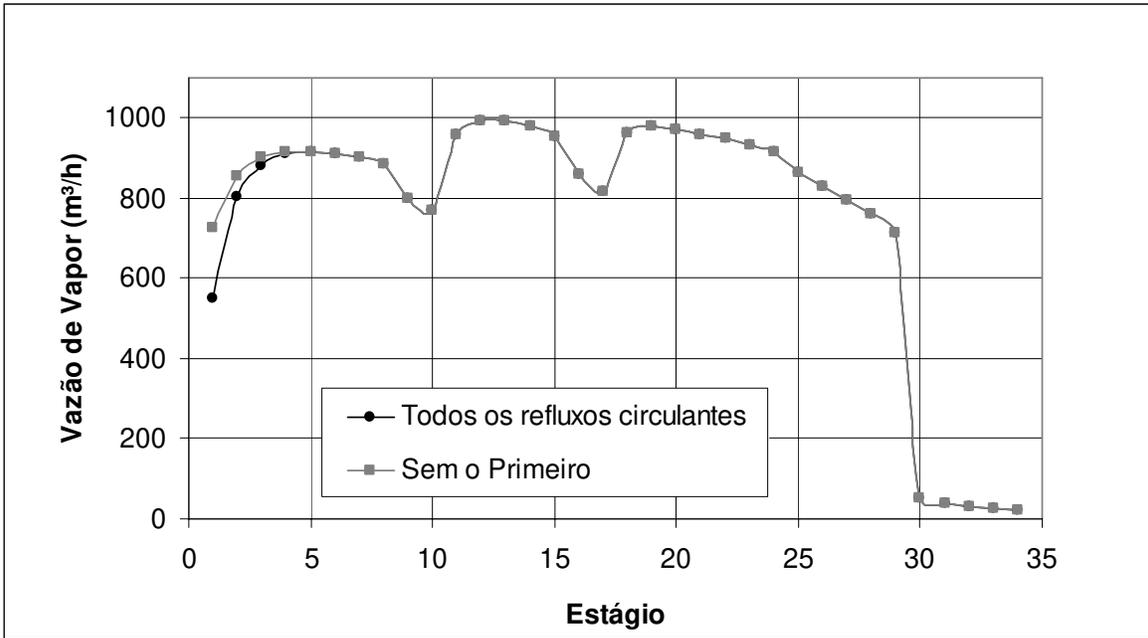


Figura 3.35: Perfil de vazão de vapor em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do primeiro refluxo circulante.

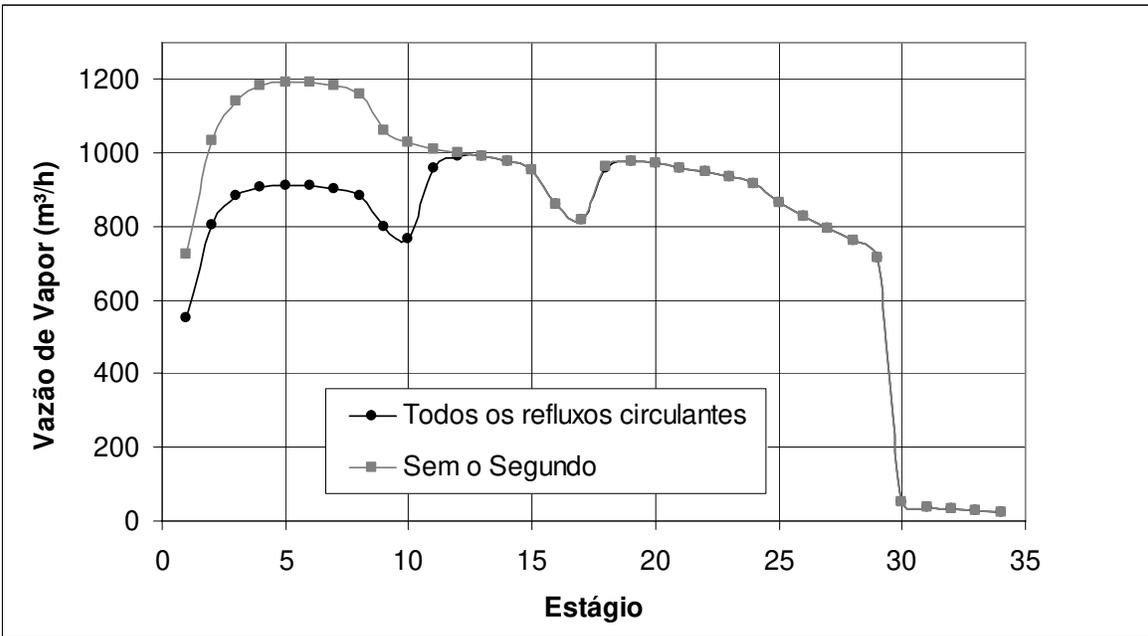


Figura 3.36: Perfil de vazão de vapor em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do segundo refluxo circulante.

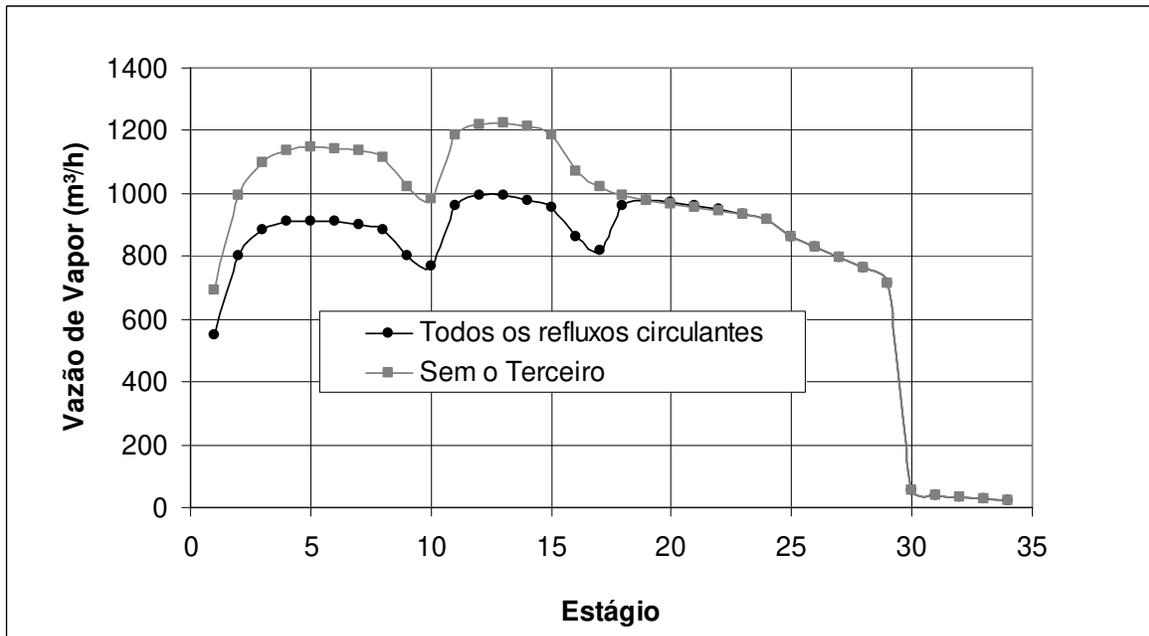


Figura 3.37: Perfil de vazão de vapor em função dos estágios na presença de todos os refluxos circulantes e na remoção do terceiro refluxo circulante.

Bagajewicz (1996) estudou a influência do refluxo circulante em coluna atmosférica em termos de variação da carga térmica do primeiro refluxo circulante. O autor comparou os resultados obtidos em duas simulações. Na primeira, a carga térmica do refluxo circulante próximo ao topo da coluna foi especificada em $50 \cdot 10^6$ Btu/h. Na segunda simulação, esta mesma carga térmica foi especificada em zero Btu/h, desta maneira, a corrente do refluxo circulante sai e retorna na coluna sem resfriar.

Neste trabalho, a análise do refluxo circulante foi realizada, retirando-o completamente. Desta forma, a análise levou em consideração que uma retirada do refluxo circulante faz com que não exista nenhuma corrente líquida saindo de um estágio e retornando a outro. Isto significa que é analisada a influência que a coluna sofre sem a presença da corrente líquida.

3.3.6.1) RETIRADA DO PRIMEIRO REFLUXO CIRCULANTE

De acordo com a Tabela 3.14, a partir do décimo segundo estágio, os resultados não apresentaram diferença entre as duas situações (com e sem o primeiro refluxo circulante), mostrando nenhum efeito.

Analisando-se os resultados da Tabela 3.14 e Figura 3.32, a vazão de líquido na presença de todos os refluxos circulantes é maior para o primeiro e segundo estágios quando comparado à vazão de líquido sem o primeiro refluxo circulante. Isso ocorre porque há uma corrente de líquido extra, além do refluxo, retornando à coluna no primeiro estágio quando não é retirado o refluxo circulante. Entretanto, além disso, a vazão da corrente de refluxo apresentou-se menor no caso em que não se retirou o primeiro refluxo circulante.

O aumento na vazão de líquido não se mostrou significativo, já que na Figura 3.32, as vazões de líquido, praticamente, são idênticas na presença de todos os refluxos circulantes e na ausência do primeiro refluxo circulante a partir do terceiro estágio, inclusive.

Em termos de vazão de vapor, o comportamento do efeito da retirada do primeiro refluxo circulante foi o seu aumento até o décimo segundo estágio em comparação ao da coluna operando com os três refluxos circulantes, de acordo com dados da Tabela 3.14. Na Figura 3.35, esse aumento é significativo praticamente até o terceiro estágio, já que as vazões de vapor na presença de todos os refluxos circulantes e sem o primeiro apresentaram-se idênticos a partir do quarto estágio.

Conforme Figura 3.29, a retirada do primeiro refluxo circulante provocou um aumento de temperatura em determinados estágios da coluna, já que não há entrada de uma corrente líquida mais fria descendo ao longo da coluna para o resfriamento estágios abaixo. Conseqüentemente, com o aumento de temperatura nos estágios, menos vapor foi condensado, resultando em seu aumento devido à ausência do primeiro refluxo circulante, apresentado na Tabela 3.14 e observado na Figura 3.35.

A retirada do primeiro refluxo circulante resultou em um aumento da carga térmica do condensador devido ao aumento da vazão de vapor topo da coluna que foi totalmente condensado. Para que uma maior vazão de vapor seja condensada totalmente, uma maior carga térmica do condensador é necessária. Devido ao aumento da vazão de

vapor que sai do topo da coluna e é condensado totalmente quando se retira o primeiro refluxo circulante, uma quantidade maior de refluxo ocorreu, conforme mencionado anteriormente, já que a retirada de nafta permaneceu constante. Além disso, a retirada do refluxo circulante provocou a redução do PFE da nafta, de acordo com a Tabela 3.14, enquanto que as outras frações não foram modificadas em termos de PFE e temperatura ASTM D86. O Gap 5-95 (Querosene-Nafta, Diesel-Querosene e Gasóleo-Diesel) praticamente não sofreu alterações com a retirada do primeiro refluxo circulante em relação ao Gap 5-95 obtido na simulação com todos os refluxos circulantes.

3.3.6.2) RETIRADA DO SEGUNDO REFLUXO CIRCULANTE

Os resultados obtidos para verificar a influência da retirada do segundo refluxo circulante foram analisados em comparação com os resultados obtidos para a coluna operando com os três refluxos circulantes.

De acordo com as Tabelas 3.14 e 3.15, pode-se observar o aumento da vazão de líquido nos estágios 10 (retorno do refluxo circulante), 11 e 12 (retirada do refluxo circulante) na presença de todos os refluxos circulantes em comparação ao perfil de vazão de líquido da coluna sem o segundo refluxo circulante. Na Figura 3.33, esse aumento é significativo nos estágios 10 e 11 quando o segundo refluxo circulante não é retirado. Esse aumento de fluxo é coerente, pois na presença do refluxo circulante, há fluxo de líquido extra, retornando à coluna, juntamente com o fluxo de líquido do estágio acima.

Os estágios maiores que o décimo segundo, praticamente, não sofreram variações quanto à vazão de líquido com a retirada do refluxo circulante, de acordo com a Figura 3.33. Nos estágios menores que o nono, a vazão de líquido na coluna sem o segundo refluxo circulante é maior em relação à vazão de líquido na coluna operando com três refluxos circulantes, conforme dados da Tabela 3.14 e 3.15 e Figura 3.33.

A vazão de vapor aumentou consideravelmente com a retirada do segundo refluxo circulante acima do décimo segundo estágio (estágio de retirada do refluxo circulante) devido à maior temperatura nos estágios (apresentada na Figura 3.30), conforme dados na Tabela 3.14 e 3.15 e apresentados na Figura 3.36. O aumento de temperatura foi provocado pela retirada do segundo refluxo circulante, já que não há uma corrente líquida mais fria

retornando à coluna para resfriar os estágios abaixo e permitir que o vapor condense menos. Na presença de todos os refluxos circulantes, a corrente líquida mais fria que retorna à coluna no décimo estágio reduz a temperatura dos estágios abaixo. Isso significa que a redução de temperatura dos estágios abaixo implica que o vapor nestes estágios tenha sua temperatura reduzida também. Com uma temperatura menor em relação àquela no caso em que é retirado o refluxo circulante, o vapor que vem destes estágios e sobe em direção ao topo da coluna possibilita a redução de temperatura dos estágios acima do refluxo circulante também. Conforme explicado acima, com a retirada do segundo refluxo circulante, o vapor que vem abaixo do refluxo circulante e sobe ao topo não permite a redução de temperatura dos estágios acima, resultando no aumento de temperatura observado nos estágios de acordo com os resultados obtidos na Figura 3.30. Esse aumento de temperatura nos estágios quando o refluxo circulante é retirado faz com que menos vapor seja condensado em cada estágio. Assim, isso resultou no aumento da vazão de vapor observado com a retirada do segundo refluxo circulante, conforme mencionado anteriormente e observado na Figura 3.36.

Como a retirada de nafta manteve-se constante e a vazão de vapor condensado que saiu do condensador aumentou quando se retirou o refluxo circulante, a razão de refluxo aumentou, intensificando ainda mais o aumento da vazão de líquido nos estágios inferiores até o estágio de retirada de querosene conforme comentado anteriormente e resultados apresentados na Figura 3.33.

O aumento de vapor que sai do topo da coluna devido à retirada do segundo refluxo circulante provocou o aumento da carga térmica do condensador já que é necessária uma carga térmica maior para condensar totalmente uma maior vazão de vapor.

Segundo Watkins (1979), a introdução de um refluxo circulante penaliza a transferência de massa. Conforme resultados obtidos na Tabela 3.16, o PFE da nafta e querosene foi reduzido com a retirada do segundo refluxo circulante, indicando que a fração se tornou mais leve. Além disso, o Gap 5-95 (Querosene-Nafta e Diesel-Querosene) aumentou com a retirada do segundo refluxo circulante (Tabela 3.16), mostrando uma pequena melhora no fracionamento Querosene-Nafta e Diesel-Querosene em relação à coluna operando com todos os refluxos circulantes. Desta forma, estes resultados mostram concordância com a afirmação de Watkins em relação ao fato do refluxo circulante penalizar a transferência de massa, ou seja, sua remoção melhora o fracionamento.

3.3.6.3) RETIRADA DO TERCEIRO REFLUXO CIRCULANTE

A retirada do terceiro refluxo circulante provocou a mudança nas vazões de líquido e vapor na coluna em comparação às vazões de líquido e vapor na coluna operando com três refluxos circulantes. Em relação aos resultados obtidos (Tabela 3.15 – terceiro refluxo circulante retirado) e apresentados nas Figuras 3.34 e 3.37 quando o terceiro refluxo circulante é retirado em comparação aos obtidos com a presença dos três refluxos circulantes (Tabela 3.14), pode-se observar que:

- 1) Nos estágios que fazem parte do circuito do terceiro refluxo circulante, a vazão de líquido diminuiu com a retirada do terceiro refluxo circulante, de acordo com a Figura 3.34, apresentando o mesmo comportamento causado pelas mesmas razões descritas no caso da retirada do segundo.
- 2) Comparando-se à vazão de líquido nos estágios acima do 17º, a vazão de líquido é maior em relação à coluna operando com três refluxos circulantes, conforme Figura 3.34. Enquanto que, a partir do 19º estágio, o fluxo de líquido, praticamente, não sofre alterações.
- 3) Aumento da vazão de vapor acima do 19º estágio em comparação ao fluxo de vapor da coluna operando com três refluxos circulantes, conforme Figura 3.37.
- 4) Aumento da temperatura nos estágios menores que o vigésimo quarto.
- 5) Aumento da carga térmica do condensador e razão de refluxo.
- 6) Alteração das propriedades das frações retiradas de acordo com a Tabela 3.16. É possível observar que o Gap 5-95 (Querosene-Nafta e Diesel-Querosene) com a retirada do terceiro refluxo circulante é maior em relação aos obtidos com a presença de todos os refluxos circulantes e sem a presença do segundo refluxo circulante. Desta forma, pode-se ver uma melhora no fracionamento entre querosene- nafta e diesel-querosene.

É interessante observar que as implicações mais importantes na retirada deste refluxo circulante são: aumento da vazão de vapor acima dos estágios do circuito do refluxo retirado, aumento da vazão de líquido acima do 17º estágio, aumento da carga térmica do condensador, aumento da razão de refluxo e alteração das frações retiradas acima dos estágios do circuito do refluxo retirado. Estes resultados mostram um comportamento

semelhante à retirada do segundo e do primeiro refluxo circulante devido às mesmas razões descritas acima.

De acordo com os resultados obtidos, a retirada do refluxo circulante provoca o aumento de temperatura nos estágios, conforme resultados obtidos nas Figuras 3.29 a 3.31. Isso significa que um aumento de temperatura implica em uma menor condensação do vapor em cada estágio. Conseqüentemente, com a retirada do refluxo circulante, ocorre o aumento da vazão de vapor nos estágios acima da corrente de retirada do refluxo circulante (exceto no caso da retirada do primeiro refluxo circulante) e no topo, conforme apresentado nas Figuras 3.35, 3.36 e 3.37. Isso resulta no aumento da carga térmica do condensador, já que ocorreu o aumento da vazão de vapor no topo a ser condensado totalmente. Com isso, a razão de refluxo aumenta, resultando no aumento observado da vazão de líquido em todos os estágios acima do qual a corrente de retorno do refluxo circulante retorna na retirada do segundo e terceiro refluxo circulante.

Na Figura 3.33, fica evidente o aumento de líquido nos estágios 10 e 11 devido à presença do segundo refluxo circulante. O mesmo ocorre para os estágios 17 e 18 na presença do terceiro refluxo circulante (Figura 3.34). Retirando-se o primeiro refluxo circulante, o efeito principal está no aumento da vazão da corrente de refluxo, na redução significativa da vazão de líquido no segundo e terceiro estágio e principalmente, no aumento da vazão de vapor no topo da coluna (isso implica em uma maior carga térmica de condensador).

O aumento na carga térmica do condensador pode ser verificado nos resultados presentes nas Tabela 3.14 e 3.15. Através destas tabelas, pode-se observar que as cargas térmicas do condensador, retirando-se cada um dos três refluxos circulantes são maiores que aquela observada na presença de todos os refluxos circulantes. A remoção do segundo e do terceiro refluxo circulante causaram um aumento no Gap 5-95 (Querosene-Nafta e Diesel-Querosene) em relação ao Gap 5-95 na presença de todos os refluxos circulantes, indicando uma melhora no fracionamento entre Querosene-Nafta e Diesel-Querosene, conforme resultados obtidos na Tabela 3.16.

3.3.7) AVALIAÇÃO DOS ESTÁGIOS DA COLUNA ATMOSFÉRICA

Segundo as especificações de projeto da coluna atmosférica da Tabela 3.1, o número de estágios é de 34. Watkins recomenda determinadas faixas de números de estágios entre certas correntes laterais. Neste trabalho, a configuração de coluna atmosférica (localização de retiradas laterais e número de estágios) considerada no trabalho de Bagajewicz (2001) é seguida. Desta forma, foi analisado o efeito dos estágios entre as retiradas. Espera-se que a variação de estágios influencie no fracionamento entre produtos. Assim, torna-se importante verificar como essa variação ocorre e o quanto influencia nas retiradas dos produtos e de resíduo. Neste caso, a influência e o efeito causado na variação do número de estágios foram verificados e analisados em relação ao caso base (Bagajewicz *et al.* (2001) apresenta a configuração de projeto (localização de estágios)).

A variação de estágios será realizada em três seções:

- 1) Entre a retirada de produtos adjacentes.
- 2) Entre a zona flash e a retirada do 25º estágio (gasóleo).
- 3) Entre a alimentação e a corrente de resíduo.

Para estas simulações, foram consideradas as especificações do caso base, estabelecido anteriormente, exceto as vazões de produtos. Neste caso, a variação do número de estágios ocorre apenas na seção em que é estudada, enquanto que o número de estágios de outras seções é fixado e segue a Tabela 3.1. No caso base, o segundo e o terceiro refluxo circulante estão localizados no estágio imediatamente abaixo da retirada de querosene e diesel. Ao se variar o número de estágios entre as retiradas de produtos, foi considerado que os refluxos circulantes sempre permaneçam logo abaixo das correntes de diesel e querosene.

3.3.7.1) Variação do número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação

Somente o número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação é variado, enquanto que o número de estágios entre as retiradas de produtos (nafta-querosene,

querosene-diesel e diesel-gasóleo) e da seção de esgotamento (alimentação - resíduo) são mantidos constantes. De maneira que o número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação seja variado, a posição da alimentação e o número de estágios total da coluna foram variados, ao mesmo tempo em que as demais especificações permanecem constantes (posição da retirada de todos os produtos - Tabela 3.1), incluindo a posição dos circuitos dos refluxos circulantes. A Tabela 3.17 apresenta a localização da posição de alimentação e a de resíduo para cada número de estágios total.

As especificações do caso base estabelecido anteriormente são consideradas, exceto a vazão de retirada dos produtos. Neste caso, o PFE de cada produto é especificado e mantido constante, segundo a Tabela 3.18. Basicamente, o objetivo principal é verificar o rendimento obtido de cada produto, principalmente de gasóleo, com a variação do número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação, mostrando a influência do número de estágios em termos de fracionamento e separação nos estágios acima a zona de flash (expansão).

Tabela 3.17: Localização da posição de alimentação e resíduo em função do número total de estágio.

| Corrente | Estágio | | | | | | | | | |
|---------------------------------|-------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | Alimentação | 28 | 29 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| Resíduo | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| Número de estágios total | 33 | 34 (Caso Base) | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |

Tabela 3.18: Especificação do PFE (ASTM D86) dos produtos para as simulações realizadas.

| Produtos | PFE (ASTM D86) |
|-----------|----------------|
| Nafta | 190°C |
| Querosene | 280°C |
| Diesel | 350°C |
| Gasóleo | 425°C |

Os principais resultados apresentam-se nas Tabelas 3.19 e 3.20. As vazões obtidas de cada produto e de resíduo em função do número de estágios estão presentes na Tabela 3.19. Neste caso, ocorreu variação do número de estágios entre a retirada de gásóleo e a alimentação. Já na Tabela 3.20, estão presentes o Gap 5-95 (Gásóleo-Diesel), Razão de Refluxo e Taxa de Sobrevaporizado em função do número de estágios.

Tabela 3.19: Vazões de resíduo e produtos obtidos em função da variação do número de estágio total.

| | Número de estágios total | | | | |
|--------------------------------|---------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|
| Vazão (m³/h) | 33 | 34 (Caso Base) | 35 | 36 | 37 |
| Nafta | 274,7 | 274,7 | 274,7 | 274,7 | 274,7 |
| Querosene | 162,3 | 162,4 | 162,4 | 162,4 | 162,3 |
| Diesel | 166 | 165,2 | 165 | 164,9 | 165,2 |
| Gasóleo | 45,4 | 61,4 | 67,2 | 70,1 | 71,6 |
| Resíduo | 308,8 | 294 | 288 | 285,1 | 283,4 |
| | Número de estágios total | | | | |
| Vazão (m³/h) | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| Nafta | 274,7 | 274,8 | 274,8 | 274,8 | 274,8 |
| Querosene | 162,5 | 162,5 | 162,5 | 162,5 | 162,5 |
| Diesel | 165,1 | 164,9 | 164,9 | 164,9 | 164,9 |
| Gasóleo | 72,4 | 73,1 | 73,4 | 73,6 | 73,6 |
| Resíduo | 283 | 281,9 | 281,6 | 281,4 | 281,3 |

Tabela 3.20: Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel), Razão de Refluxo e Vazão de Sobrevaporizado em função da variação do número de estágios.

| | Número de estágios total | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | 33 | 34 | 35 | 36 | 37 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) (°C) | 0,9 | 0,4 | 0,6 | 0,9 | 1,1 |
| Razão de Refluxo | 0,93 | 0,927 | 0,927 | 0,928 | 0,929 |
| Vazão de Sobrevaporizado (m³/h) | 69,7 | 42,8 | 34 | 29,7 | 27,2 |
| Taxa de Sobrevaporizado (m³/h) | 7,30% | 4,47% | 3,55% | 3,10% | 2,84% |
| | Número de estágios total | | | | |
| | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) (°C) | 1,2 | 1,3 | 1,4 | 1,5 | 1,6 |
| Razão de Refluxo | 0,929 | 0,929 | 0,93 | 0,93 | 0,931 |
| Vazão de Sobrevaporizado (m³/h) | 25,9 | 25 | 24,5 | 24,16 | 24 |
| Taxa de Sobrevaporizado (m³/h) | 2,70% | 2,61% | 2,56% | 2,52% | 2,51% |

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 3.19, o aumento do número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação permitiu, principalmente, um aumento na vazão de retirada de gasóleo e uma redução na vazão de resíduo. Entretanto, as vazões de nafta, querosene e diesel não mostraram, praticamente, variação.

O aumento do número de estágios contribuiu para que ocorresse um maior fracionamento, permitindo que uma maior quantidade de componentes do gasóleo fosse obtida a partir do resíduo. Mas, conforme resultados, este aumento (variação) não influencia mais na retirada de gasóleo e resíduo para, praticamente, estágios maiores que 40, ou seja, a coluna atmosférica com estágios maiores que 40 não sofre mais efeito significativo na retirada de gasóleo e de resíduo (maior fracionamento).

As Figuras 3.38 e 3.39 ilustram os principais resultados, mostrando o comportamento da vazão de gasóleo e resíduo em função do número de estágios total,

respectivamente, a partir de dados da Tabela 3.19. Neste caso, somente o número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação foi variado. De acordo com estas figuras e com análise feita anteriormente por meio dos valores da Tabela 3.19, pode-se observar que para colunas com mais 40 estágios, praticamente, a vazão de gasóleo não aumenta e a vazão de resíduo não diminui.

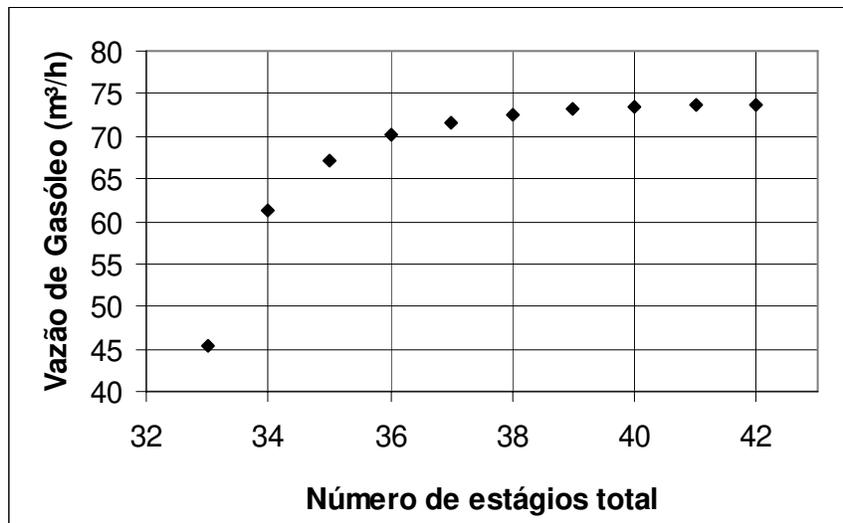


Figura 3.38: Vazão de Gasóleo obtida em função do número de estágio total.

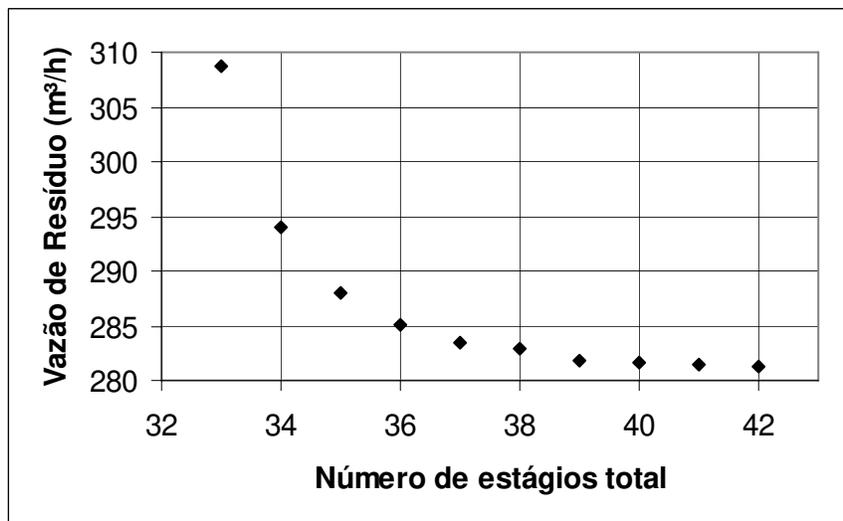


Figura 3.39: Vazão de Resíduo Atmosférico em função do número de estágio total.

De acordo com a Tabela 3.20, os resultados apresentam o Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel), Razão de refluxo, Razão de sobre vaporizado (e taxa) em função do número de estágios. A variação do Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) a cada estágio adicionado, de acordo com a Tabela 3.20, foi pequena e não se apresentou significativa. A variação total do Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) modificando o número de estágios de 34 pra 40 foi de apenas 1,2°C. Assim, o Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) praticamente não sofreu modificações e efeitos com a variação do número de estágios. Além disso, o Gap 5-95 (Querosene-Nafta e Diesel-Querosene) não foi afetado com a variação do número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação.

A redução do sobre vaporizado em função do aumento do número de estágios pode ser verificada na Tabela 3.20. Isso ocorreu devido ao melhor fracionamento entre a retirada de gasóleo e a alimentação, já que uma quantidade maior quantidade do fluxo de líquido foi incorporada na retirada de gasóleo e não se dirigiu aos estágios abaixo para o fundo da coluna. A razão de refluxo não sofreu, praticamente, nenhuma alteração.

O aumento do número de estágios apenas influenciou no fracionamento para uma maior retirada de gasóleo. Assim, isto significa que ocorreu uma maior volatilização dos componentes mais leves que se incorporaram na corrente de gasóleo e não, na de resíduo. Neste caso, o aumento do número de estágios ocorre somente entre a alimentação e a retirada de gasóleo, enquanto que o número de estágios entre a retirada de nafta e querosene, diesel e querosene e, a alimentação e o resíduo (seção de esgotamento) permanecem fixo. Esse aumento de estágios contribuiu somente para um melhor fracionamento para a obtenção de gasóleo e, conseqüentemente, para uma tentativa de minimizar a quantidade de resíduo. Watkins recomenda que 3 a 4 estágios estejam entre a alimentação (zona de expansão) e a primeira retirada. No caso base, há quatro estágios (incluindo o estágio de alimentação).

A Tabela 3.21 mostra a porcentagem em volume obtida a mais de gasóleo e que foi reduzida do resíduo com a variação do número de estágios em comparação ao caso base, isto é, com a adição de estágios entre a alimentação.

Tabela 3.21: Porcentagem em volume de gásóleo e resíduo, obtidos com a variação do número de estágios.

| Número de estágios | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 | 41 | 42 |
|---------------------------------|-----|------|------|------|------|------|------|------|
| % em volume obtida de gásóleo | 9,4 | 14,2 | 16,6 | 17,9 | 19,1 | 19,5 | 19,8 | 19,9 |
| % em volume reduzida de resíduo | 2,0 | 3,0 | 3,6 | 3,7 | 4,1 | 4,2 | 4,3 | 4,3 |

A porcentagem em volume de gásóleo apresentada na Tabela 3.21 é referente à quantidade de gásóleo a mais obtida em relação à vazão do caso base com a variação de estágios (aumento), ou seja, quando um ou mais estágios são adicionados. Neste caso, a porcentagem de resíduo é reduzida (redução de resíduo quando estágios são acrescidos – Ver Tabela 3.20) com o aumento do número de estágios.

Pode-se observar que o efeito do aumento do número de estágios não influencia no fracionamento de gásóleo a partir de 40 estágios, já que a variação da porcentagem de gásóleo obtido e resíduo que foi reduzida não é significativa com a adição de estágios, isto é, a diferença de 0,4% entre as porcentagens de 40 para 42 estágios (=19,9%-19,5%) não se apresenta significativo.

Reduzindo-se de 34 para 33 estágios, há a redução de 26,1% da vazão de gásóleo em comparação ao caso base (34 estágios) e o aumento de 5,1% da vazão de resíduo.

Foi realizada a simulação para 32 estágios da coluna atmosférica. Entretanto, não foi possível a determinação dos rendimentos dos produtos, pois a simulação computacional não convergiu. Isso ocorreu porque o número de estágios entre a alimentação e a retirada de gásóleo não foi capaz e suficiente para promover o adequado fracionamento para se obter gásóleo na especificação estabelecida (PFE = 425°C) na Tabela 3.18. Desta forma, com apenas 32 estágios, a corrente de gásóleo que se pode obter deve ser mais pesada, ou seja, gásóleo só é obtido com um PFE superior a 425°C nestas condições. Para verificar se isto realmente ocorreu, foram feitas várias simulações para se determinar o PFE mínimo acima de 425°C, especificando diversos valores de PFE. O mínimo valor de PFE encontrado foi de 436°C. Isto significa que para 32 estágios (dois estágios entre a retirada e a alimentação), gásóleo só pode ser obtido com um PFE de 436°C, mantendo-se as outras especificações de produtos constantes. Assim, a redução do número de estágios para 32

estágios permite somente a obtenção de gasóleo mais pesado (PFE = 436°C), já que o número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação não possibilita um fracionamento adequado para o gasóleo em que os componentes que deveriam fazer parte do resíduo são incorporados na corrente de gasóleo.

3.3.7.2) Variação nos estágios da seção de esgotamento

As simulações foram realizadas, variando-se o número de estágios da seção de esgotamento, isto é, aumentando-se o número de estágios na seção da coluna entre a alimentação e o fundo da coluna.

As especificações feitas para o caso base foram mantidas, exceto as vazões de retiradas dos produtos. Neste caso, foram consideradas as especificações da Tabela 3.18 conforme o item anterior, alterando-se apenas o número de estágios da seção de esgotamento. A localização dos produtos e dos refluxos circulantes não é alterada (igual ao caso base), além disso, como o número de estágio da seção de esgotamento é modificado, a corrente de alimentação também não é alterada, já que a numeração é feita do topo para o fundo da coluna. Assim, para um número de 33 e 32 estágios, foram removidos um e dois estágios, respectivamente dos cinco estágios (30° ao 34° estágio) presentes na seção de esgotamento da coluna atmosférica do caso base (total de 34 estágios). Da mesma forma, em cada simulação realizada, um, dois e quatro estágios foram adicionados para um número total de 35, 36 e 38 estágios, respectivamente. Os principais resultados apresentam-se na Tabela 3.22 a seguir.

Tabela 3.22: Vazões de resíduo e produtos obtidos em função da variação do número de estágios da seção de esgotamento.

| Número de estágios total | 32 | 33 | 34 (Caso Base) | 35 | 36 | 38 |
|-----------------------------|-------|-------|----------------|-------|-------|-------|
| Diesel (m ³ /h) | 163,5 | 165,0 | 165,2 | 165,7 | 166 | 166,5 |
| Gasóleo (m ³ /h) | 60,9 | 61,0 | 61,4 | 61,6 | 61,8 | 62,0 |
| Resíduo (m ³ /h) | 296,0 | 294,5 | 294,0 | 292,9 | 292,3 | 291,6 |

O aumento do número de estágios da seção de esgotamento não foi capaz de aumentar o fracionamento do resíduo para que sua vazão fosse reduzida significativamente, de acordo com a Tabela 3.22. Por exemplo, a adição de quatro estágios na seção de esgotamento da coluna com 34 estágios (caso base) provocou uma diferença percentual em relação ao caso base de 0,81%. Da mesma forma, reduzindo-se dois estágios do caso base (34 estágios), a diferença percentual foi de 0,68%.

Conforme resultados da Tabela 3.22, diesel e gasóleo praticamente não tiveram suas vazões de retirada modificadas, significativamente. Além disso, as retiradas de nafta e querosene não sofreram variações.

3.3.7.3) Variação do número de estágios entre as retiradas de produtos

3.3.7.3.1) Retirada de gasóleo e diesel

As especificações consideradas para estas simulações são as mesmas apresentadas no item anterior, exceto o número de estágios entre a retirada de gasóleo e diesel que foi variado. A localização da corrente de retirada e retorno das colunas de *stripping* 1 e 2 permaneceu idêntica à Tabela 3.1, além dos circuitos dos refluxos circulantes.

A Tabela 3.23 apresenta a localização da corrente de retirada e retorno da coluna de *stripping* 3 (de gasóleo), da corrente de alimentação e de resíduo em função da variação do número de estágios da Coluna Atmosférica. Já, a Tabela 3.24 mostra os principais resultados obtidos com as simulações realizadas, variando-se o número de estágios entre a retirada de gasóleo e diesel.

Tabela 3.23: Localização das correntes de retirada e retorno da Coluna de *Stripping* 3, alimentação e resíduo em função do número de estágios da Coluna Atmosférica.

| Número de estágios | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Coluna de <i>Stripping</i> 3 (Gasóleo) - Retirada | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 |
| Coluna de <i>Stripping</i> 3 (Gasóleo) - Retorno | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| Alimentação | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Resíduo | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
| Número de estágios | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Coluna de <i>Stripping</i> 3 (Gasóleo) - Retirada | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |
| Coluna de <i>Stripping</i> 3 (Gasóleo) - Retorno | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Alimentação | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
| Resíduo | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |

Tabela 3.24: Principais resultados obtidos nas simulações em função do número de estágio total (variação do número de estágios na seção entre a retirada de gasóleo e diesel).

| Número de estágios total | 31 | 32 | 33 | 34 (Caso base) | 35 |
|----------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|-----------|
| Vazão (m³/h) | | | | | |
| Diesel | 142,1 | 153,9 | 160,8 | 165,2 | 168,2 |
| Gasóleo | 86,4 | 73,9 | 66,4 | 61,45 | 57,9 |
| Resíduo | 290,6 | 291,9 | 292,8 | 294 | 294,1 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) | -4,5 | -3 | -1,7 | 0,4 | 1,2 |
| Número de estágios total | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Vazão (m³/h) | | | | | |
| Diesel | 170,4 | 172,5 | 173,2 | 174,0 | 174,8 |
| Gasóleo | 55,4 | 53,41 | 52 | 51,2 | 50 |
| Resíduo | 294,5 | 294,9 | 295,2 | 295,2 | 295,6 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) | 1,7 | 2,1 | 2,3 | 2,5 | 2,7 |

As Figuras 3.40 e 3.41 apresentam os gráficos de vazão de diesel e gasóleo em função do número de estágios total, respectivamente, a partir de dados da Tabela 3.24. Neste caso, a variação do número de estágios ocorreu entre a retirada de gasóleo e diesel.

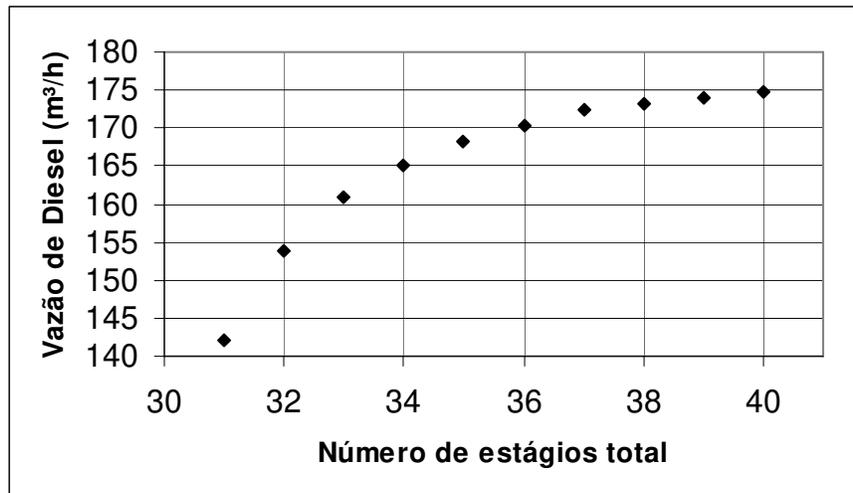


Figura 3.40: Vazão de Diesel obtida em função do número de estágio total.

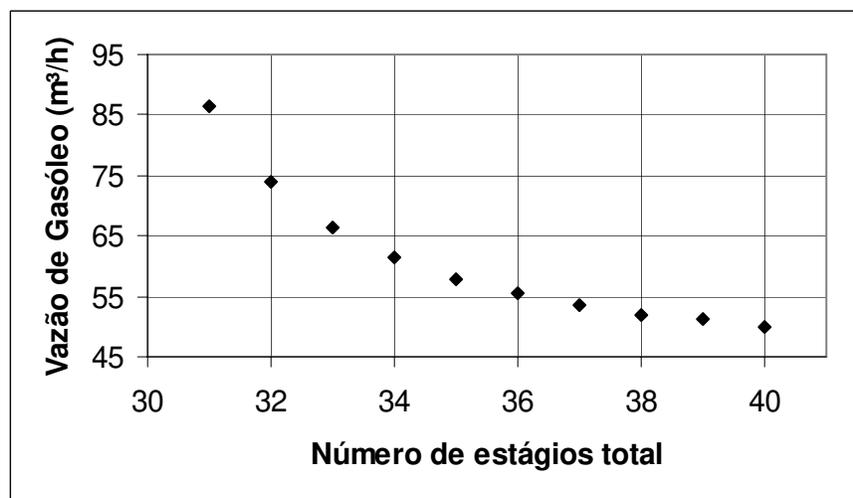


Figura 3.41: Vazão de Gasóleo obtida em função do número de estágio total.

De acordo com as Figuras 3.40 e 3.41, observa-se que a vazão de retirada de diesel aumentou, enquanto que a de gasóleo diminuiu em função do aumento do número de

estágios. Além disso, praticamente, a vazão de resíduo não sofreu variação significativa, nafta e querosene não tiveram suas vazões alteradas.

O aumento do número de estágios entre a retirada de gasóleo e diesel permitiu que mais diesel fosse obtido, entretanto, gasóleo teve sua vazão reduzida. Este comportamento indica que ocorreu um maior fracionamento, resultando numa maior volatilização dos componentes mais leves que se incorporaram na fração mais leve (diesel) e não, na mais pesada.

Pode-se observar que, de acordo com a Tabela 3.24, a quantidade de resíduo não foi reduzida significativamente, apesar do aumento do número de estágios, influenciando apenas na maior obtenção de diesel.

Apesar do aumento da retirada de diesel devido ao número de estágios adicionados, pode-se observar pelos resultados obtidos que para 40 estágios, somente 5,8% de diesel a mais puderam ser obtidos em comparação ao que foi retirado na coluna do caso base de 34 estágios. Isto significa que inserindo seis estágios entre a retirada de diesel e gasóleo (número de estágios total igual a 40), é possível obter 5,8% em volume a mais de diesel. Além disso, isso ocorreu ao mesmo tempo em que 18,6% em volume de gasóleo não são retirados quando o número de estágios é de 40.

Ao reduzirmos o número de estágios para 33, 32 e 31, a porcentagem da vazão de diesel não removido em relação ao caso base (34 estágios) é de 2,7%, 6,8% e 14%, enquanto que a porcentagem de gasóleo removida a mais em relação ao caso base foi de 8,1%, 20,3% e 40,6%, respectivamente. Já para o resíduo, a porcentagem de vazão que não foi removida foi de 0,4%, 0,7% e 1,2% quando o número de estágios era de 33, 32 e 31, respectivamente. Estas porcentagens em termos de vazão foram obtidas de acordo com os valores da Tabela 3.24.

Em termos de fracionamento, segundo resultados da Tabela 3.24, o Gap 5-95 (Gasóleo – Diesel) sofreu um aumento em função do número de estágios inseridos, o que indica que o grau de fracionamento entre as duas frações aumentou. Esse comportamento apresentou-se coerente, pois, se o fracionamento aumentou devido ao aumento do número de estágios, o Gap 5-95 deve aumentar, já que este é uma variável que representa o grau de separação (fracionamento) entre duas frações. O aumento do número de estágios permite uma maior volatilização dos componentes mais leves, aumentando o grau de separação

entre duas frações, fazendo com que os componentes mais leves estejam mais presentes na fração mais leve e os componentes mais pesados na fração mais pesada. Já, o Gap 5-95 (Diesel–Querosene) e (Nafta – Querosene) não tiveram variações em função do aumento do número de estágios.

3.3.7.3.2) Retirada de diesel e querosene

Neste caso, as simulações foram realizadas, adotando-se as mesmas especificações realizadas no item anterior (retirada de gasóleo e diesel), exceto a localização das correntes de retiradas e retorno das colunas de *stripping* 2 e 3 (diesel e gasóleo), alimentação e resíduo, já que a seção de estágios entre a retirada de diesel e querosene foi variada. Além disso, a localização do terceiro refluxo circulante foi alterada para que este esteja logo abaixo da retirada de diesel como no caso base, pois a corrente de retirada de diesel foi alterada devido à variação do número de estágios.

A Tabela 3.25 apresenta a localização das correntes que foram modificadas com a variação do número de estágios da Coluna Atmosférica (somente variação do número de estágios entre a retirada de diesel e de querosene).

Tabela 3.25: Localização das correntes de retirada e retorno da Coluna de *Stripping* 2 e 3, alimentação e resíduo em função do número de estágios da Coluna Atmosférica.

| Número de estágios | 32 | 33 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
|---|-------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|
| Corrente | Localização do estágio | | | | | | | |
| Coluna de <i>Stripping</i> 2 (Diesel) - Retirada | 14 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| Coluna de <i>Stripping</i> 2 (Diesel) - Retorno | 13 | 14 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| Terceiro Refluxo Circulante – Retirada | 17 | 18 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |
| Terceiro Refluxo Circulante – Retorno | 15 | 16 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Coluna de <i>Stripping</i> 3 (Gasóleo) – Retirada | 23 | 24 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | 31 |
| Coluna de <i>Stripping</i> 3 (Gasóleo) – Retorno | 22 | 23 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Alimentação | 27 | 28 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
| Resíduo | 32 | 33 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |

A Tabela 3.26 apresenta os principais resultados obtidos para estas simulações em que o número de estágios entre a retirada de diesel e querosene foi variado (variação do número de estágios total).

A partir dos dados da Tabela 3.26, as Figuras 3.42 e 3.43 foram construídas. Segundo estas figuras, o aumento do número de estágios permitiu uma maior obtenção de querosene, enquanto que a vazão de retirada de diesel foi reduzida.

Observando-se os resultados da Tabela 3.26, conforme o aumento do número de estágios, a vazão de retirada de gasóleo aumentou. Entretanto, a variação da vazão de retirada de gasóleo a cada estágio adicionado em relação à vazão de retirada do caso base apresentou-se pequena em comparação ao querosene e diesel. Além disso, nafta e resíduo não tiveram suas vazões reduzidas significativamente.

Com o aumento do número de estágios entre as retiradas de querosene e diesel, um maior fracionamento nesta seção da coluna atmosférica foi obtido, permitindo que uma maior quantidade de querosene fosse retirada, isto é, uma maior quantidade de componentes mais leve que foi volatilizada e incorporada na corrente do produto mais leve (querosene) e não, na mais pesada (diesel).

Tabela 3.26: Principais resultados obtidos nas simulações em função do número de estágios total (variação do número de estágios entre a retirada de diesel e querosene).

| Número de estágios | 32 | 33 | 34 (Caso Base) | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
|---|-----------|-----------|---------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Vazão (m³/h) | | | | | | | | | |
| Querosene | 130,8 | 151 | 162,3 | 169,1 | 173,8 | 177,1 | 182,8 | 188,5 | 192,5 |
| Diesel | 198,3 | 177,2 | 165,2 | 157,9 | 152,8 | 149,1 | 142,9 | 136,7 | 132,2 |
| Gasóleo | 58,64 | 60,3 | 61,5 | 62,13 | 62,6 | 63,09 | 63,8 | 64,54 | 65,1 |
| Resíduo | 293,8 | 293,7 | 294,0 | 293,5 | 293,5 | 293,5 | 293,4 | 293,4 | 293,3 |
| Gap 5-95 (Nafta- Querosene) | 23,1 | 24,6 | 25,6 | 26,2 | 26,6 | 26,9 | 27,4 | 27,9 | 28,2 |
| Gap 5-95 (Diesel- Querosene) | 4,2 | 9,4 | 10,9 | 14,5 | 14,9 | 15,0 | 12,3 | 11,8 | 11,9 |
| Gap 5-95 (Gasóleo - Diesel) | 2,5 | 1,2 | 0,4 | -0,1 | -0,5 | -0,8 | -2,3 | -2,8 | -3,2 |

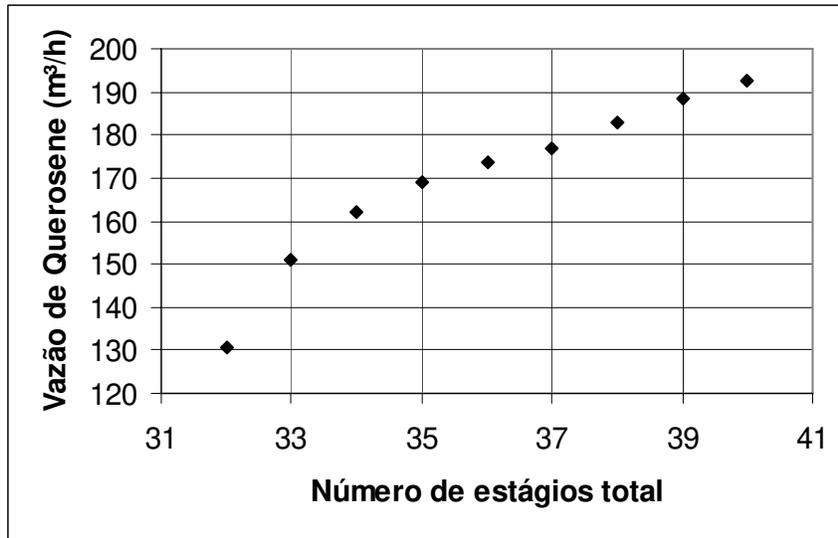


Figura 3.42: Vazão de Querosene obtida em função do número de estágio total.

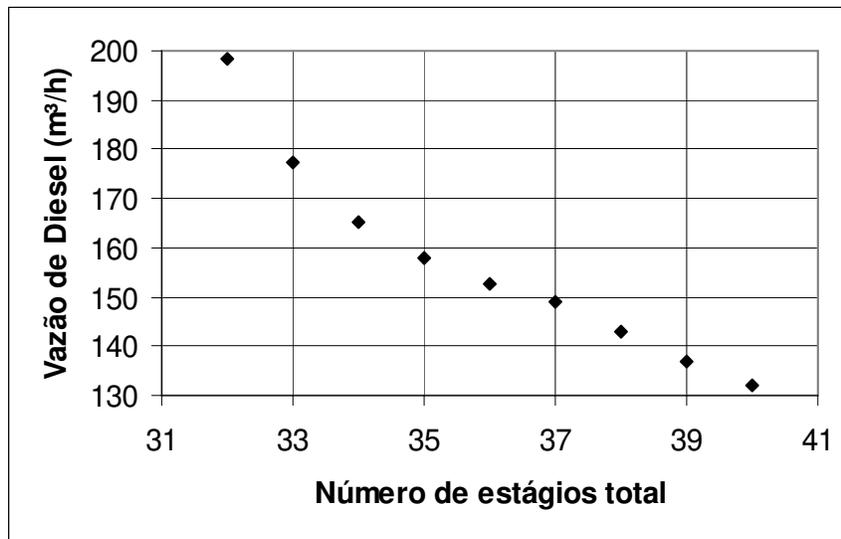


Figura 3.43: Vazão de Diesel obtida em função do número de estágio total.

A Tabela 3.27 apresenta a porcentagem em volume (diferença porcentual entre a vazão para um determinado estágio e a do caso base) de querosene, diesel e gasóleo, utilizando-se os valores da Tabela 3.26. Conforme o número de estágios aumenta segundo a Tabela 3.27, a porcentagem em volume a mais removida de querosene e de gasóleo em relação ao caso base também aumenta. Entretanto, pode-se verificar que os valores de porcentagem a mais removida de gasóleo apresentaram-se menores que o de querosene,

mostrando um efeito pequeno na variação de retirada em função da variação do número de estágios entre na seção da coluna considerada.

A porcentagem em volume de diesel retirada a menos que é removida em relação ao caso base aumenta em função do aumento do número de estágios, isto é, este comportamento indica a redução da vazão de retirada de diesel em função do aumento do número de estágios entre a retirada de diesel e querosene. Para 32 e 33 estágios, a porcentagem em volume que é retirado a menos de querosene em relação ao caso base é de 19,4% e 7,0%, já para o gasóleo, 4,6% e 1,9%, respectivamente, já que neste caso a vazão de retirada de ambos os produtos nestes estágios é menor que a do caso base. A porcentagem em volume que é removida a mais em relação ao caso base para o diesel é de 20,0% e 7,3% para 32 e 33 estágios, respectivamente.

Tabela 3.27: Diferença percentual em volume dos produtos em relação ao caso base.

| Número de estágios | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
|--|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| % em volume a mais removida de querosene | 4,19 | 7,09 | 9,12 | 12,63 | 16,14 | 18,61 |
| % em volume a menos removida de diesel | 4,42 | 7,51 | 9,75 | 13,50 | 17,25 | 19,98 |
| % em volume a mais removida de gasóleo | 1,11 | 1,87 | 2,67 | 3,82 | 4,94 | 5,94 |

As Figuras 3.44, 3.45 e 3.46 apresentam a variação do Gap 5-95 (Querosene-Nafta, Diesel-Querosene e Gasóleo-Diesel) em função do número de estágios entre a retirada de diesel e querosene, respectivamente, utilizando os dados da Tabela 3.26.

Na Figura 3.44, o Gap 5-95 (Querosene-Nafta) sofreu um aumento em função do aumento do número de estágios, melhorando o fracionamento entre querosene e nafta. Entretanto, de acordo com a Figura 3.46, o Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) reduziu conforme aumento do número de estágios, mostrando que o grau de fracionamento entre gasóleo e diesel reduziu.

O comportamento do Gap 5-95 (Diesel-Querosene) foi seu aumento conforme o aumento do número de estágios, do 32 ao 36, segundo valores da Tabela 3.26 e Figura 3.45. A partir do estágio 37, o Gap 5-95 (Diesel-Querosene) decresce com o aumento do número de estágios. De acordo com a Figura 3.45, o Gap 5-95 (Diesel-Querosene) alcança seu máximo valor no estágio 37 e para estágios maiores começa a decrescer. Este comportamento da variável Gap 5-95 pode indicar que a partir do estágio 37, o grau de separação entre querosene e diesel não aumenta, ao contrário, apesar do aumento do número de estágios e do aumento da vazão de querosene. Isto pode ter ocorrido porque a partir de 37 estágios, adicionando-se mais estágios, não somente uma maior volatilização dos componentes mais leves ocorreu nesta seção de coluna considerada, mas também, as dos mais pesados. Conseqüentemente, como ocorreu a volatilização de uma parcela de componentes mais pesados, o Gap 5-95 (Diesel-Querosene) sofreu redução, indicando a incorporação destes componentes no diesel.

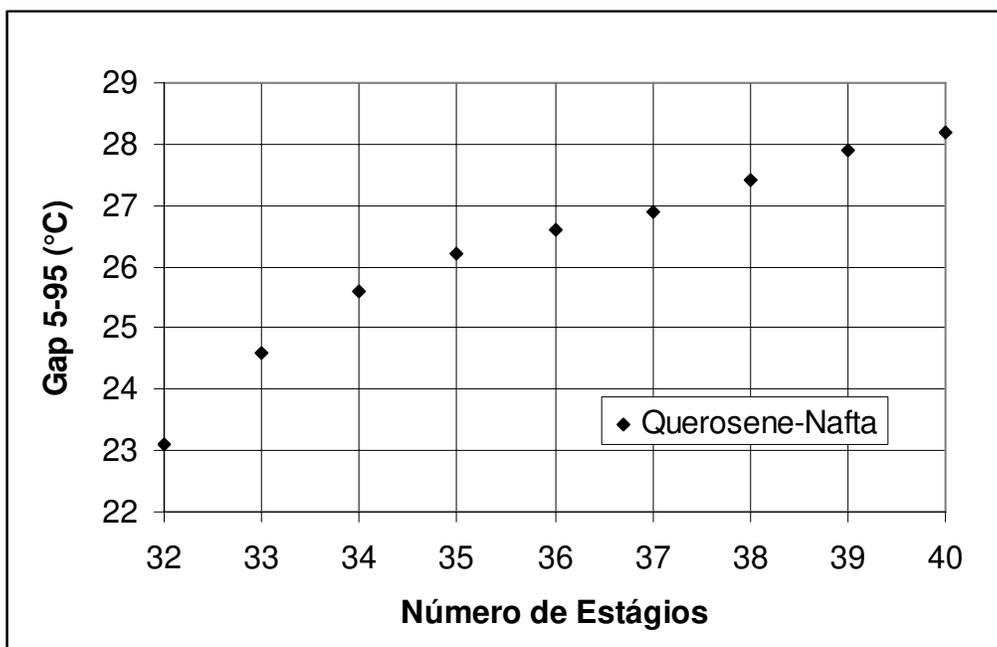


Figura 3.44: Gap 5-95 (Querosene-Nafta) em função do número de estágios.

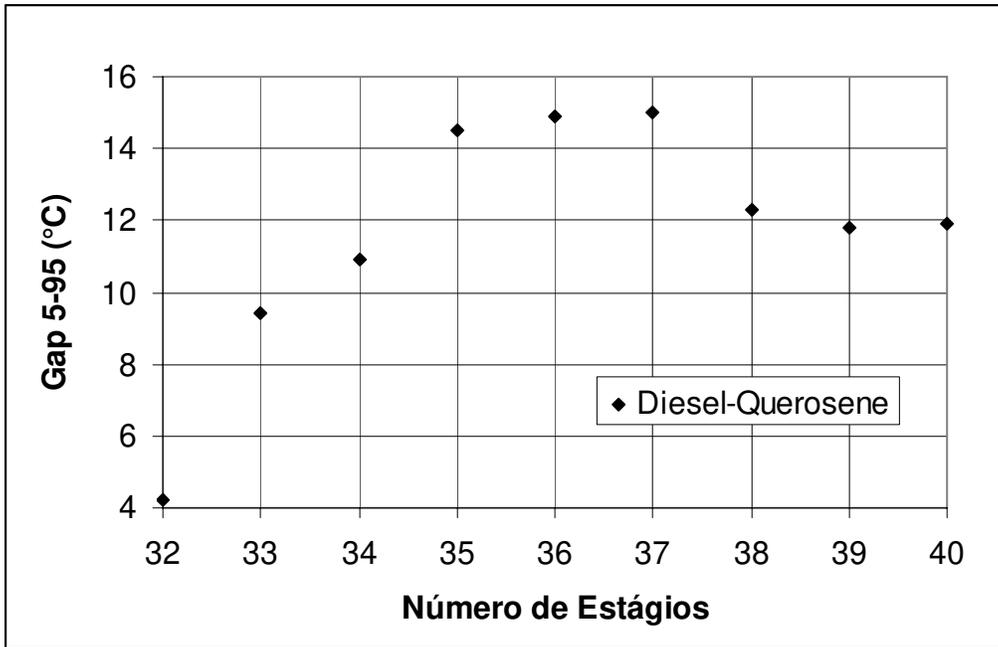


Figura 3.45: Gap 5-95 (Diesel-Querosene) em função do número de estágios.

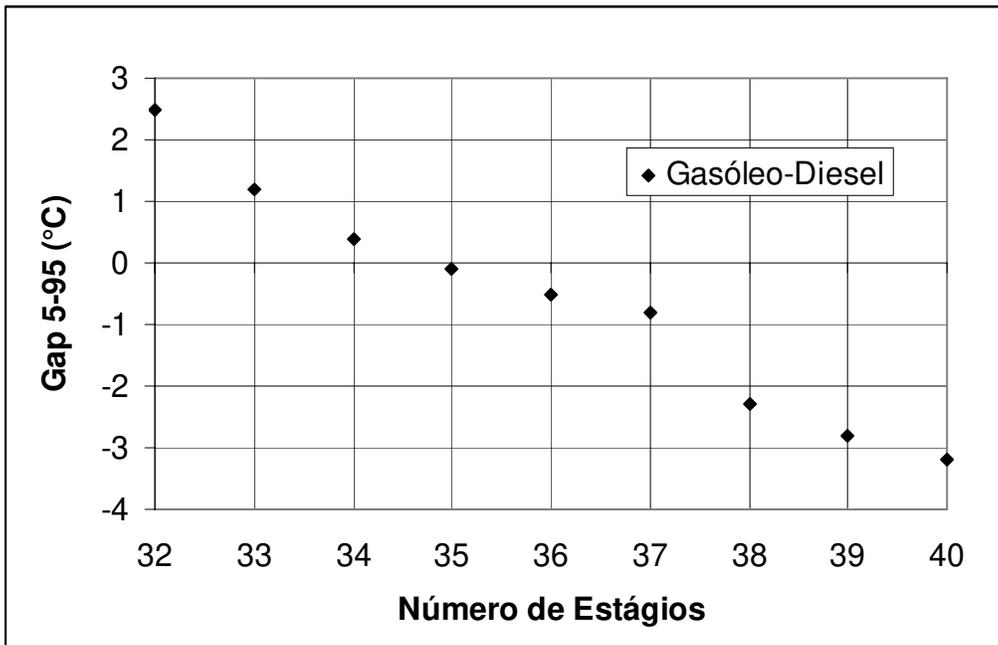


Figura 3.46: Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) em função do número de estágios.

3.3.7.3.3) Retirada de nafta e querosene

As simulações realizadas mantiveram as especificações dos casos anteriores e alteraram apenas o número de estágios entre as seções de nafta e querosene. De acordo com a Tabela 3.28, a localização das correntes de retirada e retorno das colunas de *stripping* 1, 2 e 3, do circuito do refluxo circulante que foi alterado, de alimentação e de resíduo são apresentadas.

Os resultados das simulações apresentam-se na Tabela 3.29, mostrando as vazões de retirada dos produtos e o Gap5-95 em função do número de estágios total.

Tabela 3.28: Localização das correntes de retirada e retorno da coluna de *Stripping* 1, 2 e 3, alimentação e resíduo em função do número de estágios da Coluna Atmosférica.

| | | | | | | | | |
|--|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Número de estágios | 32 | 33 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Coluna de Stripping 1 (Nafta) – Retirada | 7 | 8 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
| Coluna de Stripping 1 (Nafta) – Retorno | 6 | 7 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 |
| Coluna de Stripping 2 (Diesel) – Retirada | 14 | 15 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 |
| Coluna de Stripping 2 (Diesel) – Retorno | 13 | 14 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 |
| Coluna de Stripping 3 (Gasóleo) – Retirada | 23 | 24 | 26 | 27 | 26 | 29 | 30 | 31 |
| Coluna de Stripping 3 (Gasóleo) – Retorno | 22 | 23 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Alimentação | 27 | 28 | 30 | 31 | 32 | 33 | 34 | 35 |
| Resíduo | 32 | 33 | 35 | 36 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Segundo Refluxo Circulante – Retirada | 8 | 9 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Segundo Refluxo Circulante – Retorno | 10 | 11 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 |
| Terceiro Refluxo Circulante – Retirada | 15 | 16 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 |
| Terceiro Refluxo Circulante – Retorno | 17 | 18 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 |

Tabela 3.29: Principais resultados obtidos nas simulações em função do número de estágios (variação do número de estágios entre a retirada de nafta e querosene).

| Número de estágios total | 32 | 33 | 35 | 36 |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Vazão (m³/h) | | | | |
| Nafta | 263,3 | 270 | 278,1 | 280,6 |
| Querosene | 175,5 | 167,8 | 158,4 | 155,4 |
| Diesel | 163,4 | 164,5 | 165,8 | 166,2 |
| Gasóleo | 61,57 | 61,5 | 61,3 | 61,3 |
| Resíduo | 293,4 | 293,5 | 293,6 | 293,7 |
| Gap 5-95 (Nafta-Querosene) | 25 | 25,5 | 25,9 | 26,3 |
| Gap 5-95 (Diesel-Querosene) | 11,8 | 11,3 | 10,6 | 10,4 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |
| Número de estágios total | 37 | 38 | 39 | 40 |
| Vazão (m³/h) | | | | |
| Nafta | 282,6 | 284,0 | 285,0 | 285,9 |
| Querosene | 153,2 | 151,4 | 150,0 | 149,1 |
| Diesel | 166,5 | 166,8 | 167,0 | 167,2 |
| Gasóleo | 61,22 | 61,3 | 61,0 | 61,2 |
| Resíduo | 293,8 | 293,7 | 293,8 | 293,8 |
| Gap 5-95 (Nafta-Querosene) | 26,7 | 27,2 | 29 | 29,5 |
| Gap 5-95 (Diesel-Querosene) | 10,2 | 10,1 | 10,0 | 9,9 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) | 0,4 | 0,4 | 0,4 | 0,4 |

Observando-se os dados da Tabela 3.29, nafta e querosene sofreram as maiores variações de vazão de retirada conforme variação do número de estágios, enquanto diesel, gasóleo e resíduo não tiveram variações significativas. O efeito observado com o aumento do número de estágios entre a retirada de nafta e querosene é o aumento da vazão de retirada de nafta, ao mesmo tempo em que a vazão de querosene é reduzida. Isto significa que o aumento do número de estágios permitiu que mais nafta fosse obtida a partir de um maior fracionamento, ou seja, uma maior volatilização de componentes mais leves do querosene na seção da coluna, que foram incorporados na nafta. Apesar deste maior fracionamento, a vazão de resíduo não foi reduzida.

As Figuras 3.47 e 3.48 foram construídas a partir de dados da Tabela 3.29. Na Figura 3.47, pode-se observar o aumento da vazão de nafta em função do aumento número de estágios (variação do número de estágios entre a retirada de nafta e querosene). Já na Figura 3.48, ocorre a redução de querosene em função do aumento do número de estágios.

A partir destas figuras, pode-se ilustrar e apresentar de forma clara o comportamento analisado anteriormente.

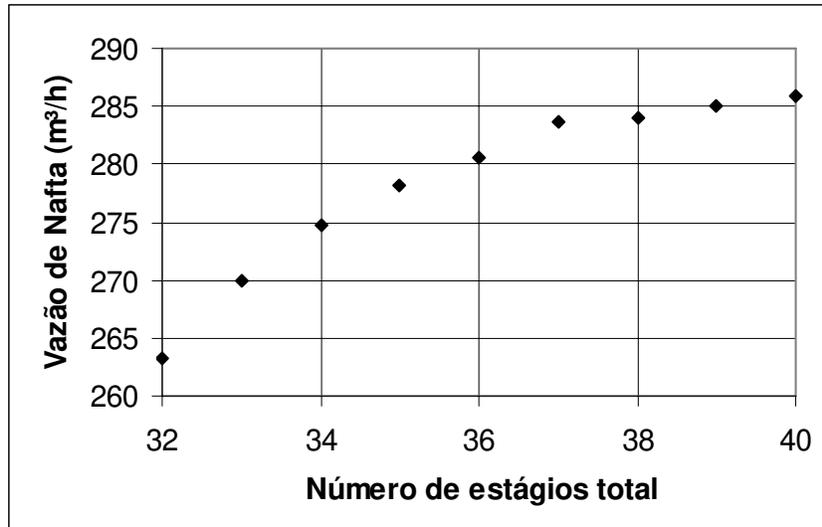


Figura 3.47: Vazão de Nafta obtida em função do número de estágio total.

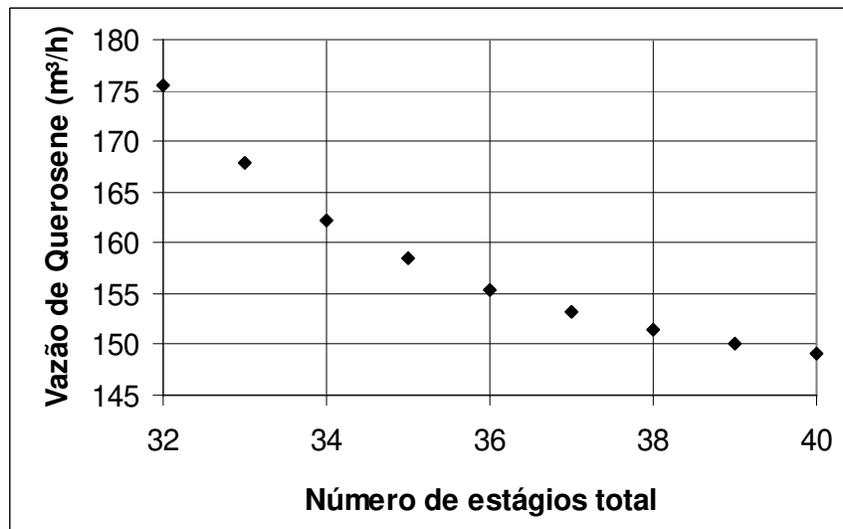


Figura 3.48: Vazão de Querosene obtida em função do número de estágio total.

O Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) não sofreu nenhuma alteração com a variação do número de estágios segundo a Tabela 3.29. Já o Gap 5-95 (Diesel-Querosene) sofreu variações, entretanto, pequenas a cada estágio adicionado (do 32 ao 40); além disso, pode-

se observar, conforme Tabela 3.29, a redução do Gap 5-95 (Diesel-Querosene) em função do aumento do número de estágios. As maiores variações para o Gap 5-95 (Querosene-Nafta) ocorreram a partir do número de estágios 36. Seu comportamento em função do aumento do número de estágios foi aumentar, de acordo com a Tabela 3.29. Este aumento do Gap 5-95 (Querosene-Nafta) indica que o grau de fracionamento entre nafta e querosene aumentou.

De acordo com os resultados das simulações realizadas para verificar a influência da variação do número de estágios nas seções da coluna atmosférica, pode-se verificar que:

- 1) O principal efeito do aumento do número de estágios entre a alimentação e a retirada de gasóleo foi a redução na vazão de retirada de resíduo e o aumento na vazão de retirada de gasóleo. Esta variação do número de estágios nesta seção da coluna permitiu um maior fracionamento entre resíduo e gasóleo, pois com o aumento do número de estágios entre a zona de expansão (zona flash) e retirada de gasóleo, a vaporização dos componentes de gasóleo do resíduo tornou-se maior e conseqüentemente, uma quantidade maior de gasóleo pode ser obtida.
- 2) A variação da vazão de resíduo com o aumento do número de estágios da seção de esgotamento não foi reduzida (minimizada) significativamente.
- 3) A influência do aumento do número de estágios entre as retiradas de produtos adjacentes avaliadas anteriormente consistiu, principalmente, em um maior fracionamento entre estes dois produtos, resultando em um aumento na vazão de retirada do produto mais leve. Com um fracionamento maior devido ao número de estágios, uma maior quantidade de componentes é volatilizada e retirada no estágio da fração mais leve cuja seção foi modificada.
- 4) Em termos de grau de fracionamento para avaliar a variação do número de estágios entre as retiradas dos produtos, o Gap 5-95 foi analisado. Observando-se o aumento do número de estágios entre a retirada de produtos, os Gap 5-95 das frações que aumentaram indicaram um comportamento esperado. Com o aumento do número de estágios, ocorre a volatilização dos componentes mais leves. O grau de fracionamento aumenta porque como essa maior volatilização ocorre a incorporação de componentes mais leves do produto pesado no produto mais leve, enquanto que os componentes mais pesados tendem a

permanecer no produto mais pesado. Entretanto, este comportamento não ocorreu para o Gap5-95 (Diesel-Querosene) quando se variou o número de estágios entre a retirada de querosene e diesel. Ocorreu a redução conforme aumento do número de estágios a partir de 37 estágios. Isto pode ter ocorrido porque com o aumento do número de estágios não somente há a volatilização dos componentes mais leves, mas também dos componentes mais pesados, influenciando na queda do grau de fracionamento.

3.3.8) AVALIAÇÃO DOS ESTÁGIOS DA COLUNA DE *STRIPPING*

O efeito da variação do número de estágios da coluna de *stripping* foi verificado através das simulações realizadas. O número de estágios foi modificado para as três colunas de *stripping* (querosene, diesel e gasóleo). As principais especificações estabelecidas para as simulações estão presentes na Tabela 3.18. Além disso, as especificações de projeto para a Coluna Atmosférica são as mesmas do caso base, estabelecido anteriormente (Tabela 3.1) com condensação total do vapor do topo da coluna. As duas colunas de *stripping* em que o número de estágios não é variado permanecem com quatro estágios.

Os resultados obtidos com a variação do número de estágios da coluna de *stripping* 1, 2 e 3 (querosene, diesel e gasóleo) nas simulações realizadas apresentam-se respectivamente nas Tabelas 3.30, 3.31 e 3.32. Os resultados apresentados para quatro estágios na coluna de *stripping* de querosene (além de diesel e gasóleo) da Tabela 3.30 referem-se ao caso base. Neste caso, os resultados do caso base não são apresentados novamente na Tabela 3.31 e 3.32.

Tabela 3.30: Principais resultados obtidos com a variação do número de estágios da coluna de *stripping* 1 (querosene).

| Número de estágios | 2 | 4 (Caso base) | 6 | 8 | 10 |
|---|--------|---------------|-------|--------|--------|
| Vazão de produtos (m ³ /h) | | | | | |
| Nafta | 272,7 | 274,7 | 275,5 | 275,9 | 276,1 |
| Querosene | 164,7 | 162,3 | 161,4 | 161 | 160,7 |
| Diesel | 164,8 | 165,2 | 165,3 | 165,4 | 165,5 |
| Gasóleo | 61,44 | 61,45 | 61,4 | 61,4 | 61,4 |
| Resíduo | 293,6 | 294 | 293,6 | 293,6 | 293,6 |
| Gap 5-95 (Querosene-Nafta) (°C) | 24,5 | 25,6 | 26,0 | 26,3 | 26,4 |
| Gap 5-95 (Diesel-Querosene) (°C) | 11,1 | 10,9 | 10,9 | 10,8 | 10,8 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) (°C) | 0,384 | 0,4 | 0,417 | 0,421 | 0,424 |
| Razão de Refluxo | 0,9198 | 0,927 | 0,93 | 0,9314 | 0,9321 |
| Carga térmica do condensador (10 ⁸ kJ/h) | 2,550 | 2,576 | 2,585 | 2,589 | 2,592 |

Tabela 3.31: Principais resultados obtidos com a variação do número de estágios da coluna de *stripping* 2 (diesel).

| Número de estágios | 2 | 3 | 5 | 6 | 8 | 10 |
|---|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| Vazão de produtos (m ³ /h) | | | | | | |
| Nafta | 274,3 | 274,7 | 274,7 | 274,8 | 274,8 | 274,8 |
| Querosene | 159,9 | 161,4 | 162,9 | 163,3 | 163,7 | 164 |
| Diesel | 168,3 | 166,3 | 164,5 | 164,1 | 163,6 | 163,3 |
| Gasóleo | 61,12 | 61,29 | 61,47 | 61,52 | 61,57 | 61,6 |
| Resíduo | 293,6 | 293,6 | 293,5 | 293,5 | 293,5 | 293,5 |
| Gap 5-95 (Querosene-Nafta) (°C) | 25,5 | 25,5 | 25,5 | 25,6 | 25,6 | 25,6 |
| Gap 5-95 (Diesel-Querosene) (°C) | 8,47 | 9,96 | 11,5 | 11,9 | 12,4 | 13,1 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) (°C) | 0,613 | 0,481 | 0,362 | 0,332 | 0,296 | 0,277 |
| Razão de Refluxo | 0,9105 | 0,9194 | 0,931 | 0,9335 | 0,9364 | 0,9379 |
| Carga térmica do condensador (10 ⁸ kJ/h) | 2,577 | 2,566 | 2,58 | 2,583 | 2,586 | 2,588 |

Tabela 3.32: Principais resultados obtidos com a variação do número de estágios da coluna de *stripping* 3 (gasóleo).

| Número de estágios | 2 | 3 | 5 | 6 | 8 | 10 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Vazão de produtos (m ³ /h) | | | | | | |
| Nafta | 274,7 | 274,7 | 274,8 | 274,8 | 274,8 | 274,7 |
| Querosene | 162,1 | 162,3 | 162,3 | 162,3 | 162,3 | 162,3 |
| Diesel | 163,8 | 164,7 | 165,6 | 165,7 | 166 | 166,2 |
| Gasóleo | 63,31 | 62,08 | 60,98 | 60,76 | 60,45 | 60,3 |
| Resíduo | 293,3 | 293,5 | 293,6 | 293,6 | 293,7 | 293,7 |
| Gap 5-95 (Querosene-Nafta) (°C) | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 25,6 | 25,6 |
| Gap 5-95 (Diesel-Querosene) (°C) | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 | 10,9 |
| Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) (°C) | -5,26 | -2,32 | 1,49 | 2,17 | 2,93 | 3,35 |
| Razão de Refluxo | 0,9179 | 0,9246 | 0,9277 | 0,9287 | 0,9298 | 0,918 |
| Carga térmica do condensador (10 ⁸ kJ/h) | 2,565 | 2,572 | 2,576 | 2,577 | 2,579 | 2,58 |

De acordo com os resultados obtidos na Tabela 3.30, pode-se verificar que ocorreu a variação da vazão de retirada de nafta e querosene em função do número de estágios da coluna de *stripping* 1, entretanto, esta variação foi pequena. Apesar da pequena variação de nafta e querosene, o aumento no número de estágios da coluna de *stripping* de querosene permitiu uma melhora no fracionamento entre a nafta e querosene, obtendo-se um pequeno aumento na retirada de nafta. Isso ocorreu porque com o aumento do número de estágios da coluna de *stripping* de querosene, a quantidade de componentes que saem da coluna de *stripping* e retornam à coluna principal aumentou, permitindo que a vazão de retirada de nafta aumentasse. Diesel, gasóleo e resíduo, praticamente, não sofreram variações na vazão de retirada.

O fracionamento entre a nafta e querosene não sofreu grandes variações, conforme o Gap 5-95 (Querosene-Nafta) na Tabela 3.30. O Gap 5-95 variou apenas 2°C, modificando de dois para dez estágios da coluna de *stripping* de querosene. Além disso, o Gap 5-95

(Diesel-Querosene e Gasóleo-Diesel), razão de refluxo e carga térmica do condensador não sofreram praticamente modificações.

Em função do aumento do número de estágios da coluna de *stripping* 2 (diesel), ocorreu um pequeno aumento da vazão de retirada de querosene e a redução na retirada de diesel, conforme Tabela 3.31. Pode-se verificar que não ocorre variação na vazão de retirada de querosene e diesel com o aumento do número de estágios maior do que cinco. Isto significa que, praticamente, não ocorreu variação significativa da vazão de retirada de querosene e diesel, aumentando-se o número de estágios para seis, oito ou dez, conforme Tabela 3.31. A redução na vazão de retirada de diesel ocorreu devido a uma maior quantidade de componentes que foi removida da corrente lateral de diesel com o aumento do número de estágios, indicando uma melhora no fracionamento.

Nafta, gasóleo e resíduo não sofreram variações na vazão de retirada, além disso, o Gap 5-95 (Querosene-Nafta e Gasóleo-Diesel), a razão de refluxo e a carga térmica do condensador, praticamente, não sofreram variações significativas, segundo a Tabela 3.31. Entretanto, o Gap 5-95 (Diesel-Querosene) apresentou aumento em função do aumento do número de estágios. Este aumento no Gap 5-95 indica que ocorreu uma melhora no fracionamento entre diesel e querosene com o aumento do número de estágios da coluna de *stripping* de diesel.

De acordo com os principais resultados obtidos na Tabela 3.32, a principal variável afetada foi o Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) com a variação do número de estágios na coluna de *stripping* de gasóleo. Apesar da pequena variação da vazão de retirada, pode-se verificar que o aumento do número de estágios da coluna de *stripping* de gasóleo permitiu que fosse retirado mais diesel e menos gasóleo.

Com o aumento do número de estágios da coluna de *stripping* de gasóleo, uma quantidade maior de componentes pode ser removida da corrente lateral de gasóleo, provocando sua redução na vazão de retirada e o aumento da vazão de diesel. Entretanto, esse efeito da variação do número de estágios mais significativo pode ser observado para um número de estágios menor que cinco. Devido a esta variação da vazão de retirada, o Gap5-95 (Gasóleo-Diesel) foi modificado, isto é, aumentou com o aumento do número de estágios da coluna de *stripping* de gasóleo, indicando uma melhora no fracionamento. O Gap 5-95 (Querosene-Nafta e Diesel-Querosene), a razão de refluxo e a carga térmica do

condensador, praticamente, não sofreram variações significativas, de acordo com a Tabela 3.32.

3.4) COLUNA DEBUTANIZADORA

Todo vapor proveniente da Torre Pré-Flash é processado na Coluna Debutanizadora. Esta é responsável pela obtenção de GLP e nafta. A principal função da Coluna Debutanizadora (Estabilizadora) é separar os componentes mais leves (GLP), isto é, os hidrocarbonetos com até quatro ou cinco carbonos da nafta obtida como produto de fundo para que esta não se volatilize (não ocorra perda de componentes) à pressão atmosférica. Segundo Neto (1999), as torres estabilizadoras são utilizadas para remover as frações instáveis (componentes mais leves) das naftas. Ao retirar estes componentes mais leves, a nafta (produto de fundo) torna-se estável, ou seja, não tem a tendência de se volatilizar a pressão atmosférica. A nafta que foi obtida como produto de fundo da Coluna Debutanizadora pode ser denominada de nafta estabilizada (NE), já que esta não se volatiliza à pressão atmosférica.

Algumas propriedades (especificações) são importantes para a caracterização de GLP e Nafta estabilizada.

1) Especificações do GLP

O Intemperismo é uma propriedade que representa a quantidade de pentanos e de componentes com massa molecular superior a estes. De acordo com Neto (1999), o intemperismo pode ser definido como a temperatura resultante da evaporação atmosférica de 95% do volume do GLP. Isto significa que se o intemperismo do GLP for de -2°C , o GLP a uma temperatura de -2°C terá 95% do seu volume volatilizado (evaporado) e os 5% restante do volume estará na forma de líquido. O resíduo no botijão pode ser representado pelos 5% que não estão na forma de vapor. A especificação de intemperismo é de -2°C na região sul do Brasil e de 2°C , no restante do Brasil. Esta propriedade é controlada em

refinarias, entretanto, a quantidade de componente chave pesado do GLP (iso-pentano) também pode ser controlada, já que estas duas propriedades estão relacionadas.

2) Especificações de nafta estabilizada

Uma das propriedades (especificação) para a nafta é a Pressão de Vapor Reid (PVR) definida anteriormente. Esta propriedade está relacionada à quantidade de butano e os componentes de menor massa molecular. Estes componentes presentes na nafta são voláteis e conseqüentemente, isso representa perda de componentes na nafta. O componente chave leve neste caso é n-butano, isto significa que se este for controlado ou seja, se sua composição for minimizada todos os outros mais leves que ele terão sua composições minimizadas também. Segundo Neto (1999), a pressão de vapor Reid é de no máximo 60 kPa, no Brasil.

3.4.1) CONSIDERAÇÕES PARA AS SIMULAÇÕES DA COLUNA DEBUTANIZADORA

Para as simulações da Coluna Debutanizadora, a temperatura de operação da Torre Pré-Flash foi especificada em 145°C e a pressão em 3 atm. A corrente de vapor da Torre Pré-Flash alimenta a Coluna Debutanizadora. Esta corrente é antes pressurizada e alimenta a Coluna Debutanizadora a uma pressão de 11 atm. As especificações da Coluna Debutanizadora apresentam-se no item 3.1 e Tabela 3.33 e foram mantidas constantes.

Tabela 3.33: Principais especificações da Coluna Debutanizadora para as simulações.

| Coluna Debutanizadora | |
|------------------------------|------------------------|
| Queda de Pressão | 10,5 - 11 atm |
| Vazão de retirada de GLP | 14,6 m ³ /h |

Além destas especificações, o condensador foi especificado para que todo o vapor do topo da coluna debutanizadora fosse condensado.

3.4.2) ESTUDO DO EFEITO DA VARIAÇÃO DA CARGA TÉRMICA DO REFERVEDOR

Uma avaliação do efeito da variação do calor do refervedor foi realizada para observar o comportamento das principais variáveis e propriedades relacionadas aos produtos GLP e nafta estabilizada (NE). Para as simulações, a vazão de retirada de GLP (Tabela 3.33) e as considerações para as simulações da Coluna Debutanizadora foram mantidas constantes. Assim, neste caso, para cada simulação foram especificados diferentes valores de carga térmica de refervedor e com a retirada de GLP fixa.

A Tabela 3.34 apresenta os principais resultados obtidos nas simulações da Coluna Debutanizadora, variando-se a carga térmica do refervedor. Com os resultados obtidos nas simulações da Tabela 3.34, foi observado como o calor do refervedor afeta diretamente a vaporização dos componentes, principalmente, chave-leve e chave-pesado, pois estes estão relacionados às propriedades do GLP e da nafta estabilizada. Com a retirada fixa, o aumento do calor do refervedor permitiu que componentes mais leves fossem incorporados nesta corrente. É interessante observar o comportamento dos componentes chaves que se distribuem e incorporaram tanto na corrente de GLP e NE, isto é, sua a composição de ambos e em termos de fração de recuperado na corrente.

Tabela 3.34: Principais resultados obtidos nas simulações realizadas para diversos valores de carga térmica de refeedor.

| Carga térmica do refeedor (10^6 kJ/h) | 3 (0,83 MW) | 4 (1,11 MW) | 5 (1,39 MW) | 6 (1,67 MW) | 7 (1,94 MW) |
|--|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| Resultados da simulação | | | | | |
| PVR (kPa) | 63,0 | 58,2 | 55,5 | 55,0 | 54,9 |
| Fração vol. i-C5 no GLP | $4,67 \cdot 10^{-2}$ | $2,12 \cdot 10^{-2}$ | $4,1 \cdot 10^{-3}$ | $5,64 \cdot 10^{-4}$ | $1,97 \cdot 10^{-4}$ |
| Fração vol. n-C4 no NE | $2,69 \cdot 10^{-2}$ | $1,44 \cdot 10^{-2}$ | $5,34 \cdot 10^{-3}$ | $3,42 \cdot 10^{-4}$ | $3,23 \cdot 10^{-4}$ |
| Recuperado no GLP (1) | 0,938 | 0,970 | 0,989 | 0,993 | 0,994 |
| Recuperado na NE (2) | 0,062 | 0,030 | 0,011 | 0,007 | 0,006 |
| Razão de Refluxo | 4,04 | 4,41 | 4,78 | 5,14 | 5,50 |
| Vazão de Refluxo (m^3/h) | 59 | 64,5 | 69,9 | 75,10 | 80,40 |
| Intemperismo ($^{\circ}C$) | 2,3 | -0,7 | -2,8 | -3,3 | -3,3 |

(1) Fração de recuperado dos componentes menores que iso-pentano na corrente de GLP

(2) Fração de recuperado dos componentes menores que iso-pentano na corrente de NE

De acordo com os resultados da Tabela 3.34, o aumento da carga térmica do refeedor provocou:

- 1) Redução da PVR.
- 2) Redução na composição de iso-pentano no GLP.
- 3) Redução na composição de n-butano na NE.
- 4) Aumento da fração de recuperado dos componentes menores que iso-pentano na corrente de GLP e consequentemente, redução da mesma na corrente de NE.
- 5) Aumento da razão de refluxo.
- 6) Redução do Intemperismo.

O efeito do aumento da carga térmica do refeedor na PVR da NE não foi significativo quando a carga térmica foi alterada de $6 \cdot 10^6$ kJ/h para $7 \cdot 10^6$ kJ/h. Pode-se observar que ao se aumentar a carga térmica do refeedor a partir de $5 \cdot 10^6$ kJ/h, a variação

da PVR não é significativa, isto é, por exemplo, aumentando-se a carga térmica de 5.10^6 kJ/h para 7.10^6 kJ/h, a variação da PVR foi de apenas 1 kPa.

Aumentando-se a carga térmica do refulvedor de 6.10^6 kJ/h para 7.10^6 kJ/h, a fração de n-butano na corrente de NE tem uma variação pequena se comparada, por exemplo, de 5.10^6 kJ/h para 6.10^6 kJ/h. Desta forma, aumentando-se a carga térmica para valores maiores que 6.10^6 kJ/h, a variação da composição de n-butano é pequena. Isto indica que a carga térmica não tem mais influência sobre a composição de n-butano na corrente de NE. O mesmo comportamento do efeito do aumento da carga térmica do refulvedor pode ser observado para a fração de recuperado no GLP e o intemperismo (neste caso, não ocorreu variação ao aumentar de 6.10^6 kJ/h para 7.10^6 kJ/h, isto é, o intemperismo permaneceu constante em $-3,3^{\circ}\text{C}$).

Segundo os resultados da Tabela 3.34, o aumento na carga térmica do refulvedor permitiu que ocorresse uma maior separação entre o n-butano e o iso-pentano, já que ambas as concentrações foram reduzidas na corrente de NE e GLP, respectivamente. Isto provocou duas conseqüências importantes: a redução da PVR e do Intemperismo. A PVR foi reduzida devido à redução de n-butano. A redução da PVR na nafta indica que ocorreu redução na quantidade de frações leves na nafta, quanto menor a PVR, menor será a quantidade de frações leves na nafta. Esta redução implicou também na redução de iso-pentano e de outros componentes mais pesados. No caso do intemperismo, a redução na quantidade de iso-pentano provoca sua redução, isto é coerente, pois, menores quantidades de componentes mais pesados implicam em menores temperaturas para que se possa ocorrer a vaporização do GLP.

3.5) PROCESSO GLOBAL

A temperatura de operação do Pré-Flash foi estudada, avaliando seu efeito em todo o processo (Figura 3.1). Isso significa que foi possível analisar e estudar o comportamento do processo em função da influência da Torre Pré-Flash. De acordo com análise e estudo da Torre Pré-Flash, realizada anteriormente no item 3.2, o aumento da temperatura de alimentação (operação) da Torre Pré-Flash resulta no aumento da quantidade de vapor e redução da quantidade de líquido. Assim, a vazão de alimentação da Coluna

Debutanizadora aumenta e a da Coluna Atmosférica é reduzida. Com isto, as conseqüências sobre o processo e, principalmente, sobre os produtos foram estudadas e analisadas.

A Torre Pré-Flash foi considerada um flash isotérmico. Este é responsável apenas pela separação da corrente de vapor e líquido. Desta forma, a temperatura e a pressão de operação do Pré-Flash são iguais à temperatura e pressão da corrente de alimentação do Pré-Flash.

As simulações foram realizadas para cinco diferentes temperaturas de alimentação do Pré-Flash (135°C, 140°C, 145°C, 150°C e 155°C) a uma pressão e vazão constante de 3 atm e 1000 m³/h. A Tabela 3.35 apresenta as principais especificações para a Coluna Atmosférica e Debutanizadora. Ambas as colunas têm suas configurações de projeto fixadas de acordo com a Tabela 3.1 e o item 3.1. A temperatura e pressão de alimentação da coluna atmosférica são de 345°C e 1,8 atm, respectivamente, enquanto que a pressão de alimentação da Coluna Debutanizadora é de 11 atm. Estas condições de alimentação de ambas as colunas foram mantidas constantes.

Especificou-se que todos os condensadores de ambas as colunas (Atmosférica e Debutanizadora) operassem à condensação total, de modo que todo o vapor do topo da coluna fosse condensado para todas as simulações deste trabalho. A temperatura e pressão do vapor de água utilizado foram de 200°C e 3 atm.

Os resultados obtidos na Tabela 3.36 mostram que há influência significativa nos rendimentos de nafta estabilizada, nafta e GLP. Isso pode ser observado nas Figuras 3.49 e 3.50. Estas figuras apresentam as vazões de nafta, nafta estabilizada e GLP em função da temperatura de operação da Torre Pré-Flash.

Tabela 3.35: Variáveis especificadas para as simulações do processo.

| Coluna Debutanizadora | |
|---|---------------|
| Queda de Pressão | 10,5 – 11 atm |
| Composição volumétrica | |
| n-butano da NE | 0,5% |
| i-pentano do GLP | 0,5% |
| Coluna Atmosférica | |
| Queda de Pressão | 1-1,7atm |
| PFE da nafta (ASTM D86) | 190°C |
| PFE do querosene (ASTM D86) | 280°C |
| PFE do diesel (ASTM D86) | 350°C |
| PFE do gasóleo (ASTM D86) | 425°C |
| Vazão de Vapor de água | |
| Stripping de querosene (VQ) | 4690 kg/h |
| Stripping de diesel (VD) | 4630 kg/h |
| Stripping de gasóleo (VGO) | 3200 kg/h |
| Principal (VP) | 8000 kg/h |
| Carga térmica do 1° e 2° Refluxo Circulante | 19,44 MW |
| Carga térmica do 3° Refluxo Circulante | 16,67 MW |
| Vazão do 1° e 2° Refluxo Circulante | 400 m³/h |
| Vazão do 3° Refluxo Circulante | 200 m³/h |

Tabela 3.36: Resultados principais obtidos nas simulações do processo.

| | Temperatura de operação do Pré-Flash | | | | |
|--|---|-------|-------|-------|-------|
| | 135°C | 140°C | 145°C | 150°C | 155°C |
| Torre Pré-Flash | | | | | |
| Vazão de Vapor (m ³ /h) | 26,55 | 34,43 | 43,07 | 52,45 | 62,52 |
| Vazão de Líquido (m ³ /h) | 973,5 | 965,6 | 956,9 | 947,6 | 937,5 |
| Coluna Atmosférica | | | | | |
| Vazão de Nafta (m ³ /h) | 291,8 | 283,6 | 274,7 | 265,1 | 254,8 |
| Vazão de Querosene (m ³ /h) | 162,1 | 162,2 | 162,3 | 162,4 | 162,4 |
| Vazão de Diesel (m ³ /h) | 165,6 | 165,4 | 165,2 | 165,0 | 164,7 |
| Vazão de Gasóleo (m ³ /h) | 62,4 | 61,92 | 61,45 | 60,84 | 60,22 |
| Vazão de Resíduo (m ³ /h) | 291,9 | 292,7 | 293,6 | 294,5 | 295,6 |
| Q _{condensador} (MW) | 75,9 | 73,8 | 71,6 | 69,2 | 66,7 |
| Q _{alimentação} (MW) | 163,5 | 159,5 | 155,4 | 151,1 | 146,8 |
| Coluna Debutanizadora | | | | | |
| Vazão de GLP (m ³ /h) | 10,78 | 12,80 | 14,63 | 16,26 | 17,69 |
| Vazão de NE (m ³ /h) | 15,77 | 21,63 | 28,44 | 36,18 | 44,83 |
| Q _{condensador} (MW) | 2,77 | 3,60 | 4,51 | 5,48 | 6,53 |
| Q _{refervedor} (MW) | 0,86 | 1,12 | 1,39 | 1,68 | 1,97 |
| PFE da NE (°C) | 188 | 191 | 195 | 199 | 203 |
| PVR (kPa) | 59 | 57,2 | 55,3 | 53,4 | 51,4 |
| Intemperismo (°C) | -2,9 | -2,8 | -2,6 | -2,6 | -2,5 |

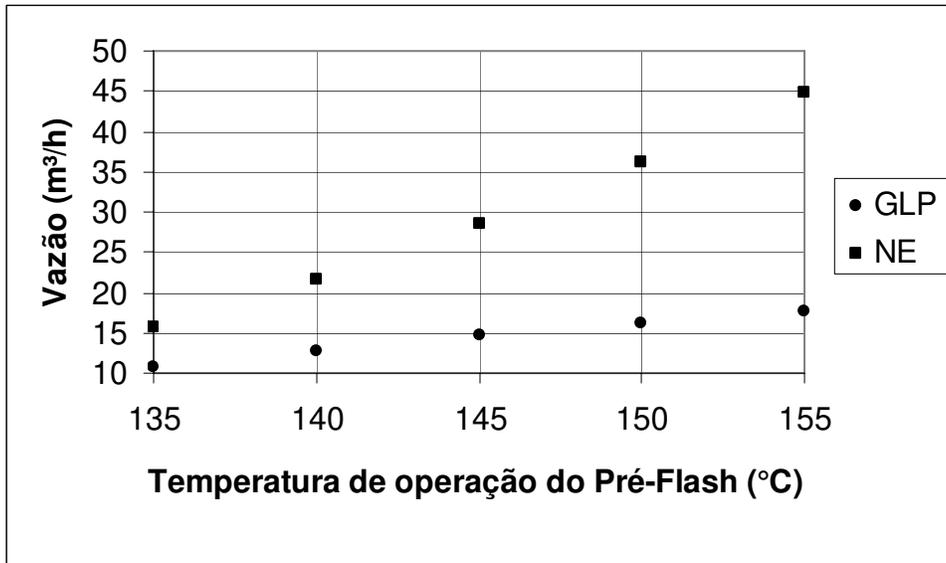


Figura 3.49: Vazão de Nafta Estabilizada (NE) e GLP, obtidos na Coluna Debutanizadora em função da Temperatura de operação do Pré-Flash.

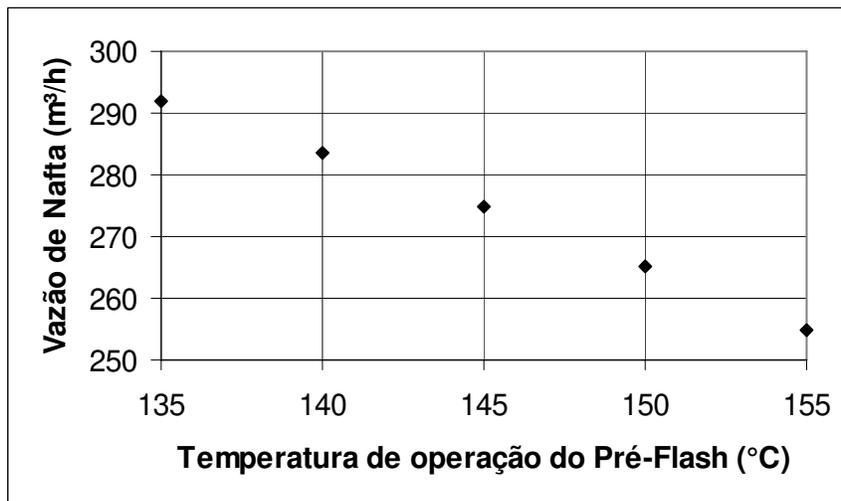


Figura 3.50: Vazão de nafta obtida na Coluna Atmosférica em função da Temperatura de operação do Pré-Flash.

De acordo com a Tabela 3.36 e Figura 3.49, uma maior temperatura de operação da Torre Pré-Flash permitiu uma maior vaporização do petróleo e, conseqüentemente, uma maior quantidade de nafta instável foi processada na Coluna Debutanizadora, resultando em uma maior quantidade obtida de NE e GLP. Como mais NE foi removida, uma menor

quantidade de nafta foi obtida na coluna atmosférica, de acordo com Figura 3.50 e Tabela 3.36.

Os rendimentos de querosene, diesel e gasóleo não sofreram mudanças significativas, apesar da mudança das características da alimentação da coluna atmosférica em termos de composição e vazão devido à quantidade vaporizada na Torre Pré-Flash.

A especificação volumétrica de butano e iso-pentano como componentes chaves no fundo e topo, respectivamente permitiu que a pressão de vapor Reid (PVR) da NE alcançasse valores adequados, sendo o seu valor limite em torno de 60 kPa, conforme especificações no Brasil. Na Figura 3.51, ocorre a redução da PVR em função da temperatura de operação da Torre Pré-Flash.

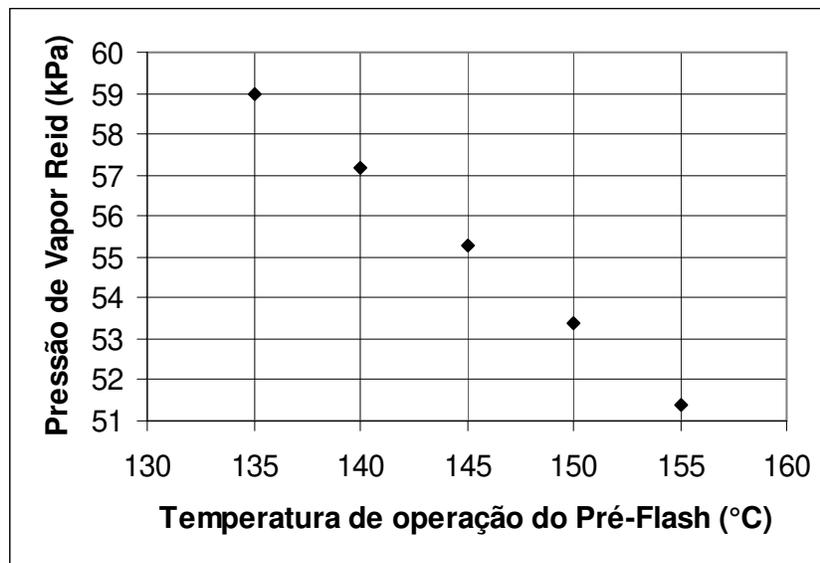


Figura 3.51: Pressão de Vapor Reid da Nafta Estabilizada em função da Temperatura de operação do Pré-Flash.

O interperismo não é uma propriedade fornecida diretamente pelo simulador HYSYS. Segundo o trabalho de Neto (1999), o interperismo pode ser determinado por meio de sucessivos *flashes* realizados para a corrente de GLP. Com isso, a corrente de GLP

sofre vaporizações de forma gradual. Neste caso, a corrente de GLP é submetida a sucessivos *flashes* até que 95% desta seja vaporizada. Isso significa que o GLP é submetido aos *flashes* até que 5% desta corrente esteja na fase líquida a uma pressão de 1 atm. Assim, o intemperismo obtido é a temperatura resultante do GLP a pressão de 1 atm até ter se vaporizado 95% em volume, ou seja, a temperatura em que a corrente do GLP alcançou até estar 5% em volume na fase líquida. Neste caso, vaporizou-se em cada *flash* 5% em volume, ou seja, a corrente de GLP foi submetida a uma vaporização gradual de 5% em volume até a vaporização de 95% em volume.

Observando-se os valores de intemperismo do GLP para as diferentes temperaturas de operação da Torre Pré-Flash, pode-se verificar que ocorreu somente uma pequena variação. Este comportamento do intemperismo em função da temperatura de operação da Torre Pré-Flash, ou seja, das condições de alimentação da Coluna Debutanizadora (vazão, temperatura e composição) mostrou-se coerente. Como foi especificada a composição do componente chave pesado (iso-pentano) na corrente de GLP, esta se manteve fixada. O intemperismo é essencialmente função da quantidade de componentes contendo cinco carbonos ou mais. Com a composição do iso-pentano fixada, a concentração dos componentes contendo cinco carbonos ou mais pode se manter aproximadamente constante, isto é, foi de certa forma controlada. Da mesma forma, que como a concentração de n-butano foi especificada, a concentração de componentes mais leves que o n-butano pode ser controlada.

Pode-se observar que uma temperatura de operação (alimentação) da Torre Pré-Flash resultou em um aumento do PFE da NE, conforme Figura 3.52. Devido a uma maior temperatura de operação da Torre Pré-Flash, ocorreu não somente uma quantidade maior vaporizada do petróleo, mas também a vaporização de componentes mais pesados da nafta, resultando na elevação do PFE da nafta instável. Conseqüentemente, ocorreu o aumento do PFE da NE, já que a Coluna Debutanizadora promove somente a retirada de frações mais leves da nafta. Para temperaturas de operação da Torre Pré-Flash superiores a 140° C, a nafta estabilizada mostrou-se mais pesada em termos de ponto final de ebulição que a nafta obtida na coluna atmosférica (PFE da nafta de 190°C que foi especificada na Tabela 3.35). Apesar de uma maior vaporização com o aumento de temperatura, a Torre Pré-Flash não promoveu um bom fracionamento de forma a obter uma retirada de nafta estabilizada mais

leve na Coluna Debutanizadora que na coluna atmosférica, em temperaturas de operação da Torre Pré-Flash superiores a 140°C.

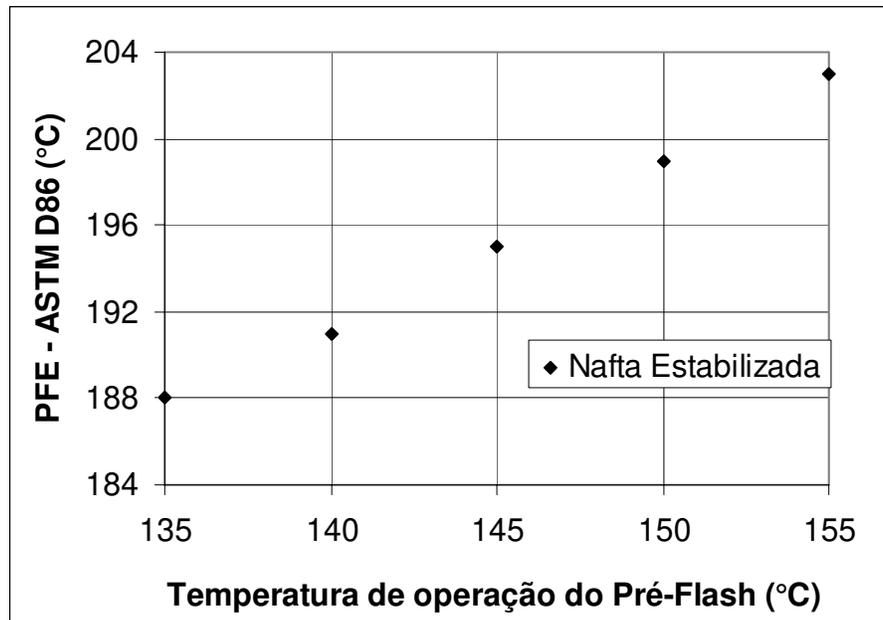


Figura 3.52: PFE de nafta (ASTM D86) obtida na Coluna Atmosférica em função da Temperatura de operação do Pré-Flash.

O consumo energético ($Q_{\text{alimentação}}$) para aquecer a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica (corrente líquida da Torre Pré-Flash) até 345°C diminuiu com a elevação da temperatura de operação da Torre Pré-Flash, conforme Figura 3.53. Isso ocorreu devido a uma redução da vazão da alimentação da Coluna Atmosférica e diferença de temperatura entre a corrente líquida do Pré-Flash e a alimentação da Coluna Atmosférica. A elevação da temperatura da Torre Pré-Flash tem como vantagem a redução de $Q_{\text{alimentação}}$ e $Q_{\text{condensador}}$ (carga térmica do condensador) na Coluna Atmosférica, apesar da elevação do PFE da NE e da carga térmica do refeedor (Q_{refeedor}) da Coluna Debutanizadora em função do aumento da temperatura de operação da Torre Pré-Flash. A redução da carga do condensador deve-se ao fato de menos nafta ser condensada no topo da coluna.

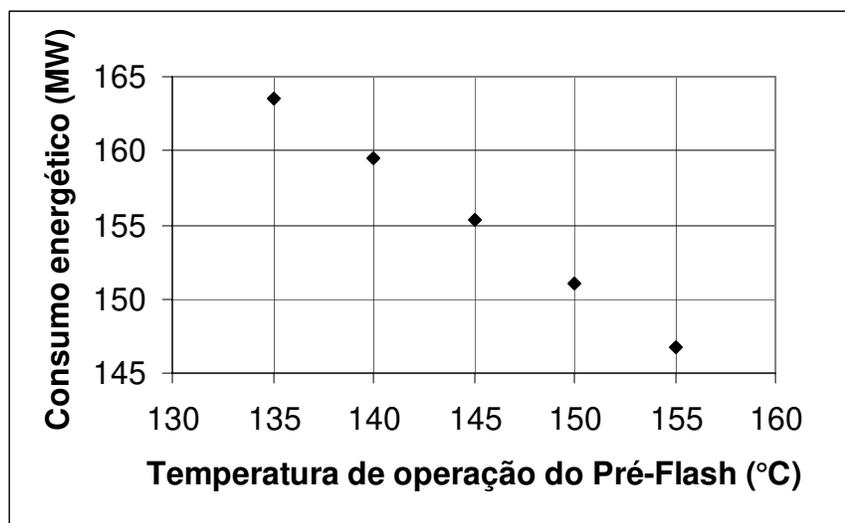


Figura 3.53: Consumo energético para aquecer a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica em função da Temperatura de operação do Pré-Flash.

3.6) CONCLUSÃO

No Capítulo 3, foram realizadas diversas simulações para a análise e estudo das principais variáveis do processo, mostrando os efeitos na Torre Pré-Flash, Coluna Atmosférica e Coluna Debutanizadora.

As variáveis temperatura e pressão de alimentação da Torre Pré-Flash foram analisadas. Deste modo, obtiveram-se os principais resultados destas duas variáveis sobre a Torre Pré-Flash. Com isto, pode-se verificar que o aumento de temperatura da corrente de alimentação da Torre Pré-Flash permitiu o aumento na vaporização e o aumento do PFE da corrente de vapor (nafta instável), causado pelo aumento na vaporização de componentes mais pesados. Além disso, observou-se que o aumento da pressão da alimentação da Torre Pré-Flash permitiu que a vazão do vapor e seu PFE fossem reduzidos.

Para a Coluna Atmosférica, as seguintes variáveis foram escolhidas: temperatura de alimentação, vapor principal, vapor da coluna de *stripping*, vazão de produtos (rendimentos), refluxo circulante, número de estágios da coluna e número de estágios da coluna de *stripping*.

Ao se aumentar a temperatura de alimentação da Coluna Atmosférica, pode-se verificar os seus principais efeitos no Resíduo e Gasóleo. O PIE e a temperatura TBP (PEV) na qual 5% e 10% em volume é vaporizado, no caso do Resíduo, aumentam em função do aumento da temperatura de alimentação da Coluna Atmosférica. No caso do Gasóleo, principalmente, o PFE (ASTM D86) reduziu conforme o aumento da temperatura de alimentação. Além disso, apresentou-se o aumento da carga térmica do condensador e do sobrevaporizado em função do aumento da temperatura de alimentação.

A vazão de vapor principal foi analisada. Os resultados obtidos pelas simulações mostraram que o PFE e a temperatura ASTM D86 em que 95% em volume é vaporizado para o gasóleo e diesel são reduzidos em função do aumento da vazão de vapor principal. Para o Resíduo, o PIE e a temperatura ASTM D86 em que 5% e 10% em volume é vaporizado aumentam conforme aumento da vazão de vapor principal. Ao verificar o comportamento da carga térmica do condensador e do sobrevaporizado, observaram-se seus respectivos aumentos em função do aumento da vazão de vapor principal. Além disso, foi verificada a redução do Gap 5-95 (Gasóleo-Diesel) em função do aumento da vazão de vapor principal.

O aumento da vazão de vapor da coluna de *stripping* 1, 2 e 3 promoveu o aumento do PIE (ASTM D86), do Gap 5-95, da porcentagem em volume removido da corrente de Gasóleo, Diesel e Querosene e a carga térmica do condensador. Através do aumento do Gap 5-95 (Querosene-Nafta), (Diesel-Querosene) e (Gasóleo-Diesel) causado pelo aumento da vazão de vapor da coluna de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente, pode-se observar o aumento do fracionamento entre o produto retirado na respectiva coluna de *stripping* e o superior. Entretanto, o aumento da vazão de vapor da coluna de *stripping* 1, 2 e 3 implica em um aumento da carga térmica do condensador.

A avaliação dos rendimentos possibilitou verificar que um aumento da vazão de diesel permitiu um aumento de seu PFE e do produto retirado abaixo. Ao se aumentar a vazão de retirada, o fluxo de líquido na coluna abaixo da retirada diminuiu, provocando um aumento de temperatura nos estágios afetados. Conseqüentemente, ocorrem a vaporização e incorporação de componentes mais pesados nos estágios e na retirada de diesel e gasóleo. Esse comportamento do diesel e gasóleo observado anteriormente com o aumento da vazão de diesel permite que se possa realizar uma regulagem do PFE do diesel sem alterar o

gasóleo. Neste caso, para aumentar o PFE do diesel sem modificar o PFE do gasóleo, a vazão de diesel deve ser aumentada e a de gasóleo deve ser reduzida.

A retirada do refluxo circulante promove o aumento da vazão de vapor no topo da coluna, causando um aumento na carga térmica do condensador. Devido ao aumento de temperatura verificado nos resultados, ocorreu uma menor condensação do vapor nos estágios superiores da coluna no qual o refluxo circulante foi retirado, acarretando no aumento da vazão de líquido e no aumento da vazão de vapor de topo.

Ao analisar o aumento do número de estágios entre a alimentação e a retirada de gasóleo, observa-se o aumento da vazão de gasóleo e a diminuição da vazão de resíduo. Variando-se o número de estágios entre a seção de produtos, verificou-se o aumento na vazão do produto superior e a redução do inferior. Com as análises da variação do número de estágios entre as seções realizadas anteriormente, pode-se concluir que ocorreu o aumento do fracionamento entre produtos no caso do aumento do número de estágios na seção entre produtos e um maior fracionamento entre gasóleo e resíduo, no caso do aumento do número de estágios na seção entre a alimentação e a retirada de gasóleo. Além disso, o número de estágios na seção de esgotamento foi avaliado. Assim, pode-se verificar a redução da vazão de resíduo e o aumento da vazão de gasóleo em função do aumento do número de estágios na seção de esgotamento.

O aumento no número de estágios da Coluna de Stripping 1, 2 e 3 foi estudado. Desta forma, pode-se verificar que:

- A variação da vazão de nafta e querosene foi pequena com o aumento do número de estágios da coluna de stripping 1.
- O aumento da vazão de querosene e a redução de diesel com o aumento do número de estágios da coluna de stripping 2.
- O aumento da vazão de diesel e a redução de gasóleo com o aumento da coluna de stripping 3.

A principal variável escolhida para a análise do efeito na Coluna Debutanizadora foi a carga térmica do refeedor. Através desta avaliação sob determinadas especificações, foi possível verificar que ocorreu:

- Redução na PVR.

- Redução na composição de iso-pentano no GLP.
- Redução na composição de n-butano no GLP.
- Aumento na quantidade de recuperado de ambos os componentes chaves (iso-pentano e n-butano).
- Redução no intemperismo.

Observando-se os efeitos na variação da temperatura de alimentação do Pré-Flash em todo o processo, foi possível observar que uma maior vazão de nafta instável e uma menor vazão de alimentação para a Coluna Atmosférica foram obtidas com o aumento da temperatura de alimentação do Pré-Flash. Isso significa um aumento da vazão de alimentação da Coluna Debutanizadora e uma redução da vazão de alimentação da Coluna Atmosférica.

O aumento da vazão de alimentação da Coluna Debutanizadora permitiu que uma maior vazão de GLP e nafta estabilizada fossem obtidas. Consequentemente, com o aumento da vazão de nafta estabilizada, a redução na vazão de nafta obtida na Coluna Atmosférica ocorreu. Além disso, querosene, diesel e gasóleo não tiveram mudanças significativas na sua vazão de retirada. De acordo com os resultados obtidos, uma variação de 20°C na temperatura de alimentação no Pré-Flash provocou um aumento de 35,97 m³/h na vazão de alimentação da Coluna Debutanizadora. Desta forma, verificou-se que o consumo energético para aquecer a corrente Líquido_Flash até 345°C (temperatura da alimentação da Coluna Atmosférica) foi reduzido conforme aumento da temperatura de alimentação do Pré-Flash. Isso ocorreu devido a redução da diferença de temperaturas entre a corrente Líquido_Flash e a alimentação da Coluna Atmosférica e a redução na vazão da alimentação da Coluna Atmosférica.

CAPÍTULO 4 - OTIMIZAÇÃO DAS COLUNAS DEBUTANIZADORA E ATMOSFÉRICA

A otimização consiste na determinação das variáveis de um sistema com o objetivo de maximizar ou minimizar uma função-objetivo. São exemplos de função-objetivo: maximizar a obtenção de produtos na Coluna Atmosférica e minimizar a carga térmica do refeedor. A otimização de um processo ou equipamento é necessária para que uma maior produção seja alcançada com menores custos operacionais (consumo energético e de utilidades) e sem perda de matéria-prima.

Neste capítulo, são apresentadas as otimizações das Colunas Debutanizadora e Atmosférica. Inicialmente, foi realizada a otimização da posição de alimentação e número de estágios da Coluna Debutanizadora com o objetivo de minimizar a carga térmica de seu refeedor. Em seguida, realizou-se a otimização do número de estágios da Coluna Atmosférica para que a vazão de resíduo atmosférico fosse minimizada. Através das diversas simulações de ambas as colunas, determinaram-se os valores das variáveis a serem otimizadas, manipulando-as de modo que a função-objetivo fosse minimizada. Neste caso, a função-objetivo para a otimização da Coluna Atmosférica é a minimização da vazão de resíduo, já, para a Coluna Debutanizadora, é a minimização da carga térmica do refeedor.

As otimizações serão realizadas através de simulações sucessivas e busca da variável a ser otimizada.

4.1) OTIMIZAÇÃO DA COLUNA DEBUTANIZADORA

Os estágios da coluna de destilação e a carga térmica do refeedor possibilitam o fracionamento dos componentes de modo que a separação desejada seja alcançada. Com o aumento do número de estágios, pode-se ter uma melhora no fracionamento dos componentes ao longo da coluna. Desta forma, se ocorrer um aumento no número de estágios, a carga térmica do refeedor pode ser reduzida de modo que o mesmo grau de separação entre componentes possa ser alcançado.

As simulações realizadas têm como objetivo verificar o comportamento da carga térmica do refulvedor, uma das principais variáveis da Coluna Debutanizadora, em função do número de estágios e a posição de alimentação. Desta forma, através da análise de sensibilidade deste comportamento, pode-se determinar a posição de alimentação ótima para uma coluna com um certo número de estágios de modo a obter a menor carga térmica.

As considerações para as simulações realizadas são as mesmas estabelecidas no item 3.5 do Capítulo 3 para a Coluna Debutanizadora, entretanto, o número de estágios e a posição de alimentação da Coluna Debutanizadora foram modificados. Assim, as condições de alimentação da Torre Pré-Flash e Coluna Debutanizadora (descritas no item 3.5) foram mantidas constantes, além das especificações da Coluna Debutanizadora da Tabela 3.35 do Capítulo 3.

Para uma coluna com determinado número de estágios, o estágio de alimentação foi modificado. Deste modo, foram obtidas a carga térmica do condensador e do refulvedor e a razão de refluxo para cada posição de alimentação considerada. De acordo com os resultados obtidos para as posições consideradas, foi possível determinar aquela que possibilita a menor carga térmica do refulvedor, mantendo-se constantes as especificações da coluna. Foram realizadas simulações para 15, 20, 25, 30, 35 e 40 estágios.

Os resultados estão apresentados nas Tabelas de 4.1 a 4.6 para os diversos números de estágios considerados. Para cada simulação considerando um determinado número de estágios, foram obtidas as cargas térmicas do condensador e do refulvedor e a razão de refluxo em função do estágio de alimentação.

Tabela 4.1: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 15 estágios.

| Número de estágios | | 15 | |
|--------------------|---|--|------------------|
| Estágio | Carga térmica do condensador (10^7 kJ/h) | Carga térmica do refeedor (10^7 kJ/h) | Razão de Refluxo |
| 5 | 3,393 | 2,273 | 11,06 |
| 6 | 3,046 | 1,926 | 9,84 |
| 7 | 2,836 | 1,715 | 9,09 |
| 8 | 2,713 | 1,593 | 8,66 |
| 9 | 2,667 | 1,546 | 8,49 |
| 10 | 2,710 | 1,589 | 8,65 |
| 11 | 2,889 | 1,769 | 9,29 |
| 12 | 3,301 | 2,180 | 10,76 |
| 13 | 4,211 | 3,085 | 14,01 |

Tabela 4.2: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 20 estágios.

| Número de estágios | | 20 | |
|--------------------|---|--|------------------|
| Estágio | Carga térmica do condensador (10^7 kJ/h) | Carga térmica do refeedor (10^6 kJ/h) | Razão de Refluxo |
| 6 | 2,198 | 10,780 | 6,81 |
| 8 | 1,938 | 8,180 | 5,89 |
| 9 | 1,872 | 7,515 | 5,66 |
| 10 | 1,831 | 7,102 | 5,52 |
| 11 | 1,810 | 6,894 | 5,44 |
| 12 | 1,808 | 6,876 | 5,44 |
| 13 | 1,827 | 7,063 | 5,51 |
| 14 | 1,872 | 7,508 | 5,67 |
| 16 | 2,106 | 9,849 | 6,51 |
| 17 | 2,397 | 12,760 | 7,55 |

Tabela 4.3: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 25 estágios.

| Número de estágios | | 25 | |
|--------------------|---|--|------------------|
| Estágio | Carga térmica do condensador (10^7 kJ/h) | Carga térmica do refeedor (10^6 kJ/h) | Razão de Refluxo |
| 6 | 2,103 | 9,826 | 6,47 |
| 8 | 1,834 | 7,139 | 5,52 |
| 10 | 1,723 | 6,021 | 5,13 |
| 11 | 1,694 | 5,737 | 5,03 |
| 12 | 1,677 | 5,571 | 4,97 |
| 13 | 1,670 | 5,498 | 4,95 |
| 14 | 1,671 | 5,505 | 4,95 |
| 15 | 1,679 | 5,583 | 4,98 |
| 16 | 1,694 | 5,737 | 5,04 |
| 18 | 1,756 | 6,353 | 5,26 |
| 20 | 1,903 | 7,818 | 5,79 |

Tabela 4.4: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 30 estágios.

| Número de estágios | | 30 | |
|--------------------|---|--|------------------|
| Estágio | Carga térmica do condensador (10^7 kJ/h) | Carga térmica do refeedor (10^6 kJ/h) | Razão de Refluxo |
| 9 | 1,738 | 6,172 | 5,18 |
| 11 | 1,661 | 5,410 | 4,91 |
| 13 | 1,630 | 5,094 | 4,80 |
| 14 | 1,624 | 5,034 | 4,78 |
| 15 | 1,622 | 5,017 | 4,78 |
| 16 | 1,624 | 5,033 | 4,78 |
| 17 | 1,628 | 5,081 | 4,8 |
| 18 | 1,636 | 5,155 | 4,83 |
| 19 | 1,647 | 5,265 | 4,87 |
| 21 | 1,682 | 5,615 | 5,00 |
| 23 | 1,749 | 6,285 | 5,24 |
| 25 | 1,898 | 7,770 | 5,77 |

Tabela 4.5: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 35 estágios.

| Número de estágios | | 35 | |
|--------------------|---|--|------------------|
| Estágio | Carga térmica do condensador (10^7 kJ/h) | Carga térmica do refeedor (10^6 kJ/h) | Razão de Refluxo |
| 6 | 2,085 | 9,646 | 6,41 |
| 8 | 1,801 | 6,809 | 5,40 |
| 10 | 1,681 | 5,603 | 4,98 |
| 12 | 1,628 | 5,080 | 4,80 |
| 14 | 1,607 | 4,869 | 4,72 |
| 15 | 1,603 | 4,825 | 4,71 |
| 16 | 1,602 | 4,805 | 4,71 |
| 17 | 1,603 | 4,806 | 4,71 |
| 18 | 1,603 | 4,824 | 4,71 |
| 19 | 1,606 | 4,853 | 4,72 |
| 20 | 1,61 | 4,895 | 4,74 |
| 22 | 1,623 | 5,025 | 4,78 |
| 24 | 1,644 | 5,237 | 4,86 |
| 26 | 1,681 | 5,601 | 4,99 |
| 28 | 1,748 | 6,279 | 5,24 |
| 30 | 1,897 | 7,768 | 5,77 |

Tabela 4.6: Cargas térmicas do condensador e do refeedor e razão de refluxo em função do estágio de alimentação para uma coluna de 40 estágios.

| Número de estágios | | 40 | |
|--------------------|---|--|------------------|
| Estágio | Carga térmica do condensador (10^7 kJ/h) | Carga térmica do refeedor (10^6 kJ/h) | Razão de Refluxo |
| 10 | 1,677 | 5,566 | 4,966 |
| 14 | 1,601 | 4,804 | 4,699 |
| 18 | 1,590 | 4,701 | 4,665 |
| 19 | 1,591 | 4,706 | 4,668 |
| 20 | 1,592 | 4,719 | 4,672 |
| 21 | 1,594 | 4,737 | 4,679 |
| 22 | 1,596 | 4,762 | 4,689 |
| 26 | 1,615 | 4,943 | 4,755 |
| 30 | 1,660 | 5,392 | 4,918 |
| 17 | 1,591 | 4,705 | 4,666 |
| 16 | 1,592 | 4,720 | 4,671 |
| 15 | 1,595 | 4,750 | 4,681 |
| 12 | 1,623 | 5,030 | 4,778 |

Foram construídas as Figuras 4.1 a 4.6, respectivamente, a partir dos dados da Tabela 4.1 a 4.6. Neste caso, cada figura apresenta a carga térmica do refervedor em função do estágio de alimentação (posição de alimentação) para colunas com 15, 20, 25, 30, 35 e 40 estágios, respectivamente.

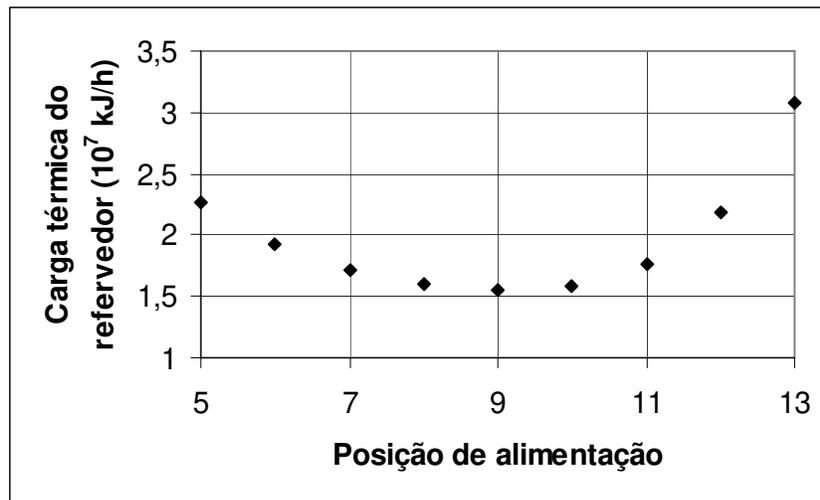


Figura 4.1: Carga térmica do refervedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 15 estágios.

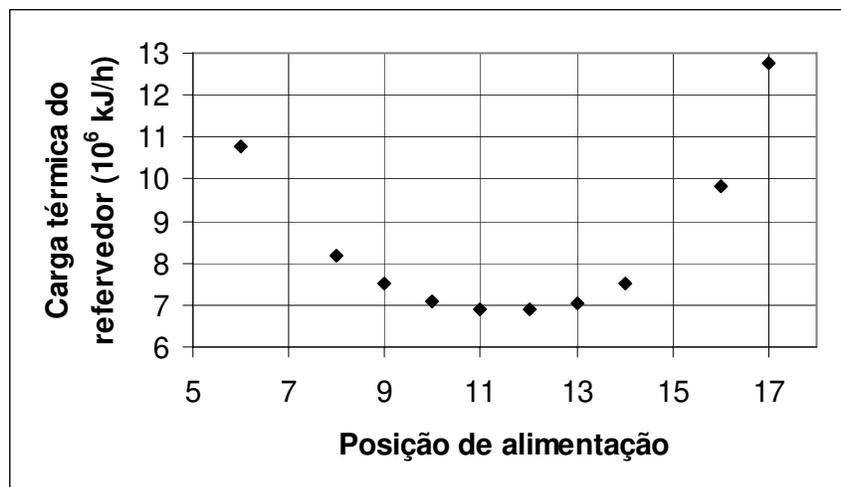


Figura 4.2: Carga térmica do refervedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 20 estágios.

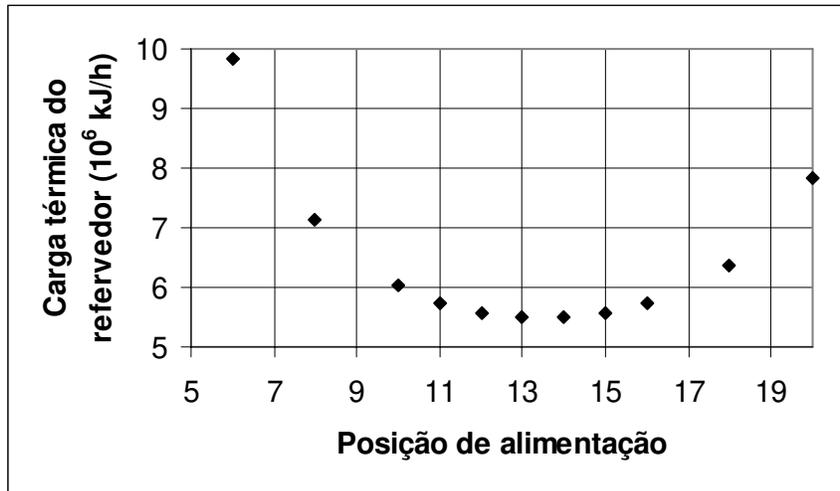


Figura 4.3: Carga térmica do refervedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 25 estágios.

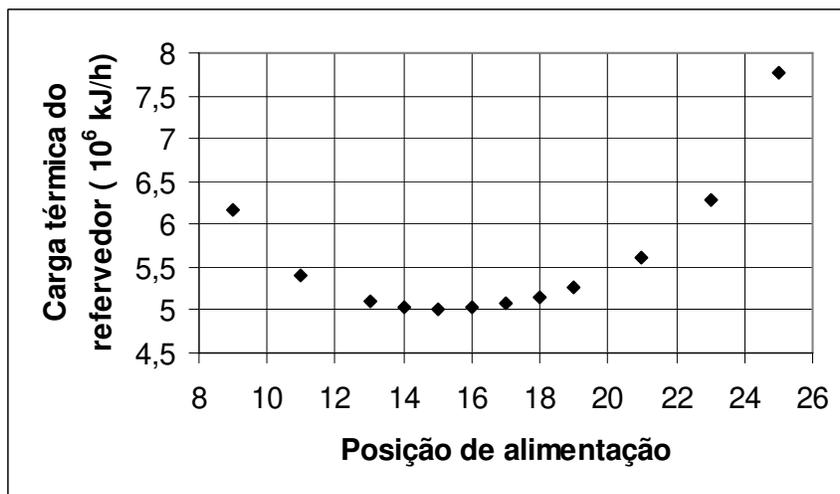


Figura 4.4: Carga térmica do refervedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 30 estágios.

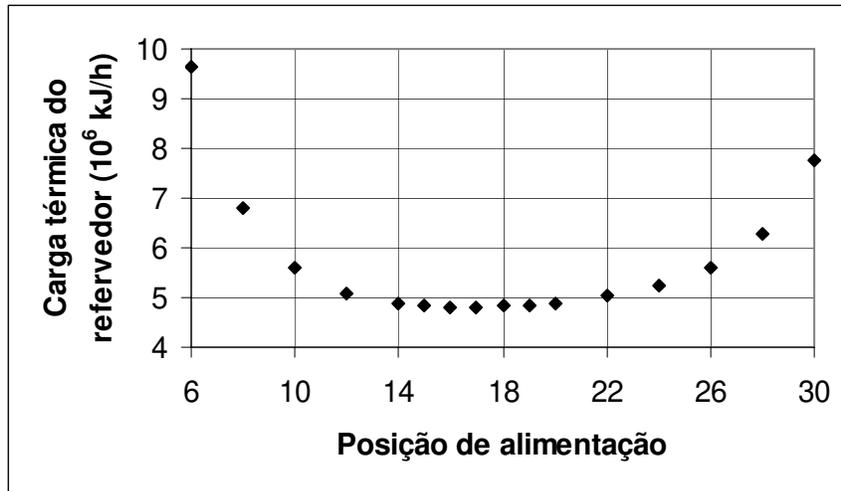


Figura 4.5: Carga térmica do refeedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 35 estágios.

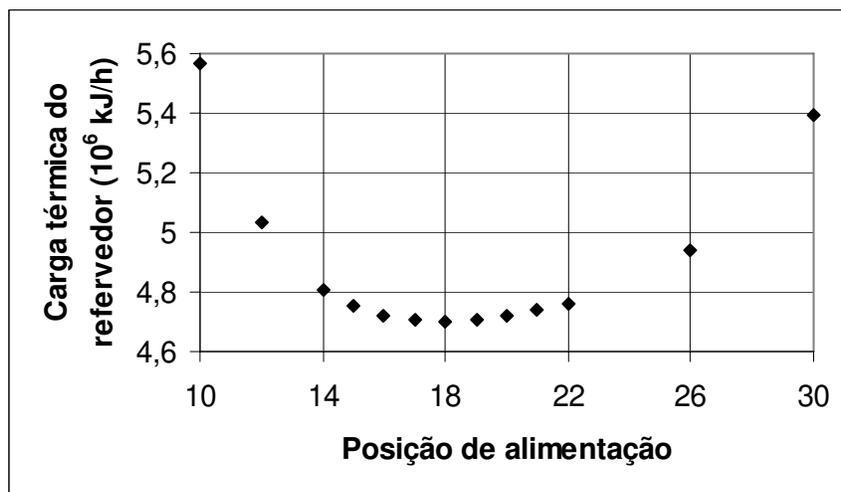


Figura 4.6: Carga térmica do refeedor em função do estágio de alimentação para uma coluna de 40 estágios.

As Figuras 4.1 a 4.6 permitem determinar a posição de alimentação na qual o consumo energético do refeedor é o menor, para a Coluna Debutanizadora com 15, 20, 25, 30, 35 e 40 estágios. Isto significa que foi possível realizar a otimização da posição de alimentação da Coluna Debutanizadora com um número de estágios especificado para a

separação de GLP e NE sob as condições especificadas anteriormente. Neste caso, a menor carga térmica determinada é aquela em que a nafta estabilizada e o GLP são obtidos de modo que as composições em volume dos componentes chaves (n-butano e iso-pentano) estejam nos valores especificados da Tabela 3.35 (ambos em uma composição de 0,5% em volume). Em todas as simulações, com estas especificações consideradas, as vazões de retirada de GLP e NE obtidas mantiveram-se praticamente constantes, assim como a PVR e o intemperismo.

Pelos resultados obtidos nas Tabelas de 4.1 a 4.6, pode-se observar que as posições de alimentação que apresentaram os menores valores de carga térmica de refeedor para todos os números de estágios considerados, também, apresentaram as menores razões de refluxo. Esse comportamento mostrou-se coerente porque uma redução da razão de refluxo está ligada diretamente em uma redução da vazão de alimentação do refeedor, já que o fluxo de líquido (originário do refluxo) desce ao longo da coluna e é retirado como produto de fundo. Parte do produto de fundo é aquecida no refeedor e retorna à coluna. Como ocorreu uma redução do refluxo, o fluxo de líquido reduziu e conseqüentemente, o fluxo de líquido que é aquecido no refeedor. Isto provoca uma redução na carga térmica do refeedor, já que uma menor energia para aquecer é necessária de modo que a separação especificada seja satisfeita.

A Tabela 4.7 apresenta a posição de alimentação ótima em função do número de estágios da Coluna Debutanizadora que forneceu a menor carga térmica. Através destes resultados da Tabela 4.7, pode-se realizar a otimização da coluna de modo que a carga térmica seja mínima.

Tabela 4.7: Posição de alimentação ótima em função do número de estágios da coluna debutanizadora com seus respectivos valores de carga térmica do condensador e do refeedor e de razão de refluxo.

| Número de Estágios | Posição de alimentação | Carga térmica do condensador (10^7 kJ/h) | Carga térmica do refeedor (10^6 kJ/h) | Razão de Refluxo |
|--------------------|------------------------|---|--|------------------|
| 15 | 9 | 2,667 | 15,46 | 8,49 |
| 20 | 12 | 1,808 | 6,876 | 5,44 |
| 25 | 13 | 1,670 | 5,498 | 4,95 |
| 30 | 15 | 1,622 | 5,017 | 4,78 |
| 35 | 16 | 1,602 | 4,805 | 4,71 |
| 40 | 18 | 1,590 | 4,701 | 4,67 |

De acordo com a Tabela 4.7, pode-se observar que ocorre a diminuição dos valores da carga térmica do refeedor conforme o aumento do número de estágios. Comparando-se os valores de carga térmica de refeedor para 35 e 40 estágios, a diferença entre as cargas térmicas é de $0,1 \cdot 10^6$ kJ/h, praticamente. Neste caso, a adição de mais estágios não permitirá a redução significativa da carga térmica de refeedor. Portanto, uma coluna debutanizadora com até 35 estágios poderá fornecer uma menor carga térmica de refeedor possível. Com isto, determinou-se um número de estágios ótimo para a coluna debutanizadora que resultou na minimização da carga térmica do refeedor.

4.2) OTIMIZAÇÃO DA COLUNA ATMOSFÉRICA

O principal objetivo para a otimização da coluna atmosférica realizada é de determinar a configuração em termos de número total de estágios que permita a menor vazão de retirada de resíduo.

Através das diversas simulações realizadas, pode-se observar o comportamento da vazão de resíduo com a variação do número total de estágios e o estágio de alimentação (posição de alimentação). Neste caso, as simulações foram realizadas, variando-se o número de estágios na seção da coluna abaixo da retirada de gásóleo e o estágio de

alimentação. Isto significa que o número de estágios entre as retiradas de nafta e de querosene, de querosene e de diesel e, de diesel e de gasóleo não foi modificado.

A posição de alimentação foi modificada de modo que o número de estágios na seção de esgotamento fosse modificado de 2 a 5 estágios. Desta forma, as simulações foram realizadas de modo a obter a vazão de resíduo em função do número total de estágios para colunas com 2, 3, 4 e 5 estágios na seção de esgotamento.

4.2.1) CONSIDERAÇÕES

Inicialmente, a Torre Pré-Flash é operada a uma temperatura e pressão constante de 145°C e 3 atm. Com isso, a vazão da corrente de alimentação da Coluna Atmosférica (vazão de líquido do Pré-Flash) é de 956,9 m³/h. Esta corrente foi mantida com uma vazão constante e uma pressão de 1,8 atm.

Conforme explicado anteriormente, o número de estágios entre as retiradas de produtos não foi modificado. Desta forma, a localização das retiradas laterais na Coluna Atmosférica foi mantida constante de acordo com a Tabela 3.1. Além disso, a localização dos três circuitos dos refluxos circulantes e o número de estágios das três colunas de *stripping* não foram modificados.

A Tabela 4.8 apresenta as principais especificações consideradas e mantidas constantes para a Coluna Atmosférica. Além destas especificações, o condensador foi operado de modo a condensar todo o vapor do topo da Coluna Atmosférica.

Tabela 4.8: Principais especificações para a Coluna Atmosférica.

| Condições da corrente de alimentação | |
|---|-----------------------------------|
| Pressão | 1,8 atm |
| Vazão | 956,9 m ³ /h |
| Vazão de Vapor de água (200°C e 3 atm) | |
| <i>Stripping</i> de querosene (VQ) | 4690 kg/h |
| <i>Stripping</i> de diesel (VD) | 4630 kg/h |
| <i>Stripping</i> de gasóleo (VGO) | 3200 kg/h |
| Principal (VP) | 8000 kg/h |
| Refluxo Circulante | |
| Carga térmica do 1° e 2° Refluxo Circulante | 19,44 MW (7.10 ⁷ kJ/h) |
| Carga térmica do 3° Refluxo Circulante | 16,67 MW (6.10 ⁷ kJ/h) |
| Vazão do 1° e 2° Refluxo Circulante | 400 m ³ /h |
| Vazão do 3° Refluxo Circulante | 200 m ³ /h |
| PFE das frações retiradas | |
| Nafta | 190°C |
| Querosene | 280°C |
| Diesel | 350°C |
| Gasóleo | 425°C |

De acordo com a análise e avaliação do número de estágios da Coluna Atmosférica realizada anteriormente, a variação do número de estágios entre as retiradas de produtos permite somente modificações significativas na vazão de retirada do produto superior, enquanto que o resíduo não sofre mudanças. A vazão de resíduo é modificada significativamente, variando-se o número de estágios entre a retirada de gasóleo e a alimentação. Por isso, o número de estágios abaixo da retirada de gasóleo foi modificado, ao mesmo tempo, que a posição de alimentação, também. Desta forma, pode-se determinar através das simulações, o número de estágios abaixo da retirada de gasóleo ótimo que resulte na minimização da vazão de resíduo.

Além destas variáveis modificadas, foram consideradas diferentes temperaturas de alimentação nas simulações.

A Tabela 4.9 apresenta o estágio de alimentação em função do número de estágios na seção de esgotamento (2 a 5 estágios) e do número total de estágio da coluna considerado, para as simulações realizadas.

Tabela 4.9: Posição de alimentação em função do número total de estágios da coluna e do número de estágios na seção de esgotamento para as simulações realizadas.

| | Estágio de alimentação | | | |
|------------------------------------|--|----|----|----|
| | Número de estágios da seção de esgotamento | | | |
| Número total de estágios da coluna | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 34 | 29 | 30 | 31 | 32 |
| 36 | 31 | 32 | 33 | 34 |
| 38 | 33 | 34 | 35 | 36 |
| 40 | 35 | 36 | 37 | 38 |
| 42 | 37 | 38 | 39 | 40 |
| 44 | 39 | 40 | 41 | 42 |

4.2.2) RESULTADOS

As simulações foram realizadas conforme as considerações descritas acima. O objetivo da otimização é determinar, de acordo com os resultados, o número total de estágios para que a vazão de resíduo seja mínima nas diferentes posições de alimentação consideradas. A posição de alimentação foi modificada de maneira que o número de estágios da seção de esgotamento considerado fosse de 2 a 5 estágios. As Tabelas 4.10 a 4.15 apresentam os principais resultados obtidos.

Inicialmente, as simulações foram realizadas, mantendo-se fixo o número total de estágios da Coluna Atmosférica e variando-se a posição de alimentação, de modo que os estágios da seção de esgotamento fossem de 2 a 5 para uma determinada temperatura fixa de alimentação. Em seguida, outro número de estágio foi considerado e mantido fixo, enquanto que a posição de alimentação era variada. Repetindo-se este procedimento para os diversos números de estágio, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 4.10.

Para cada Tabela (de 4.10 a 4.15), os resultados foram obtidos considerando uma diferente temperatura da corrente de alimentação. Neste caso, as Tabelas 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os resultados obtidos através das simulações para temperaturas de alimentação de 345°C, 350°C, 355°C, 360°C, 365°C e 370°C, respectivamente.

Tabela 4.10: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 345°C.

| Número de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|
| | Número de estágios da seção de esgotamento | | | |
| | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 34 | 294,0 | 288,9 | 288,0 | 289,0 |
| 36 | 285,1 | 284,4 | 285,0 | 287,1 |
| 38 | 282,5 | 282,9 | 284,0 | 286,6 |
| 40 | 281,6 | 282,3 | 283,7 | 286,4 |
| 42 | 281,3 | 282,2 | 283,6 | 284,0 |
| 44 | 281,3 | 282,2 | 283,6 | 286,4 |

Tabela 4.11: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 350°C.

| Número de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|
| | Número de estágios da seção de esgotamento | | | |
| | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 34 | 287,9 | 282,4 | 280,5 | 281,3 |
| 36 | 278,2 | 277,2 | 277,5 | 279,5 |
| 38 | 275,1 | 275,3 | 276,4 | 278,8 |
| 40 | 274 | 274,7 | 276 | 278,6 |
| 42 | 273,7 | 274,5 | 275,9 | 278,6 |
| 44 | 273,6 | 274,4 | 275,8 | 278,5 |

Tabela 4.12: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 355°C.

| Número de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|
| | Número de estágios da seção de esgotamento | | | |
| | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 34 | 282,9 | 276,6 | 274,3 | 274,7 |
| 36 | 272 | 270,7 | 270,7 | 272,5 |
| 38 | 268,4 | 268,5 | 269,4 | 271,7 |
| 40 | 267,1 | 267,7 | 268,9 | 271,4 |
| 42 | 266,7 | 267,4 | 268,7 | 271,3 |
| 44 | 266,5 | 267,4 | 268,7 | 271,3 |

Tabela 4.13: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 360°C.

| Número de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|
| | Número de estágios da seção de esgotamento | | | |
| | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 34 | 278,6 | 271,5 | 268,7 | 268,7 |
| 36 | 266,5 | 264,8 | 264,6 | 266,2 |
| 38 | 262,4 | 262,3 | 263 | 265,2 |
| 40 | 260,9 | 261,3 | 262,5 | 264,8 |
| 42 | 260,3 | 261 | 262,3 | 264,8 |
| 44 | 260,1 | 260,9 | 262,2 | 264,7 |

Tabela 4.14: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 365°C.

| Número de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|
| | Número de estágios da seção de esgotamento | | | |
| | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 34 | 274,9 | 267,1 | 263,8 | 263,4 |
| 36 | 261,6 | 259,6 | 259,1 | 260,5 |
| 38 | 257 | 256,7 | 257,3 | 259,3 |
| 40 | 255,2 | 255,6 | 256,6 | 258,9 |
| 42 | 254,6 | 255,2 | 256,4 | 258,8 |
| 44 | 254,3 | 255,1 | 256,3 | 258,7 |

Tabela 4.15: Vazão de resíduo em função do número total de estágios e da seção de esgotamento para uma temperatura de alimentação de 370°C.

| Número de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) | | | |
|--------------------|--|-------|-------|-------|
| | Número de estágios da seção de esgotamento | | | |
| | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 34 | 271,7 | 263,2 | 259 | 259 |
| 36 | 257,3 | 255 | 254 | 255 |
| 38 | 252,2 | 252 | 252 | 254,1 |
| 40 | 250,2 | 250,5 | 251 | 253,6 |
| 42 | 249,4 | 250 | 251,1 | 254 |
| 44 | 249,1 | 249,8 | 251 | 253,4 |

Através das Tabelas 4.10 a 4.15, foram construídas as Figuras 4.7 a 4.12. Nestas figuras, é apresentada a vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes números de estágios da seção de esgotamento. Neste caso, N representa o número de estágios da seção de esgotamento. As Figuras 4.7 a 4.12 correspondem à temperatura da corrente de alimentação de 345°, 350°, 355°, 360°, 365° e 370°C, respectivamente.

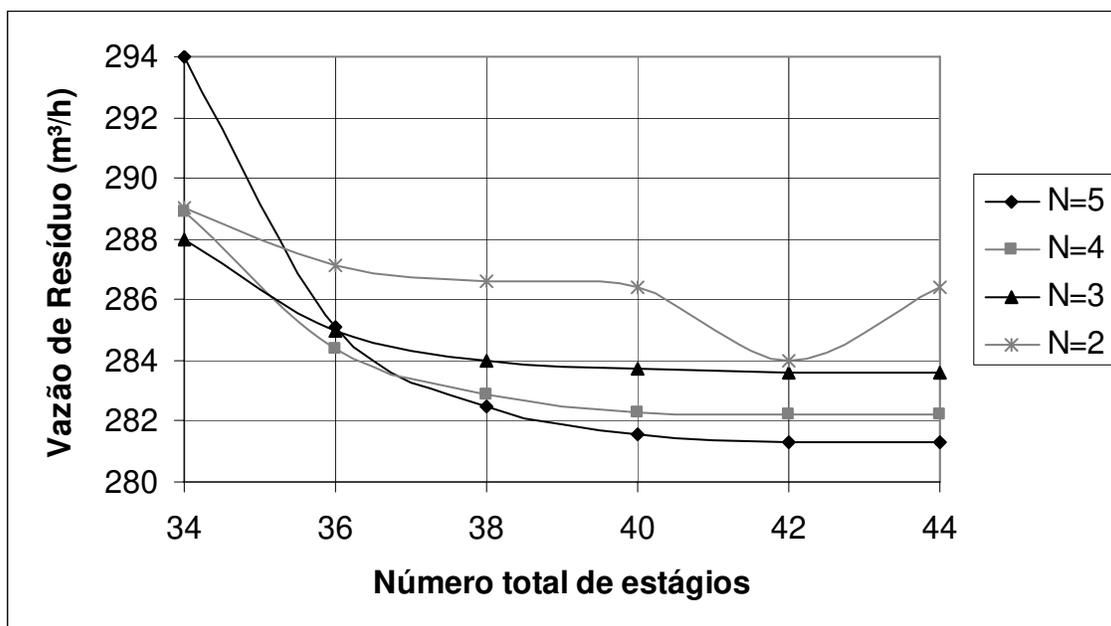


Figura 4.7: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 345°C.

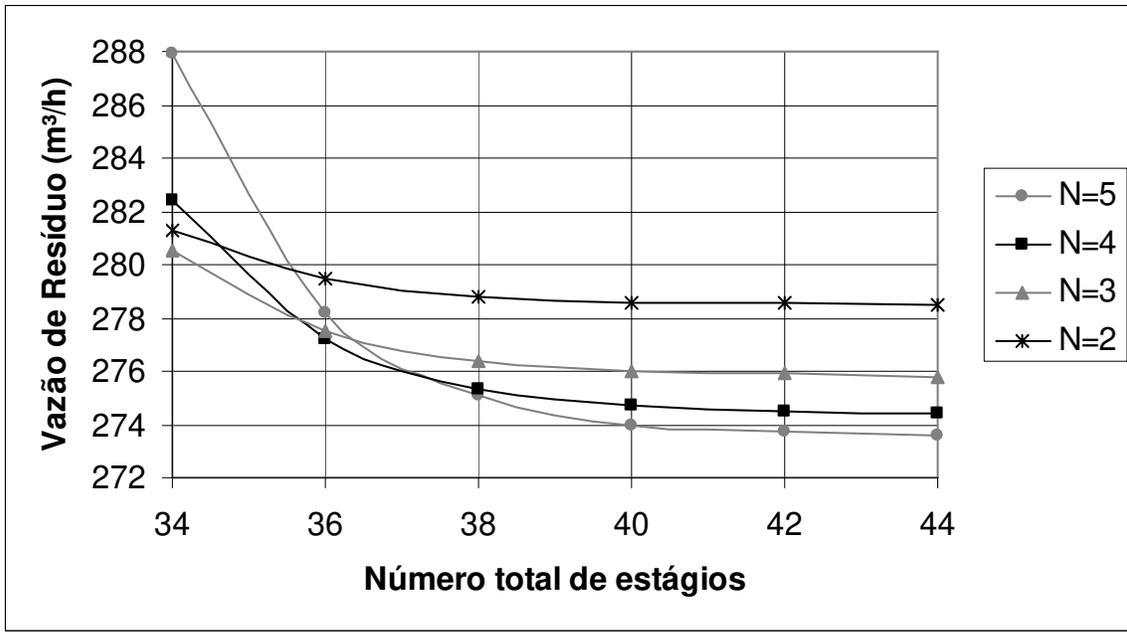


Figura 4.8: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 350°C.

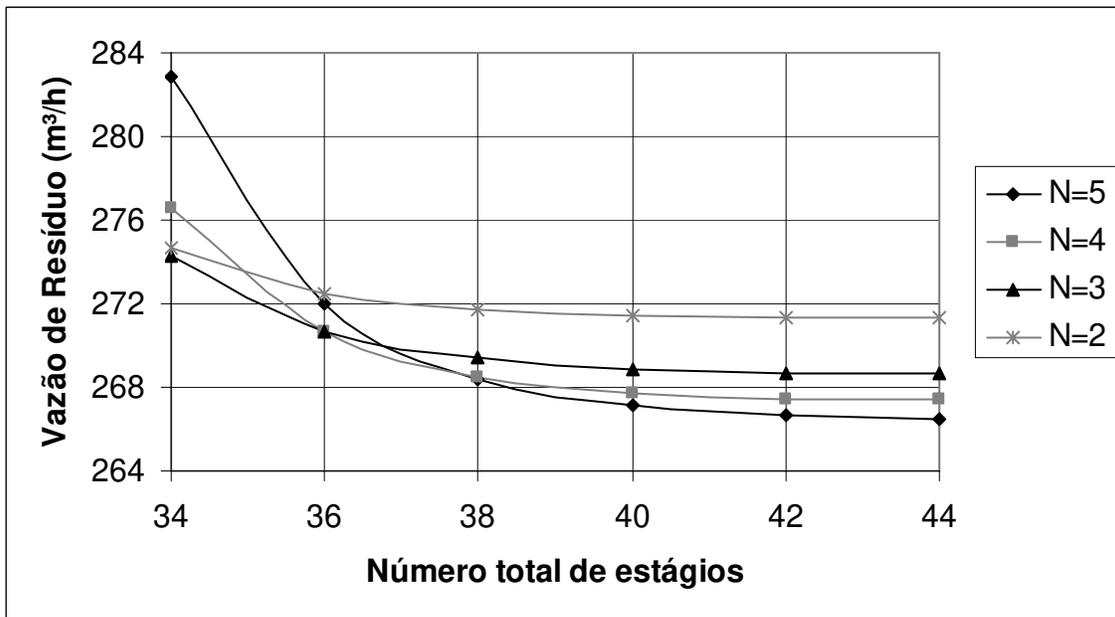


Figura 4.9: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 355°C.

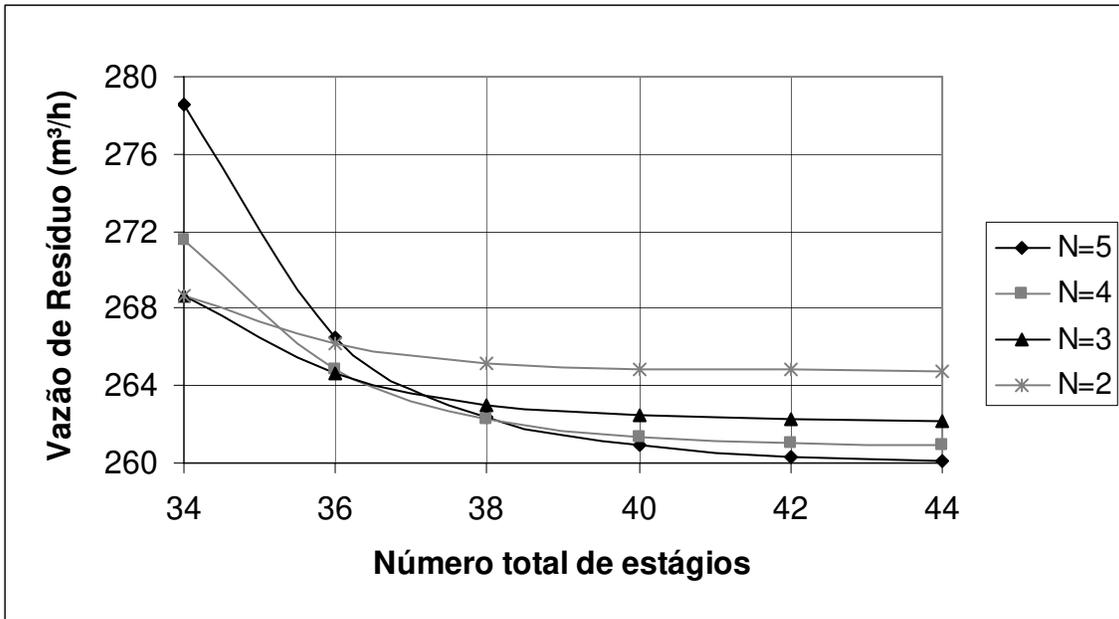


Figura 4.10: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 360°C.

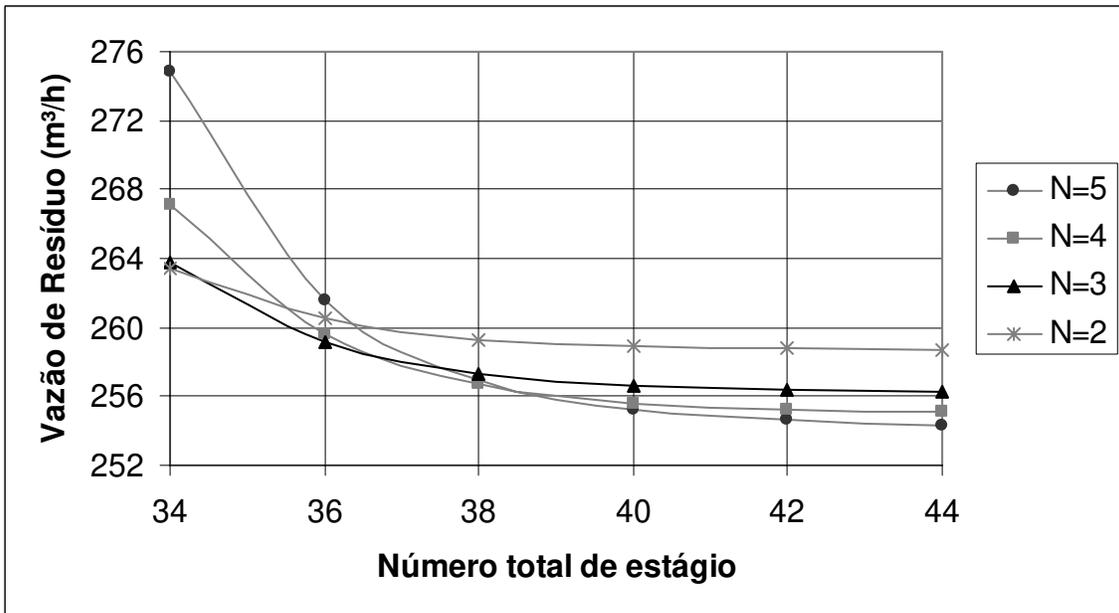


Figura 4.11: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 365°C.

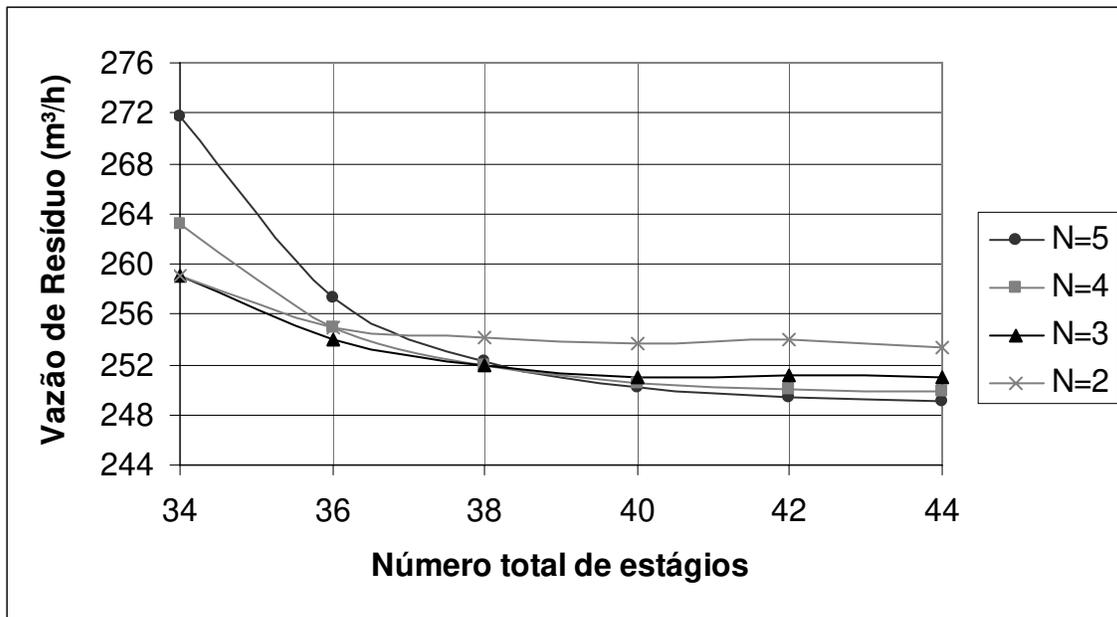


Figura 4.12: Vazão de resíduo em função do número total de estágios da coluna para diferentes estágios da seção de esgotamento a uma temperatura de alimentação de 370°C.

Nas Figuras 4.7 a 4.12, pode-se observar a redução da vazão de resíduo em função do aumento do número total de estágios. Entretanto, a variação na redução de resíduo começa a diminuir conforme aumento do número total de estágios. Isto pode ser verificado de uma forma geral nas Figuras 4.7 a 4.12, observando a variação da vazão de resíduo com o aumento do número total de estágios, na faixa de 40 a 44 estágios. Em todas estas figuras, a partir de aproximadamente 40-44 estágios, praticamente, não há variação de resíduo em função do número total de estágios da coluna. Apesar disso, na Figura 4.7, para dois estágios na seção de esgotamento, o comportamento não foi o mesmo, já que a vazão de resíduo em função do número total de estágios diminuiu até 42 estágios e em seguida, sofreu um aumento até alcançar 286 m³/h em 44 estágios.

O comportamento observado nas Figuras 4.7 a 4.12 apresenta o efeito esperado, ou seja, a redução da vazão de resíduo com o aumento do número de estágios. Isso significa que uma melhora no fracionamento na Coluna Atmosférica foi obtida com o aumento do número de estágios, já que a vazão de resíduo foi reduzida.

De um modo geral, é possível observar que à medida que a temperatura da corrente de alimentação é aumentada, os valores da vazão de resíduo são reduzidos

independentemente do número de estágios total e da seção de esgotamento. Ao comparar as Figuras 4.7 (temperatura de alimentação de 345°C) e 4.12 (temperatura de alimentação de 370°C), verifica-se que os valores da vazão de resíduo em função do número de estágios total e da seção de esgotamento são menores a 370°C do que a 345°C.

Na Figura 4.7 e 4.8, para números de estágios maiores que 38, observa-se que as vazões de resíduo são menores na medida em que o número de estágios da seção de esgotamento aumenta. Isso pode ser verificado comparando-se, por exemplo, dois perfis da curva de vazão de resíduo no caso de dois e de cinco estágios da seção de esgotamento, para número de estágios maiores que 38. Os valores de vazão de resíduo do perfil para cinco estágios na seção de esgotamento apresentaram-se menores do que aos valores de vazão de resíduo para dois estágios na seção de esgotamento.

O comportamento observado nas Figuras 4.7 e 4.8 se repete nas Figuras 4.9 a 4.11, entretanto para números de estágios, praticamente, maiores que 40. Já, na Figura 4.12, este mesmo comportamento é observado para número de estágios maiores que 42.

A partir das Figuras 4.7 a 4.12, foi possível determinar o estágio ótimo em que a vazão de resíduo é minimizada para cada número de estágios da seção de esgotamento e respectiva temperatura da corrente de alimentação. A descrição a seguir apresenta o modo como foi realizada a determinação do estágio ótimo.

Para cada perfil com um determinado número de estágios da seção de esgotamento da Figura 4.7, foi observado a partir de que estágio praticamente não ocorre variação de resíduo em função do aumento do número total de estágios. Este mesmo procedimento foi realizado para as Figuras 4.8 a 4.12.

As Tabelas 4.16 a 4.21 apresentam o estágio em que praticamente não ocorre mais variação na vazão de resíduo significativa para cada número de estágio da seção de esgotamento (N) nas Figuras 4.7 a 4.12, respectivamente. Este estágio representa o estágio ótimo da Coluna Atmosférica onde a vazão de resíduo alcança praticamente seu valor mínimo.

Adicionando mais estágios a uma coluna com um número de estágios ótimo, a vazão de resíduo é reduzida, mas não mais significativamente. Por exemplo, a uma temperatura de alimentação de 370°C, a vazão de resíduo é de 249,4 m³/h, para um número total estágios de 42, enquanto que para 44 estágios, a vazão de resíduo é de 249,1 m³/h,

ambos considerando cinco estágios na seção de esgotamento (Tabela 4.15). Com a adição de mais dois estágios, a variação na redução de resíduo é de apenas 0,3 m³/h. A diferença percentual da vazão de resíduo para 44 estágios em relação àquela para 42 estágios é de 0,12% $(=(249,4-249,1)/249,4)$. Isto foi considerado suficiente neste trabalho, embora o procedimento pode ser seguido até que se encontre uma diferença de 0%.

Dessa maneira, o resultado da otimização da Coluna Atmosférica em relação ao número de estágios total para cada posição de alimentação (número de estágios da seção de esgotamento) é apresentado nas Tabelas 4.16 a 4.21.

Tabela 4.16: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.7).

| N | Número total de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) |
|---|--------------------------|--------------------------------------|
| 5 | 42 | 281,3 |
| 4 | 40 | 282,3 |
| 3 | 38 | 284,0 |
| 2 | 42 | 284,0 |

Tabela 4.19: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.10).

| N | Número total de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) |
|---|--------------------------|--------------------------------------|
| 5 | 42 | 260,3 |
| 4 | 42 | 261,0 |
| 3 | 42 | 262,3 |
| 2 | 40 | 264,8 |

Tabela 4.17: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.8).

| N | Número total de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) |
|---|--------------------------|--------------------------------------|
| 5 | 42 | 273,7 |
| 4 | 42 | 274,5 |
| 3 | 40 | 276,0 |
| 2 | 40 | 278,6 |

Tabela 4.20: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.11).

| N | Número total de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) |
|---|--------------------------|--------------------------------------|
| 5 | 42 | 254,6 |
| 4 | 42 | 255,2 |
| 3 | 40 | 256,6 |
| 2 | 40 | 258,9 |

Tabela 4.18: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.9).

| N | Número total de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) |
|---|--------------------------|--------------------------------------|
| 5 | 42 | 266,7 |
| 4 | 42 | 267,4 |
| 3 | 40 | 268,9 |
| 2 | 40 | 271,4 |

Tabela 4.21: Número de estágios em que não ocorre variação de resíduo em função de N (Figura 4.12).

| N | Número total de estágios | Vazão de Resíduo (m ³ /h) |
|---|--------------------------|--------------------------------------|
| 5 | 42 | 249,4 |
| 4 | 42 | 250,0 |
| 3 | 40 | 251,0 |
| 2 | 40 | 253,6 |

Através das Tabelas 4.16 a 4.21, foi possível construir as Figuras 4.13 e 4.14. A Figura 4.13 apresenta a vazão de resíduo em função da temperatura da corrente de alimentação e de N, enquanto que a Figura 4.14, a vazão de resíduo em função do consumo energético e de N. Neste caso, a vazão de resíduo representada nas Figuras 4.13 e 4.14 é aquela em que o número de estágios da coluna é ótimo e que está apresentada nas Tabelas 4.16 a 4.21. O consumo energético representa a energia necessária para aquecer a corrente líquida do Pré-Flash (145°C) até uma temperatura específica da alimentação da Coluna Atmosférica. A Tabela 4.22 apresenta o consumo energético em função da temperatura da corrente de alimentação da Coluna Atmosférica utilizada nas simulações.

Tabela 4.22: Consumo energético em função da temperatura da corrente de alimentação.

| Temperatura de alimentação (°C) | Consumo energético (MW) |
|---------------------------------|-------------------------|
| 345 | 155,3 |
| 350 | 159,3 |
| 355 | 163,2 |
| 360 | 167,1 |
| 365 | 171,0 |
| 370 | 174,9 |

As Figuras 4.13 e 4.14 mostram a redução da vazão de resíduo conforme o aumento da temperatura de alimentação e consumo energético, respectivamente. Esta redução na vazão de resíduo ocorre devido a uma maior vaporização da corrente de alimentação que faz com que uma menor vazão de líquido na zona de expansão seja obtida. Menor vazão de líquido na zona de expansão significa menor vazão de líquido dirigindo-se ao fundo da coluna, ou seja, uma menor vazão de resíduo.

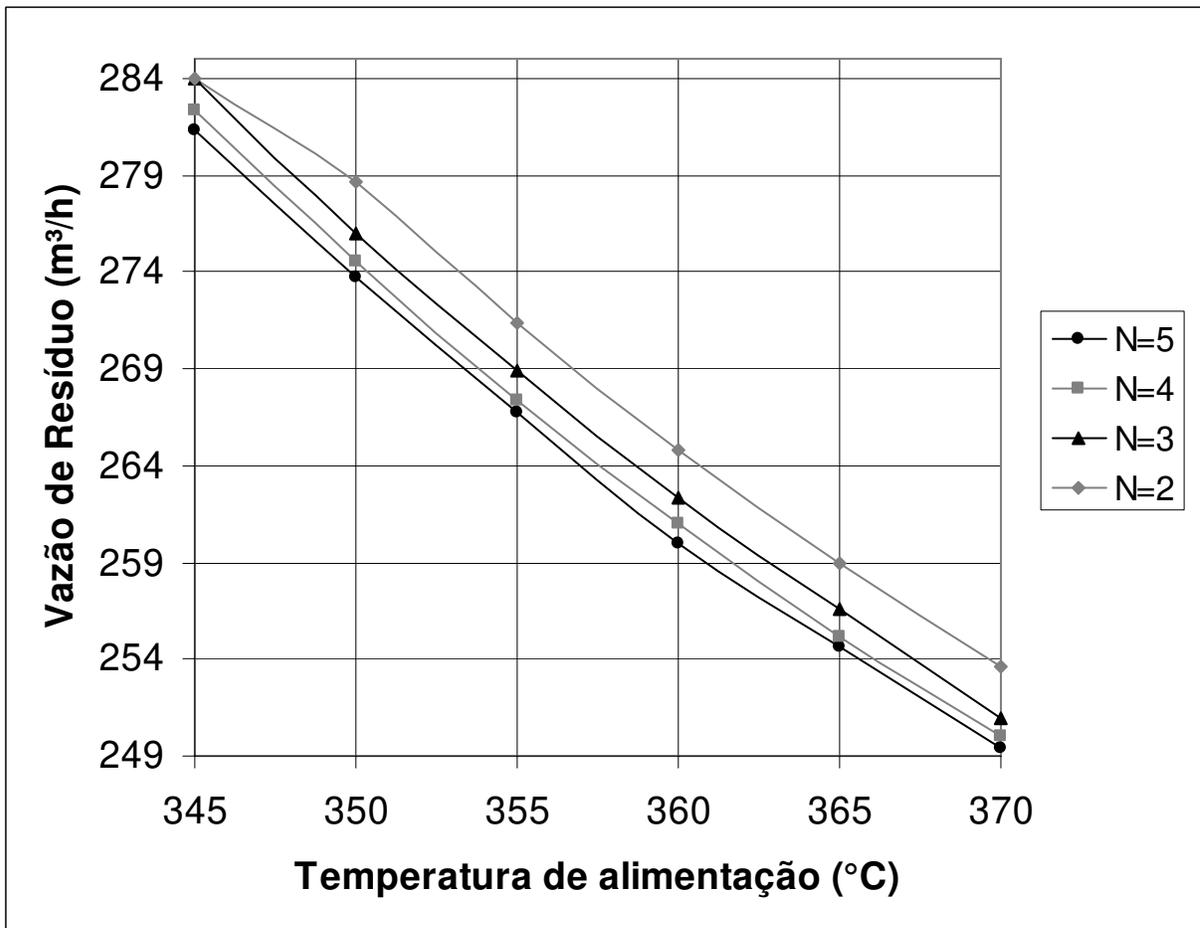


Figura 4.13: Vazão de Resíduo em função da temperatura da corrente de alimentação para diversos valores de número de estágios na seção de esgotamento.

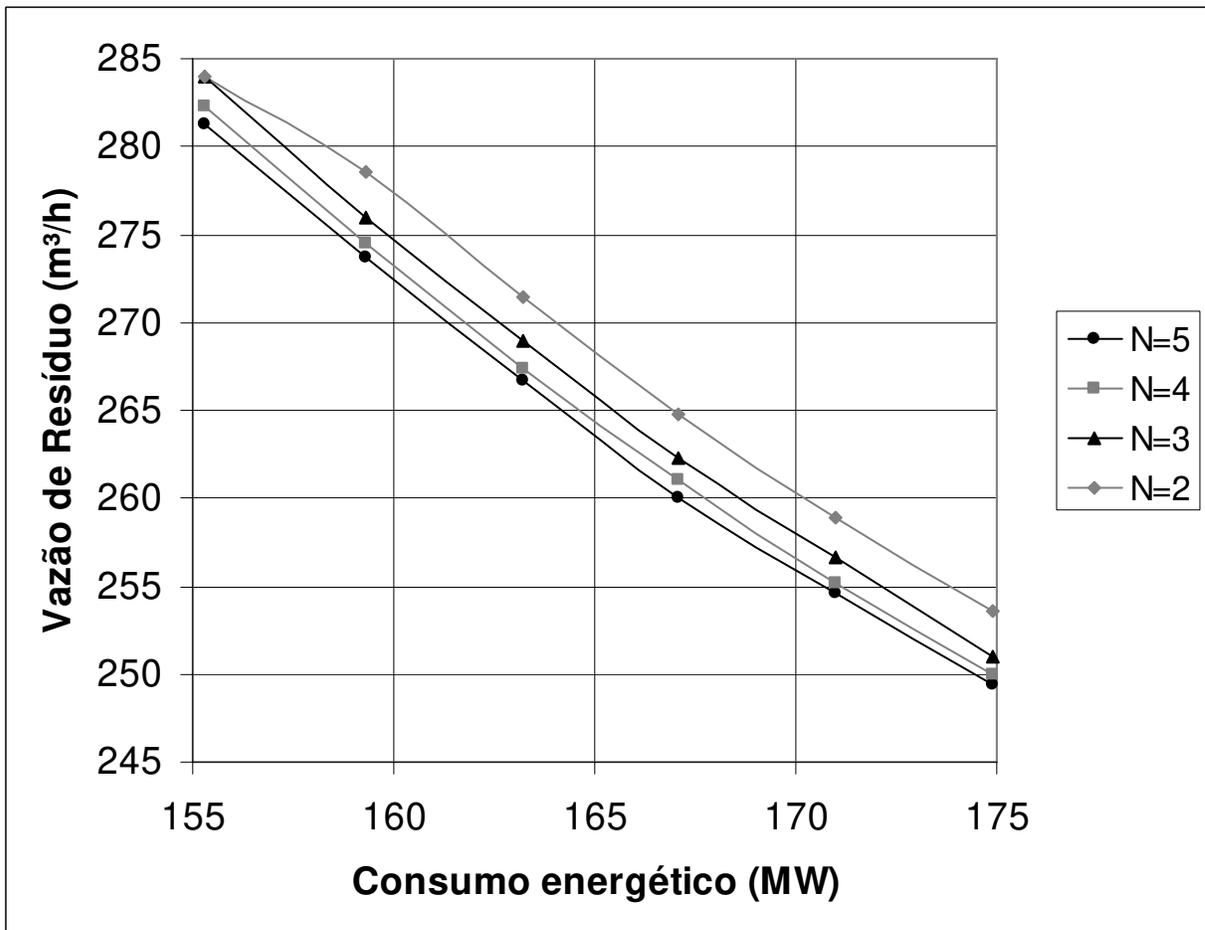


Figura 4.14: Vazão de Resíduo em função do consumo energético para diversos valores de número de estágios na seção de esgotamento.

4.3) CONCLUSÃO

Foram realizadas as otimizações das Colunas Atmosférica e Debutanizadora. A variável otimizada no caso da Coluna Atmosférica foi o número de estágios entre a alimentação e a retirada de gasóleo para que a vazão de resíduo fosse minimizada. Já, o número de estágios e a posição de alimentação da Coluna Debutanizadora foram otimizados para que a carga térmica do refeedor fosse minimizada.

Conforme resultados, ao se adicionar mais estágios a uma Coluna Debutanizadora, a carga térmica do refeedor é reduzida. Entretanto, a carga térmica do refeedor não

poderá mais ser reduzida significativamente ao se adicionar mais estágios a uma Coluna Debutanizadora de 35 estágios. Portanto, pode-se considerar que uma coluna de 35 estágios em que a posição de alimentação encontra-se no 16º estágio fornece a menor carga térmica de refeedor possível.

Com os resultados obtidos através das simulações da Coluna Atmosférica (Tabelas 4.16 a 4.21), foi possível determinar o número de estágios ótimo para diversos números da seção de esgotamento e temperatura de alimentação com o objetivo de minimizar a vazão de resíduo.

CAPÍTULO 5: PROCESSAMENTO DE PETRÓLEO LEVE, INTERMEDIÁRIO E PESADO

O petróleo é uma mistura de diversos componentes, em sua maioria hidrocarbonetos de diferentes classes (parafinas, naftenos e aromáticos). Sua composição depende do local de extração e do processo de formação. Devido a esta variedade na composição do petróleo, torna-se extremamente importante o conhecimento das conseqüências e implicações do processamento de diferentes tipos de petróleo. Desta forma, as refinarias têm de estar preparadas e possuir conhecimento tecnológico, caso exista a necessidade de processar outro tipo de petróleo ou ocorra uma mudança grande na composição.

Com base no que foi exposto acima, o objetivo deste capítulo é estudar e analisar o processamento de diferentes tipos de petróleo, neste caso, leve, intermediário e pesado por destilação atmosférica.

5.1) DESCRIÇÃO DO PROCESSO

O processo de destilação envolvido no estudo e análise do processamento dos três tipos de petróleo consiste em uma Coluna Pré-fracionadora e uma Coluna Atmosférica. A Figura 5.1 apresenta o ambiente de Simulação do Processo no Simulador, mostrando o fluxograma do processo.

Inicialmente, a corrente de petróleo alimenta a coluna pré-fracionadora a uma vazão de 1000 m³/h. Esta corrente está a 200°C e 3 atm. São retiradas duas correntes: nafta leve (instável), no topo e cru-reduzido, no fundo. A corrente de fundo (Corrente cru-reduzido, Figura 5.1) é a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica.

A Coluna Pré-fracionadora é composta de 20 estágios e condensador no topo. A corrente de alimentação encontra-se no 16º estágio (numerado de cima para baixo). Na Figura 5.1, vapor de água (Corrente CVPI) é alimentado no fundo da Coluna Pré-fracionadora. Nesta coluna, o vapor do topo da Coluna é condensado totalmente. Em

seguida, nafta leve e água são separadas. Parte da nafta leve condensada é retirada como produto, enquanto que a outra parte retorna à coluna como refluxo.

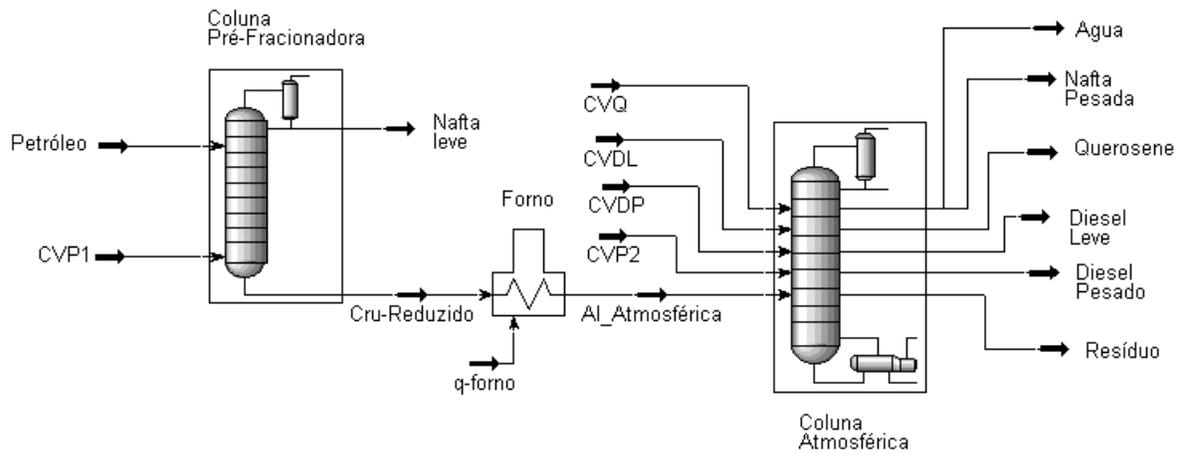


Figura 5.1: Fluxograma do processo no ambiente de simulação do HYSYS.

A corrente de fundo da Coluna Pré-fracionadora é aquecida por um forno. Logo após, esta corrente alimenta a Coluna Atmosférica. A corrente de energia para o aquecimento da corrente de alimentação da Coluna Atmosférica é denominada *q-forno*, de acordo com a Figura 5.1. A condição da corrente de alimentação (Corrente Al_Atmosférica da Figura 5.1) foi especificada constante a uma temperatura e pressão de 370°C e 1,5 atm. Além da corrente de alimentação, uma corrente de vapor de água (corrente CVP2) é injetada no fundo da coluna.

A Coluna Atmosférica possui 38 estágios. Além disso, opera com três refluxos circulantes (RC-1, RC-2 e RC-3), três colunas de *stripping* e condensador no topo. Nesta Coluna, Nafta pesada é retirada como produto de topo e o resíduo como produto de fundo, enquanto que, querosene, diesel leve e diesel pesado são obtidos pelas correntes laterais. A Figura 5.2 apresenta a Coluna Atmosférica em detalhes no Simulador HYSYS, incluindo as três colunas de *stripping* com 4 estágios cada uma e os refluxos circulantes.

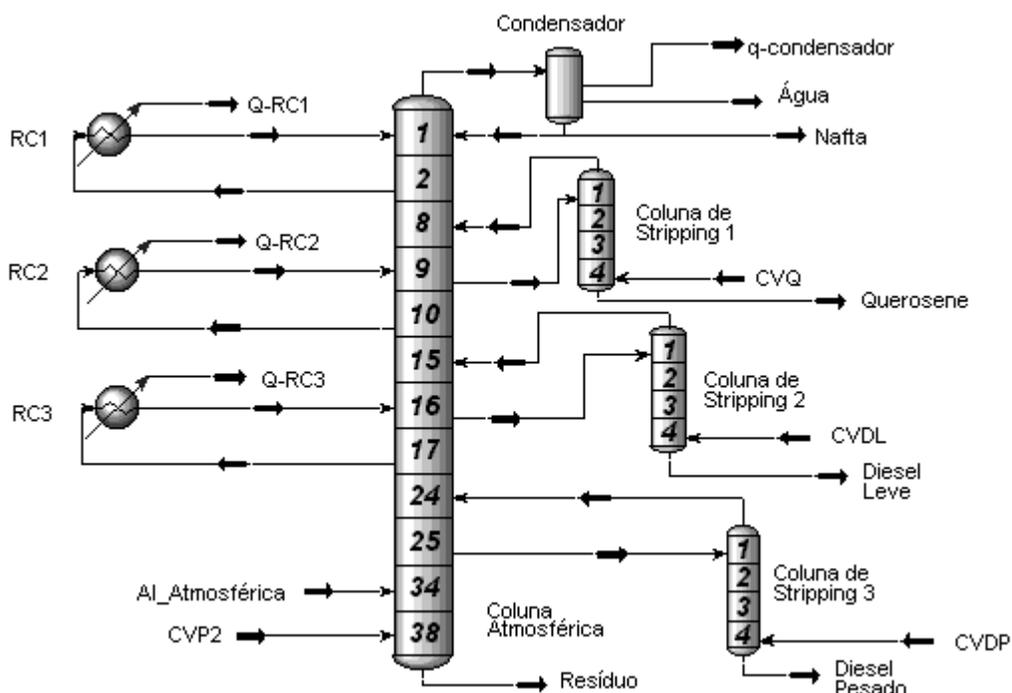


Figura 5.2: Coluna Atmosférica no ambiente de simulação do HYSYS.

As correntes laterais são enviadas a suas respectivas colunas de *stripping*. Correntes de vapor de água (CVQ, CVDL e CVDP) são injetadas no fundo destas colunas, conforme Figura 5.2. Na coluna de *stripping*, os componentes mais leves são removidos e retornam à Coluna Atmosférica. Neste caso, os produtos são retirados no fundo das colunas de *stripping*. Querosene, Diesel leve e pesado são retirados como produtos no fundo das colunas de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente, conforme Figura 5.2. A localização das correntes de retirada e retorno das colunas de *stripping* e dos circuitos dos refluxos circulantes é apresentada na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Localização das correntes de retirada e retorno na Coluna Atmosférica.

| Corrente | Posição de estágio |
|--|---------------------------|
| Alimentação | 34 |
| Nafta Pesada | Condensador |
| Querosene | 9 |
| Diesel Leve | 16 |
| Diesel Pesado | 25 |
| Corrente de retorno da coluna de <i>stripping</i> de querosene | 8 |
| Corrente de retorno da coluna de <i>stripping</i> de Diesel Leve | 15 |
| Corrente de retorno da coluna de <i>stripping</i> de Diesel Pesado | 24 |
| Corrente de retirada do primeiro refluxo circulante | 2 |
| Corrente de retirada do segundo refluxo circulante | 10 |
| Corrente de retirada do terceiro refluxo circulante | 17 |
| Corrente de retorno do primeiro refluxo circulante | 1 |
| Corrente de retorno do segundo refluxo circulante | 9 |
| Corrente de retorno do terceiro refluxo circulante | 16 |

$Q-RC1$, $Q-RC2$ e $Q-RC3$ (Figura 5.2) representam as correntes de energia para o resfriamento dos refluxos circulantes. Já, $q-condensador$ (Figura 5.2) é a corrente de energia necessária para a total condensação do vapor de topo. Após todo o vapor de topo da Coluna Atmosférica ser condensado, nafta pesada e água são separadas, de acordo com Figura 5.2. Uma parte de toda a nafta condensada retorna à coluna como refluxo.

Este processo de estudo foi adotado para que se pudesse analisar e avaliar como a influência do petróleo afeta o processo com condições de especificação de produtos fixadas. Se uma Torre Pré-Flash fosse utilizado no lugar da Coluna Pré-Fracionadora, a

composição e vazão da nafta (corrente de vapor) obtida neste seria diferente ao se processar diferentes petróleos nas mesmas condições de operação. Neste caso, deseja-se analisar a nafta retirada no pré-fracionamento nas mesmas condições de especificação para diferentes tipos de petróleo e condições de operação de coluna e corrente de alimentação.

5.2) DADOS DO PETRÓLEO

Os dados dos três tipos de petróleo foram obtidos no trabalho de Bagajewicz *et al.* (2001) para as simulações realizadas. O petróleo leve utilizado tem os dados apresentados nas Tabelas 3.2 e 3.3. As Tabelas 5.2 e 5.3 apresentam os dados para os petróleos intermediário e pesado.

Tabela 5.2: Dados do petróleo: Densidade e Curva PEV.

| Óleo | Intermediário | Pesado |
|-------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Densidade | 889 kg/m ³ (27,7° API) | 934 kg/m ³ (20,0° API) |
| % em volume | Temperatura (°C) | Temperatura (°C) |
| 5 | 94 | 133 |
| 10 | 131 | 237 |
| 30 | 265 | 344 |
| 50 | 380 | 482 |
| 70 | 506 | 640 |
| 90 | 670 | - |

Tabela 5.3: Composição dos *light-ends* do petróleo.

| Componente | % em Volume | |
|-------------|--------------------|-------------|
| | Óleo Intermediário | Óleo Pesado |
| Etano | 0,1 | 0 |
| Propano | 0,3 | 0,04 |
| Iso-butano | 0,2 | 0,04 |
| n-butano | 0,7 | 0,11 |
| Iso-pentano | 0 | 0,14 |
| n-pentano | 0 | 0,16 |
| Total | 1,3 | 0,49 |

5.3) ESPECIFICAÇÕES E CONSIDERAÇÕES PARA AS SIMULAÇÕES

Para as simulações, foram consideradas e mantidas constantes diversas especificações. Todas as especificações realizadas para as duas colunas do processo encontram-se na Tabela 5.4.

A faixa de pressão estabelecida do condensador ao último estágio da Coluna Pré-fracionadora e Atmosférica é de 202,6-216,4 kPa e 101,3-127,6 kPa, respectivamente. Além disso, não foi considerada queda de pressão em ambos os condensadores da Coluna Pré-fracionadora e Atmosférica.

Tabela 5.4: Especificações para as Colunas Pré-fracionadora e Atmosférica.

| Vazão de Vapor de água (200°C e 3 atm) | |
|--|-----------------------|
| <i>Stripping</i> de querosene (VQ) | 4000 kg/h |
| <i>Stripping</i> de diesel leve (VDL) | 2000 kg/h |
| <i>Stripping</i> de diesel pesado (VDP) | 2000 kg/h |
| Principal (VP1) | 5000 kg/h |
| Principal (VP2) | 6500 kg/h |
| Refluxo Circulante da Coluna Atmosférica | |
| Carga térmica do 1°, 2° e 3° Refluxo Circulante | $5 \cdot 10^7$ kJ/h |
| Vazão do 1° e 2° Refluxo Circulante | 400 m ³ /h |
| Vazão do 3° Refluxo Circulante | 200 m ³ /h |
| Temperatura ASTM D 86 das frações retiradas | |
| Nafta Leve (Coluna Pré-fracionadora) | 140°C (vol.100%) |
| Nafta Pesada (Coluna Atmosférica) | 170°C (vol.100%) |
| Querosene (Coluna Atmosférica) | 270°C (vol.100%) |
| Diesel Leve (Coluna Atmosférica) | 340°C (vol.100%) |
| Diesel Pesado (Coluna Atmosférica) | 370°C (vol.85%) |

5.4) RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

De acordo com as especificações estabelecidas e as condições de alimentação de ambas as colunas especificadas anteriormente, os principais resultados obtidos são apresentados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Tabela 5.5: Principais resultados obtidos para a Coluna Pré-fracionadora.

| Petróleo | Leve | Intermediário | Pesado |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Vazão de Nafta Leve (m ³ /h) | 187,4 | 110,9 | 32,9 |
| Vazão de Cru-Reduzido (m ³ /h) | 813 | 889,5 | 967,5 |
| Carga térmica do condensador (kJ/h) | 1,335.10 ⁸ | 8,315.10 ⁷ | 3,090.10 ⁷ |
| Razão de Refluxo | 0,92 | 0,90 | 0,98 |

Tabela 5.6: Principais resultados obtidos para a Coluna Atmosférica.

| Petróleo | Leve | Intermediário | Pesado |
|---|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Vazão de produtos (m³/h) | | | |
| Nafta Pesada | 66,1 | 51,4 | 19,4 |
| Querosene | 220 | 147,8 | 72,0 |
| Diesel Leve | 156,6 | 131,8 | 122,2 |
| Diesel Pesado | 69,7 | 50,1 | 86,7 |
| Resíduo | 298,6 | 508,3 | 667,0 |
| Gap 5-95 (Querosene-Nafta) (°C) | 23,1 | 22,6 | 31 |
| Gap 5-95 (Diesel leve-Querosene) (°C) | 15,6 | 17,2 | 17,9 |
| Gap 5-95 (Diesel pesado-Diesel leve) (°C) | 2,8 | 4,32 | -9,7 |
| Carga térmica do condensador (kJ/h) | 2,129.10 ⁸ | 1,336.10 ⁸ | 6,619.10 ⁷ |
| Vapor no topo da coluna (m ³ /h) | 553,3 | 326,7 | 114,6 |
| Razão de Refluxo | 6,91 | 5,1 | 4,1 |

Na Tabela 5.5 são apresentadas as vazões de produto obtidas, carga térmica do condensador e razão de refluxo da Coluna Pré-fracionadora. Já na Tabela 5.6, são apresentadas as vazões de produtos e de resíduo, Gap 5-95, carga térmica do condensador e razão de refluxo da Coluna Atmosférica.

De acordo com os resultados das Tabelas 5.5 e 5.6, pode-se observar a redução da vazão de nafta leve, nafta pesada, querosene e diesel leve na medida em que o petróleo leve, intermediário e pesado foi processado. Entretanto, este comportamento foi diferente para o Diesel Pesado. Neste caso, a vazão de diesel pesado em que petróleo leve é utilizado é maior do que a vazão em que o intermediário é usado. No entanto, quando petróleo pesado é processado, a vazão de diesel pesado obtida foi maior em comparação ao caso do petróleo leve e intermediário. Além disso, processando petróleo cada vez mais pesado, a Coluna Atmosférica produziu uma maior quantidade de resíduo conforme resultado apresentado na Tabela 5.6.

Os resultados apresentados são uma consequência da redução da quantidade de todas as frações destiláveis mais leves que o resíduo na medida em que o petróleo torna-se cada vez mais pesado (do leve ao pesado). Neste caso, as frações destiláveis são a nafta, querosene, diesel leve e pesado. Pode-se observar que todas estas frações tiveram suas vazões reduzidas, exceto para o diesel pesado, na medida em que petróleo cada vez mais pesado (do leve ao pesado) era processado.

Segundo a Tabela 5.5, a carga térmica do condensador da Coluna Pré-fracionadora foi reduzida conforme petróleo cada vez mais pesado foi utilizado. Petróleos mais pesados contêm menores quantidades de componentes mais leves presentes na nafta que, principalmente, são retirados no topo da coluna. Isto pode ser verificado através da redução da vazão de nafta leve obtida na Coluna Pré-fracionadora na medida em que petróleo mais pesado foi processado. Como ocorreu redução na quantidade destes componentes e a razão de refluxo praticamente não variou, a quantidade de vapor do topo da Coluna a ser condensado foi reduzida e, conseqüentemente, resultou na redução da carga térmica do condensador necessária para a condensação total. Além disso, a carga térmica do condensador da Coluna Atmosférica e a vazão de vapor de topo foram reduzidas conforme petróleo mais pesado foi sendo processado, de acordo com a Tabela 5.6. A redução na carga térmica do condensador da Coluna Atmosférica deve-se ao fato de que uma menor quantidade de vapor no topo da coluna foi obtida, já que na corrente de alimentação da Coluna Atmosférica, ocorreu redução na quantidade de componentes leves presentes na nafta na medida em que petróleo mais pesado foi utilizado. Além disso, a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica teve a quantidade de componentes leves reduzida ainda

mais porque nafta leve foi retirada na Coluna Pré-fracionadora e sua vazão de retirada aumentou conforme petróleo leve, intermediário e pesado foi processado.

A razão de refluxo da Coluna Atmosférica foi reduzida na medida em que petróleo mais pesado foi processado. Entretanto, pode-se observar que a razão de refluxo na Coluna Pré-fracionadora não foi afetada significativamente com o processamento dos diferentes tipos de petróleo.

O Gap 5-95 (Diesel pesado-Diesel leve) no caso do petróleo pesado indica um grau de fracionamento entre estas duas frações menor em comparação ao caso do petróleo leve e intermediário. Na tentativa de aumentar o Gap 5-95 (Diesel pesado-Diesel leve) no caso do petróleo pesado, aumentou-se a vazão de vapor da coluna de *stripping* 3. Os resultados da Figura 5.3 apresentam o valor do Gap em função da vazão de Vapor.

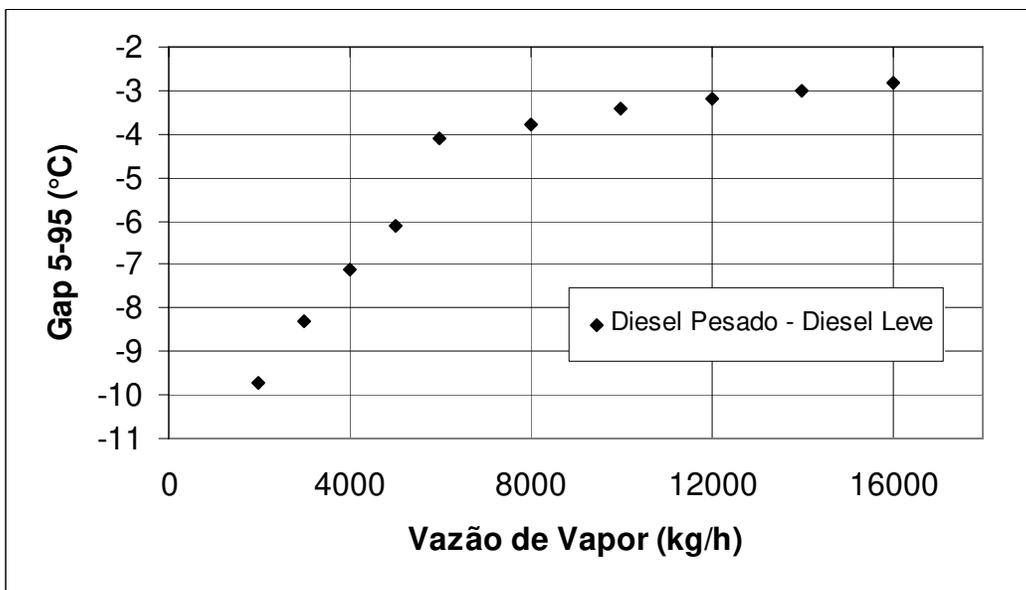


Figura 5.3: Gap 5-95 (Diesel Pesado-Diesel Leve) em função da Vazão de Vapor da Coluna de *Stripping* 3.

Conforme Figura 5.3, o Gap 5-95 aumentou em função do aumento da vazão de Vapor de *Stripping* 3. Entretanto, aproximadamente, em 8000 kg/h, a variação no Gap 5-95 começa a diminuir em função do aumento da vazão de Vapor. Desta forma, a partir dos

resultados apresentados na Figura 5.3, o Gap 5-95 pode ser ajustado de forma a aumentar em função do aumento da vazão de vapor.

A Tabela 5.7 apresenta o consumo energético do forno para aquecer a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica até a temperatura especificada de 370°C.

Tabela 5.7: Consumo energético do forno para o processo em estudo.

| Petróleo | Consumo energético do forno |
|---------------|-------------------------------|
| Leve | 132,0 MW ($4,751.10^8$ kJ/h) |
| Intermediário | 132,9 MW ($4,784.10^8$ kJ/h) |
| Pesado | 133,9 MW ($4,822.10^8$ kJ/h) |

O Consumo energético do forno aumentou conforme petróleo mais pesado foi sendo processado, segundo resultados apresentados na Tabela 5.7. Como a vazão da corrente de alimentação aumentou, a carga térmica necessária teve de ser aumentada para aquecer até a temperatura fixada (370°C), resultando no aumento do consumo energético do forno de acordo com a Tabela 5.7.

5.5) ESTUDO DO PROCESSO DE DESTILAÇÃO COM PRÉ-FRACIONADORA E COM TORRE PRÉ-FLASH

Serão realizadas análises comparativas entre o processo de destilação envolvendo a Coluna Pré-fracionadora e a Torre Pré-Flash. Neste caso, o objetivo é comparar ambos os processos em termos de vazões de produtos obtidas, verificando as principais diferenças em se utilizar uma Coluna Pré-fracionadora ou uma Torre Pré-Flash. A Figura 5.4 apresenta o processo de destilação envolvendo a Torre Pré-Flash e a Coluna Atmosférica. Neste caso, será analisada a comparação entre os processos das Figuras 5.1 e 5.4.

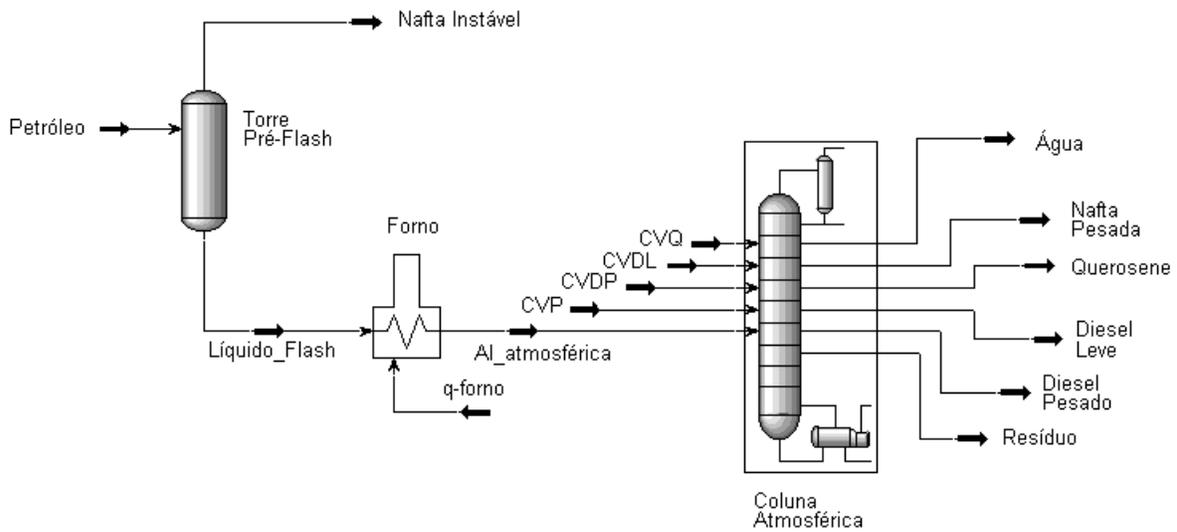


Figura 5.4: Processo de destilação envolvendo a Torre Pré-Flash e a Coluna Atmosférica.

As especificações e considerações (item 5.3) realizadas para o processo da Figura 5.1 serão mantidas. Para o processo da Figura 5.4, foram consideradas as seguintes especificações:

- 1) A Torre Pré-Flash é operada a 145°C e 3 atm. Além disso, este foi considerado isotérmico. A vazão de da corrente de petróleo alimentando o Pré-Flash é de $1000 \text{ m}^3/\text{h}$.
- 2) A temperatura da corrente de alimentação da Coluna Atmosférica é de 370°C e a pressão é de 1,5 atm.
- 3) Todas as especificações e considerações para a Coluna Atmosférica são as mesmas realizadas para o processo da Figura 5.1 (item 5.3).
- 4) Os produtos retirados da Coluna Atmosférica são os mesmos do processo da Figura 5.1.

A corrente nafta instável (Figura 5.4) é a corrente de vapor da Torre Pré-Flash obtido na vaporização do petróleo nas condições de operação estabelecidas (145°C e 3 atm). A corrente Líquido_Flash é a corrente líquida obtida na Torre Pré-Flash, a corrente Al_atmosférica é a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica e CVP é a corrente de vapor de água principal da Coluna Atmosférica.

Na Coluna Atmosférica do processo da Figura 5.4, há três refluxos circulantes e três colunas de *stripping*, além disso, a localização das correntes de retirada e retorno é a mesma estabelecida na Tabela 5.1. Na Figura 5.4, as correntes de vapor para as colunas de *stripping* 1, 2 e 3 são, respectivamente, CVQ, CVDL e CVDP.

Ambos os processos são estudados, adotando-se o petróleo leve. Os resultados obtidos nas simulações da Torre Pré-Flash e da Coluna Pré-fracionadora para os dois processos (Figuras 5.1 e 5.4), respectivamente, são apresentados na Tabela 5.8 a seguir. Na Tabela 5.9, são apresentados os resultados obtidos nas simulações da Coluna Atmosférica dos processos da Figura 5.1 e 5.4.

Tabela 5.8: Principais resultados obtidos na Torre Pré-Flash e na Coluna Pré-fracionadora dos processos da Figura 5.1 e 5.4.

| Equipamento | Coluna Pré-fracionadora (Figura 5.1) | Torre Pré-Flash (Figura 5.4) |
|---|---|---|
| Vazão de produtos | | |
| Nafta Instável (m ³ /h) | 187,4 (Leve) | 43,1 |
| Cru-Reduzido (alimentação da Coluna Atmosférica, m ³ /h) | 813,0 | 956,9 |
| PFE da nafta instável (ASTM D86) (°C) | 140,0 | 179,8 |

Tabela 5.9: Principais resultados obtidos na Coluna Atmosférica para os processos da Figura 5.1 (Torre Pré-Flash) e 5.4 (Coluna Pré-fracionadora).

| Coluna Atmosférica | Processo | |
|--|--------------------------------------|-------------------------------------|
| | Com Pré-fracionadora (Figura 5.1) | Com Torre Pré-Flash (Figura 5.4) |
| Vazão de produtos (m³/h) | | |
| Nafta Pesada | 66,1 | 230,2 |
| Querosene | 220 | 203,7 |
| Diesel Leve | 156,6 | 158,6 |
| Diesel Pesado | 69,7 | 66,2 |
| Resíduo | 298,6 | 298,6 |
| Gap 5-95 (Querosene-Nafta) (°C) | 23,1 | 33,3 |
| Gap 5-95 (Diesel leve- Querosene) (°C) | 15,6 | 16,5 |
| Gap 5-95 (Diesel pesado- Diesel leve) (°C) | 2,8 | 4,2 |
| Carga térmica do condensador (kJ/h) | 2,129.10 ⁸ | 3,45. 10 ⁸ |
| Vapor no topo da coluna (m ³ /h) | 553,3 | 873,2 |
| Razão de Refluxo | 6,91 | 2,73 |

De acordo com simulação realizada para a Torre Pré-Flash a 145°C e 3 atm, processando petróleo leve, o PFE da nafta instável obtida na corrente de vapor da Torre Pré-Flash é de 179,8°C e uma vazão de retirada de 43,1 m³/h (Tabela 5.8). Já, o PFE da nafta instável e leve obtida na Coluna de Pré-fracionadora é de 140°C, pois esse valor foi especificado na Tabela 5.4. Com estes resultados apresentados na Tabela 5.8, pode-se observar que o fracionamento inicial do petróleo realizado pela Coluna Pré-fracionadora obteve um melhor desempenho em comparação ao realizado pela Torre Pré-Flash devido a dois motivos:

- 1) O PFE da nafta instável obtida na Coluna Pré-fracionadora (140°C) foi menor do que o PFE da nafta instável obtida na Torre Pré-Flash (179,8°C).

2) A vazão de retirada da nafta instável na Coluna Pré-fracionadora (187,4 m³/h) foi maior do que a vazão da nafta instável na Torre Pré-Flash (43,1 m³/h).

A vazão de Resíduo para ambos os processos manteve-se constante, de acordo com a Tabela 5.9. No processo com a Coluna Pré-fracionadora, Querosene e Diesel Pesado têm suas vazões maiores em comparação ao processo operando com Torre Pré-Flash, de acordo com a Tabela 5.9. As vazões de Diesel Leve e Nafta Pesada (obtida na Coluna Atmosférica) no processo com a Coluna Pré-fracionadora foram menores do que no processo com Torre Pré-Flash, conforme Tabela 5.9.

Como ocorreu uma maior retirada de nafta instável na Coluna Pré-fracionadora em comparação àquela na Torre Pré-Flash, uma menor quantidade de nafta pesada foi obtida na Coluna Atmosférica no caso do processo com Coluna Pré-fracionadora, de acordo com resultado apresentado na Tabela 5.8 e 5.9.

O Gap 5-95 (Querosene-Nafta, Diesel Leve-Querosene e Diesel Pesado-Diesel Leve) foram maiores na Coluna Atmosférica do processo com Torre Pré-Flash, conforme Tabela 5.9. Deste modo, o fracionamento entre todas as frações obteve um melhor desempenho na Coluna Atmosférica do processo com Torre Pré-Flash.

Comparando os resultados obtidos na Tabela 5.9, pode-se observar que a carga térmica do condensador e a vazão do vapor no topo da Coluna Atmosférica são menores para o processo com Coluna Pré-fracionadora do que para aquele com Torre Pré-Flash. A menor carga térmica do condensador da Coluna Atmosférica observada ocorre devido a menor vazão de vapor no topo da Coluna Atmosférica a ser condensada totalmente, conforme resultado obtido na Tabela 5.9.

A corrente de alimentação da Coluna Atmosférica no processo com a Coluna Pré-fracionadora tem uma menor quantidade de componentes mais leves em comparação à alimentação no processo com a Torre Pré-Flash. Isto ocorreu devido a uma maior retirada de nafta instável (leve) da corrente de petróleo através da Coluna Pré-fracionadora. Se a quantidade destes componentes mais leves na alimentação da Coluna Atmosférica for menor, conseqüentemente, a vazão de vapor esperada no topo da Coluna Atmosférica deve ser menor, já que estes componentes mais leves vaporizados nesta coluna são retirados praticamente no topo.

Além disso, de acordo com a Tabela 5.9, a razão de refluxo observada na Coluna Atmosférica no processo com a Pré-fracionadora foi maior do que com a Torre Pré-Flash.

A partir dos resultados obtidos, verifica-se que ambos os processos comparados forneceram a mesma vazão de resíduo. Portanto, um processo não apresenta vantagens em relação ao outro em relação à minimização de resíduo. Entretanto, pode-se verificar que a Coluna Pré-fracionadora permite um melhor fracionamento inicial da Nafta instável em relação à Torre Pré-Flash. Isso ocorreu porque através da Coluna Pré-fracionadora uma maior quantidade de nafta instável e mais leve foi obtida em comparação à Torre Pré-Flash.

5.6) CONCLUSÃO

A avaliação do processamento do óleo leve, intermediário e pesado foi realizada por meio das simulações sob diversas especificações e no processo considerado e descrito anteriormente. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que a vazão de nafta leve obtida na Coluna Pré-fracionadora reduziu conforme petróleo mais pesado foi processado. Além disso, o mesmo comportamento ocorreu para a nafta pesada, querosene e diesel leve na Coluna Atmosférica. A redução na vazão de produtos é uma consequência da evidente redução destas frações na medida em que o petróleo torna-se mais pesado.

O consumo energético do forno para o aquecimento da corrente de alimentação até 370°C (Tabela 5.7) aumentou ao se processar petróleo mais pesado. Além disso, foi realizada a avaliação entre o processo com Torre Pré-Flash e aquele com Coluna Pré-fracionadora. Com esta avaliação, verificou-se um melhor fracionamento inicial do petróleo realizado pela Coluna Pré-fracionadora. Isso ocorreu devido a:

- O PFE da nafta instável obtida na Coluna Pré-fracionadora (140°C) foi menor do que o PFE da nafta instável obtida na Torre Pré-Flash (179,8°C).
- A vazão de retirada da nafta instável na Coluna Pré-fracionadora (187,4 m³/h) foi maior do que a vazão da nafta instável na Torre Pré-Flash (43,1 m³/h).

Nesta avaliação, observou-se que, além disso, a vazão de resíduo obtida em ambos os processos manteve-se constante.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES E SUGESTÕES

6.1) CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo do processo de destilação do petróleo. Neste caso, o processo envolveu três principais equipamentos: Torre Pré-Flash, Coluna Atmosférica e Coluna Debutanizadora. Através das simulações realizadas, a avaliação e o estudo consistiram em analisar as principais variáveis do processo sob determinadas condições e especificações, mostrando seus principais efeitos.

A temperatura e pressão de alimentação da Torre Pré-Flash foram analisadas, mostrando seus principais efeitos sobre a corrente de vapor (nafta instável) e a corrente líquida (corrente de alimentação da Coluna Atmosférica).

O aumento da temperatura de alimentação da Torre Pré-Flash permitiu não somente uma maior vaporização da corrente de petróleo, mas também a vaporização de componentes mais pesados. O Ponto Final de Ebulição da corrente de vapor do Pré-Flash aumentou conforme o aumento da temperatura de alimentação. Desta forma, isto mostrou a vaporização de componentes mais pesados tornando a nafta instável (corrente de vapor do Pré-Flash) mais pesada.

Além disso, verificou-se que o aumento da pressão da Torre Pré-Flash fez com que ocorresse a redução da vaporização e do Ponto Final de Ebulição da corrente de vapor (nafta instável).

O estudo das variáveis da Coluna Atmosférica consistiu na análise das seguintes variáveis: Temperatura de alimentação, Vazão de Vapor Principal, Vazão de Vapor da Coluna de *Stripping* (de querosene, diesel e gasóleo), Refluxo Circulante, Vazão de Produtos, Número de Estágios. As análises realizadas permitiram que fosse verificado o comportamento das principais variáveis afetadas.

O aumento da temperatura de alimentação provocou o aumento da vaporização dos componentes da alimentação na zona de expansão. Os resultados obtidos nas simulações e análises realizadas permitiram que, principalmente, ocorresse a redução do Ponto Final de Ebulição (ASTMD86) do gasóleo, o aumento do Ponto Inicial de Ebulição

(TBP) do resíduo e o aumento da temperatura TBP na qual 5% e 10% do volume do resíduo é vaporizado. Além disso, foi verificado que ocorre o aumento do sobre-vaporizado e da carga térmica do condensador em função do aumento da temperatura de alimentação.

Com a análise da vazão de vapor principal, foi possível observar o comportamento desta variável na Coluna Atmosférica. Isto permitiu concluir que ocorreu uma maior vaporização dos componentes mais leves do resíduo e dos produtos, neste caso, gasóleo e diesel, acarretando principalmente, no aumento do Ponto Inicial de Ebulição (TBP) do resíduo e na redução do Ponto Final de Ebulição do gasóleo e diesel.

A coluna de *stripping* da Coluna Atmosférica é responsável pela remoção de componentes mais leves da corrente lateral. Conforme resultados obtidos, o aumento da vazão de vapor das colunas de *stripping* 1, 2 e 3 permite que o Ponto Inicial de Ebulição (ASTM D86) de querosene, diesel e gasóleo aumente, respectivamente. Além disso, pode-se observar que o fracionamento entre nafta e querosene, diesel e querosene, gasóleo e diesel aumentou conforme o aumento da vazão de vapor das colunas de *stripping* 1, 2 e 3, respectivamente.

De acordo com os resultados obtidos, a carga térmica do condensador apresentou aumento com o aumento da vazão de vapor principal e das colunas de *stripping*. Isso ocorreu devido ao aumento da vazão de vapor no topo da coluna em função do aumento da vazão de vapor de água. Conseqüentemente, a carga térmica necessária para condensar todo o vapor de topo foi aumentada.

Através das diversas simulações, foi possível observar que o aumento da vazão de retirada do produto provoca o aumento do Ponto Final de Ebulição (ASTM D86) do próprio produto e os retirados logo abaixo.

O refluxo circulante permite a diminuição do fluxo de vapor ao longo da coluna devido à redução de temperatura nos estágios afetados pela corrente fria do refluxo circulante que retorna. Conseqüentemente, a vazão de vapor no topo foi reduzida e isso provocou a redução da carga térmica do condensador.

Foi realizada uma avaliação do número de estágios das diversas seções da Coluna Atmosférica e das Colunas de *Stripping*. Desta forma, pode-se concluir que:

- O aumento do número de estágios na seção entre a alimentação da Coluna Atmosférica e a retirada de gasóleo provocou a redução da vazão de resíduo.

- O aumento do número de estágios entre a retirada de produtos provocou o aumento da vazão de retirada do produto superior, mostrando uma melhora no fracionamento.
- O aumento no número de estágios da Coluna de *Stripping* 2 e 3, principalmente, permitiram um melhor fracionamento entre os produtos envolvidos através da variável Gap 5-95.

Através do estudo realizado da Coluna Debutanizadora, pode-se verificar que o aumento da carga térmica do refeedor provocou a redução da Pressão de Vapor Reid, a redução do intemperismo e a redução da composição do n-butano e do iso-pentano na corrente de nafta estabilizada e GLP, respectivamente. Estes resultados indicam que o aumento da carga térmica permitiu que ocorresse uma melhor separação entre componentes, acarretando na melhora na retirada dos componentes mais leves da nafta estabilizada.

O efeito provocado por uma maior temperatura de alimentação no processo todo foi estudado. Com o aumento da temperatura de alimentação, verificou-se que:

- Uma maior vazão de nafta instável foi obtida e, conseqüentemente, uma maior vazão de nafta estabilizada e GLP na Coluna Debutanizadora.
- Ocorreu a redução da vazão da corrente de alimentação e, conseqüentemente, a redução praticamente somente da nafta obtida na Coluna Atmosférica.
- A redução do Ponto Final de Ebulição (ASTM D86) da Nafta Estabilizada.
- Não houve grandes variações do Intemperismo.
- O consumo energético para aquecer a corrente de alimentação da Coluna Atmosférica diminuiu devido à redução da vazão de alimentação da Coluna Atmosférica.
- A carga térmica do refeedor da Coluna Debutanizadora aumentou devido ao aumento da vazão de alimentação da Coluna Debutanizadora.

A otimização das Colunas Atmosférica e Debutanizadora foi realizada por meio das diversas simulações. Para a Coluna Debutanizadora, determinou-se o número de estágios e a posição de alimentação de modo que a carga térmica do refeedor fosse minimizada. Desta forma, conclui-se que uma Coluna Debutanizadora de 35 estágios com a alimentação no 16º estágio permite que a carga térmica do refeedor seja mínima. Neste

caso, para a Coluna Atmosférica, foi possível determinar o número de estágios considerando várias posições de alimentações de modo que a vazão de resíduo alcançasse valores mínimos.

O processamento do óleo leve, intermediário e pesado sob determinadas considerações foi estudado. Desta forma, pode-se verificar as principais implicações na vazão de produtos e resíduo no processo. Foi mostrado que ao se processar um óleo mais pesado, a quantidade de resíduo aumenta e de produtos diminui. Entretanto, esse comportamento não foi observado para o diesel pesado. Neste caso, a primeira e a segunda maiores vazões de diesel pesado foram obtidas processando óleo pesado e leve, respectivamente.

6.2) SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista as considerações para a simulação do processo de estudo, a abrangência e a complexidade da área de destilação do petróleo alguns pontos a serem explorados em trabalhos futuros podem ser citados.

Neste trabalho, as simulações foram realizadas adotando-se uma série de considerações para a geração de pseudocomponentes da corrente de petróleo. Neste caso, é interessante um estudo que mostre as principais influências na geração da corrente de petróleo, adotando-se diferentes considerações para a criação dos pseudocomponentes, principalmente em petróleos mais pesados. Desta forma, pode-se verificar que implicações ocorrem para a geração da corrente de petróleo e propriedades.

Outros pontos que podem ser abordados em trabalhos futuros seriam a integração energética do processo estudado e a otimização de outras variáveis no processo para que a vazão de retirada de certos produtos seja maximizada sob determinadas propriedades especificadas. Além disso, estudos de eficiência de estágios para misturas com petróleo também são temas que podem ser abordados em trabalhos futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAGAJEWICZ, M, J. On the design flexibility of Crude Atmospheric units. *Chem. Eng. Comm.*, v. 166, p. 111-136, 1998.

BAGAJEWICZ, M. J., JI, S. Rigorous procedure for the Design of Conventional Atmospheric Crude Fractionation Units. Part I: Targeting. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 40, n. 2, p. 617-626, 2001, a.

BAGAJEWICZ, M. J., SOTO, J. Rigorous procedure for the Design of Conventional Atmospheric Crude Fractionation Units. Part II: Heat Exchanger Networks. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 40, n. 2, p. 627-632, 2001, b.

BASAK, K, ABHILASH, K. S., GANGULY, S., SARAF, D. N. On -Line Optimization of a Crude Distillation Unit with Constraints on Product Properties. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 41, p. 1557-1568, 2002.

BARLETTA, A. F. Revamping Crude Units. *Hydrocarbon Processing*, p. 51-57, 1998.

BRIONES, V., PÉREZ, A. L., CHÁVEZ, R. M., GARFIAS, M., ROSAL, R. D., RAMÍREZ, N. Pinch analysis used in retrofit design of distillation units. *Oil and Gas Journal*, p. 41-46, 1999.

CHATERJEE, T., SARAF, D. N. On-line estimation of product properties for crude distillation unit. *Journal of Process Control*, v. 14, p. 61-77, 2004.

DAVE, D.J., DABHIYA, MURTUZA, Z., SATYADEV, S. V. K., GANGULY, S., SARAF, D. N. On line tuning of a steady state crude distillation unit model for real time applications. *Journal of Process Control*, v. 13, p. 267–282, 2003.

EDMISTER, W.C., LEE, B. I. *Applied Hydrocarbon Thermodynamics*, v. 1, Gulf Publishing, Houston, 1984.

GADALLA, M., JOBSON, M., SMITH, R. Shortcut models for retrofit Design of Distillation Columns. *Institution of Chemical Engineers*, v. 81, Part A, p. 971-986, 2003, a.

GADALLA, M., JOBSON, M., SMITH, R. Optimization of existing Heat-Integarted refinery Distillaion systems. *Institution of Chemical Engineers*, v. 81, Part A, p. 147-152, 2003, b.

GARY, J. H., HANDWERK, G. E. *Petroleum Refining: Technology and Economics*. Marcel Dekker Inc, New York, p. 36-67, 1994.

HUANG, F., ELSHOUT, R. Optimizing the Heat Recovery of Crude Units. *Chem. Eng. Prog*, v. 72, n. 7, p. 68, 1976.

JI, S., BAGAJEWICZ, M. Design of Crude Fractionation Units with Preflashing or Prefractionation: Energy Targeting. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 41, n. 12, p. 3003-3011, 2002, a.

JI, S., BAGAJEWICZ, M. On the Energy Efficiency of Stripping-Type Crude Distillation. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 41, n. 23, p. 5819-5825, 2002, b.

Jl, S., BAGAJEWICZ, M. Design of Crude Distillation Plants with Vacuum Units. I. Targeting. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 41, n. 24, p. 6094-6099, 2002, c.

KESLER, M. G. Retrofitting refinery and petrochemical plants. *Chemical Engineering Progress*, p. 59-64, 1998.

KUMAR, V., SHARMA, A., CHOWDHURY, I. R., GANGLUY, S., SARAF, D. N. A crude distillation unit model suitable for online applications. *Fuel Processing Technology*, v. 73, p. 1-21, 2001.

LI, W., HUI, C. W., LI, A. Integrating CDU, FCC and product blending models into refinery planning. *Computers and Chemical Engineering*, v. 29, n. 9, p. 2010-2028, 2005.

LIEBMANN, K., DHOLE, V. R., JOBSON, M. Integrated Crude Distillation Design. *Computers and Chemical Engineering*, v. 19, p. S119-S124, 1995.

LIEBMANN, K., DHOLE, V. R., JOBSON, M. Integrated Design of a Conventional Crude Oil Distillation Tower using Pinch analysis. *Institution of Chemical Engineers*, v. 76, n. 3, Part A, p. 335-347, 1998.

MARTIN, G. R., CHEATHAM, B. E. Keeping down the cost of revamp investment. *Petroleum Technology Quarterly*, p. 99-107, 1999.

MARTIN, G. R.; LUQUE, E.; RODRIQUEZ, R. Revamping crude unit increases reliability and operability. *Hydrocarbon Processing*, p. 45-56, 2000.

MIZOGUCHI, A., MARLIN, T. E., HRYMAK, N. Operations Optimization and Control Design for a Petroleum Distillation Process. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 73, p. 896-907, 1995.

NETO, EUCLIDES ALMEIDA. *Controle preditivo multimodelos de uma torre debutanizadora*. São Paulo: Faculdade de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, 1999. 179 p. Tese (Mestrado).

NELSON, W.L. *Petroleum Refinery Engineering*, Fourth edition, Mac Graw-Hill, 1969.

PERRY, J. H. *Perry's Chemical Engineers' handbook*, Seventh Edition, McGraw- Hill, 1997.

RAMASWAMY, R. C., SARAF, D. N. Reduced Order Modeling of a Crude Distillation Unit for Online Applications. *Journal of Chemical Engineering of Japan*, v. 35, n. 8, p. 714-728, 2002.

RIAZI, M. R.; DAUBERT, T. E. *Hydrocarbon Process*, v. 59, n. 3, p. 115-116, 1980.

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

SHARMA, R., JINDAL, A., MANDALA, D., JANA, S. K. Design/Retrofit Targets of Pump-Arounds Refluxes for Better Energy Integration of a Crude Distillation Column. *Ind. Eng. Chem. Res.*, v. 38, p. 2411-2417, 1999.

TERRANOVA, B.; WESTERBERG, A.; Temperature-Heat Diagrams for Complex Columns. 1. Intercooled/Interheated Distillation Columns. *Ind. Eng. Chem. Res.*; v. 28; p. 1374-1379, 1989.

WATKINS, R.N. *Petroleum Refining Distillation*. Gulf Publishing Company: Houston, TX, 1979.