



Projeto de uma Coluna de Destilação a Vácuo para Obtenção de Óleos Lubrificantes

Raphael Coimbra Ferreira

Projeto Final de Curso

Orientadora

Prof^a. Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D.Sc.

Setembro de 2009

PROJETO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO A VÁCUO PARA OBTENÇÃO DE ÓLEOS LUBRIFICANTES

Raphael Coimbra Ferreira

Projeto Final de Curso submetido ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Engenheiro Químico.

Aprovado por:

Bruno Bôscaro França, M.Sc.

Prof. Claudinei de Souza Guimarães, M.Sc.

Prof. Ladimir José de Carvalho, D.Sc.

Orientado por:

Prof^a. Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Setembro de 2009

Ferreira, Raphael Coimbra.

Projeto de uma Coluna de Destilação a Vácuo para Obtenção de Óleos Lubrificantes / Raphael Coimbra Ferreira. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2009.

ix, 48 p.; il.

(Projeto Final de Curso) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2009. Orientadora: Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D.Sc.

1. Óleos lubrificantes básicos. 2. Resíduo atmosférico. 3. Destilação a vácuo. 4. Projeto Final de Curso (Graduação – UFRJ/EQ). 5. Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D.Sc. I. Projeto de uma Coluna de Destilação a Vácuo para Obtenção de Óleos Lubrificantes.

Dedico este trabalho a todas as pessoas que me ajudaram a chegar até aqui, seja com incentivos, seja com puxões de orelha, e que estarão sempre comigo nessa jornada.

“Não tenha medo de crescer lentamente. Tenha medo apenas de ficar parado.”

Provérbio chinês

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos os responsáveis por eu ter conseguido chegar até aqui.

Em primeiro lugar, a Deus, que permitiu e me deu forças para eu alcançar este ponto da minha vida.

Ao meu pai e à minha mãe, por todos os sacrifícios que passaram, por me incentivarem a seguir nessa caminhada e até pelos sermões, merecidos, aliás. Às minhas irmãs, que também sempre estiveram do meu lado.

Aos meus amigos, sejam eles de infância ou da faculdade, que nos fazem esquecer momentos de tensão e nos animam, nos divertem, mesmo em vésperas de provas para as quais não estudamos nada, mesmo em encontros casuais, só para termos essas pessoas um pouco mais do nosso lado.

A todos os professores, desde os do maternal até os da faculdade, que foram os grandes responsáveis pela minha formação acadêmica. Em particular à professora Silvia, pela atenção e paciência que teve comigo durante a execução deste trabalho.

Resumo do Projeto Final de Curso apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenheiro Químico.

PROJETO DE UMA COLUNA DE DESTILAÇÃO A VÁCUO PARA OBTENÇÃO DE ÓLEOS LUBRIFICANTES

Raphael Coimbra Ferreira

Setembro, 2009

Orientadora: Prof^a. Silvia Maria Cruzeiro da Silva, D.Sc.

Diante da queda de disponibilidade de óleos leves nos últimos anos e o aumento da produção dos óleos pesados, principalmente no Brasil, há uma busca por tecnologias para a extração de produtos mais leves do resíduo deste petróleo, visto que esses produtos leves possuem alto valor agregado. Uma das tecnologias utilizadas é o processamento deste resíduo através de uma destilação a baixas pressões, onde há a possibilidade da extração desses compostos mais leves, tais como gasóleos e óleos lubrificantes.

O presente trabalho propõe a destilação a vácuo do resíduo atmosférico (RAT) do petróleo Marlin, proveniente da Bacia de Campos, com os objetivos de se obter óleos lubrificantes básicos e de se maximizar a produção de um desses óleos, o neutro leve, que possui alto valor agregado. Foi feita uma análise de quais deveriam ser as condições operacionais ótimas da coluna, visando a maximização da vazão de saída do óleo neutro leve. Verificou-se que a variação dos parâmetros operacionais da coluna e também da carga não aumentou significativamente a produção do óleo neutro leve, sendo escolhida, assim, a coluna com os menores custos fixos, dentre os casos estudados.

Depois disso foi realizado o dimensionamento da coluna a vácuo. Foram propostas colunas com pratos e recheadas, utilizando-se seis tipos de recheio diferentes. A coluna mostrou-se economicamente mais viável (com os menores custos fixos) e mais eficiente utilizando o recheio do tipo Glitsch Grid. Todo este processo foi realizado através do simulador UniSim Design.

ÍNDICE

Capítulo I – INTRODUÇÃO	1
I.1 – Objetivos do trabalho	2
I.2 – Estrutura do trabalho	2
Capítulo II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
II.1 – Óleo lubrificante	4
II.1.1 – Introdução	4
II.1.2 – Lubrificação industrial	5
II.1.3 – Funções de um óleo lubrificante	5
II.2 – Propriedades dos óleos industriais	6
II.3 – Óleos básicos lubrificantes – descrição de suas características	7
II.4 – Classificação dos óleos básicos lubrificantes	9
II.5 – Tipos de bases	10
II.5.1 – Bases minerais	10
II.5.2 – Bases sintéticas	12
II.5.3 – Bases vegetais e animais	12
II.6 – Processamento de óleos lubrificantes básicos	13
II.6.1 – Processo de extração por solvente (convencional)	13
II.6.2 – Hidrotratamento	14
II.6.3 – Hidrorrefino	14
II.6.4 – Produção das bases minerais	15
II.7 – Óleos comercializados no Brasil	17
Capítulo III – METODOLOGIA	21
III.1 – Caracterização da carga	21
III.2 – Simulação da coluna de <i>short cut distillation</i>	24
III.3 – Condições operacionais da carga e dos produtos	26
III.3.1 – Condições operacionais da carga	27
III.3.2 – Vazões dos produtos	27
Capítulo IV – SIMULAÇÕES	37
IV.1 – Simulação da coluna a vácuo	37
IV.2 – Metodologia das otimizações para otimizar a vazão do óleo neutro leve	38
IV.3 – Discussão das otimizações	41
Capítulo V – DIMENSIONAMENTO DA COLUNA DE VÁCUO	44
Capítulo VI – CONCLUSÃO	47
VI.1 – Conclusões	47
VI.2 – Sugestões para trabalhos futuros	47
Capítulo VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura II.1 – Fluxograma da produção de óleos básicos lubrificantes	17
Figura III.1 – Curva de destilação PEV do RAT	23
Figura III.2 – <i>Short cut distillation</i>	24
Figura III.3 – Curva de destilação PEV do spindle branco	30
Figura III.4 – Curva de destilação PEV do neutro leve	30
Figura III.5 – Curva de destilação PEV do neutro médio	31
Figura III.6 – Curva de destilação PEV do bright stock	31
Figura III.7 – Distribuição das faixas do spindle branco	32
Figura III.8 – Distribuição das faixas do neutro leve	33
Figura III.9 – Distribuição das faixas do neutro médio	33
Figura III.10 – Distribuição das faixas do bright stock	34
Figura III.11 – Distribuição das faixas do RAT	35
Figura IV.1 – Coluna a vácuo	37
Figura IV.2 – Resultado da variação da vazão de óleo neutro leve com a variação da fração de vapor da carga	42

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela II.1 - Grupos de óleos básicos lubrificantes	9
Tabela II.2 - Influência da natureza química do óleo em algumas de suas propriedades	11
Tabela II.3 - Características e utilizações dos óleos básicos	12
Tabela II.4 - Óleos básicos lubrificantes comercializados no Brasil	18
Tabela II.5 - Especificação dos óleos básicos lubrificantes parafínicos	19
Tabela II.6 - Especificação dos óleos lubrificantes básicos naftênicos	20
Tabela III.1 - Curva de destilação PEV do resíduo atmosférico do petróleo Marlin	22
Tabela III.2 - Propriedades dos pseudocomponentes gerados	22
Tabela III.3 - Composição molar do RAT	23
Tabela III.4 - Condições operacionais da coluna de <i>short cut distillation</i>	25
Tabela III.5 - Condições operacionais a serem utilizadas na coluna a vácuo	26
Tabela III.6 - Faixas de viscosidade dos óleos lubrificantes	26
Tabela III.7 - Condições operacionais da carga	27
Tabela III.8 - Curva de destilação ASTM 1160 do spindle branco	28
Tabela III.9 - Curva de destilação ASTM 1160 do neutro leve	28
Tabela III.10 - Curva de destilação ASTM 1160 do neutro médio	29
Tabela III.11 - Curva de destilação ASTM 1160 do bright stock	29
Tabela III.12 - Distribuição das faixas dos óleos lubrificantes	35
Tabela III.13 - Distribuição das faixas do RAT	35
Tabela III.14 - Distribuição das faixas normalizadas dos óleos lubrificantes	36
Tabela III.15 - Estimativa da fração dos óleos lubrificantes processados na destilação	36
Tabela III.16 - Estimativa da vazão dos óleos lubrificantes processados na destilação	36
Tabela IV.1 - Condições operacionais da coluna a vácuo	38
Tabela IV.2 - Resultados da simulação	38
Tabela IV.3 - Otimizações a serem realizadas	39
Tabela IV.4 - Resultado da variação da vazão de óleo neutro leve com a variação da fração de vapor da carga	43
Tabela V.1 - Seções da coluna a vácuo	44
Tabela V.2 - Diâmetro (em metros) das seções da coluna a vácuo	45
Tabela V.3 - Altura (em metros) das seções da coluna a vácuo	45
Tabela V.4 - Perda de carga (em kPa) das seções da coluna a vácuo	45
Tabela V.5 - HETP (em metros) das seções da coluna a vácuo	46

Capítulo I - INTRODUÇÃO

O petróleo é uma mistura de hidrocarbonetos parafínicos, naftênicos e aromáticos em proporções variáveis, contendo impurezas, denominadas impurezas oleofílicas, como os compostos de enxofre, de nitrogênio e de oxigênio e metais. Estão ainda associados ao petróleo gás natural, sedimentos (areia) e água salgada. A separação da água e dos sedimentos é iniciada no próprio campo de produção, pois não estão incorporadas ao óleo (impurezas oleofóbicas), e finalizada nas refinarias (dessanilização).

O óleo bruto é praticamente inutilizável e o refino é o conjunto das operações e procedimentos industriais empregados para tratar e transformar, com menor custo, o petróleo bruto em produtos acabados. Desde o início da sua exploração em quantidades comerciais, tem sido a principal fonte de energia explorada no mundo. Automóveis, trens, navios e aviões são movidos pela energia gerada pela combustão de seus derivados. Estradas são pavimentadas usando-se o asfalto, máquinas são lubrificadas com produtos extraídos do petróleo. A indústria petroquímica utiliza como matéria prima derivados do petróleo, dando origem a inúmeros produtos, tais como plásticos, fibras, borrachas e outros. (VALLE, 2007)

Aproximadamente 80% do petróleo brasileiro são oriundos da Bacia de Campos. Um dos tipos de petróleo presentes na Bacia de Campos é chamado de Marlin e tem grau API igual a 19, que, de acordo com a ANP, está na faixa de óleos pesados. Assim, os óleos nacionais apresentam fatores que dificultam o seu processamento e comercialização, como alta viscosidade, acidez naftênica e teor de enxofre.

A queda de disponibilidade de óleos leves nos últimos anos e a crescente produção de petróleos pesados, principalmente no Brasil, têm apresentado às refinarias nacionais o desafio de desenvolver métodos rentáveis para a recuperação de produtos com maior valor agregado oriundos dos resíduos destes petróleos. Isto se torna mais importante à medida que as novas descobertas de reservas de óleos com as características mencionadas acima vai de encontro ao perfil industrial do parque de refino nacional, que foi preparado para processar óleos crus mais leves pois estes apresentam uma melhor recuperação.

Neste contexto, investimentos vêm sendo feitos em pesquisas tecnológicas de processos de refino para estes óleos pesados, gerando frações mais leves, que apresentam uma maior demanda e conseqüentemente, um maior valor agregado.

O resíduo atmosférico (RAT) é a fração do petróleo procedente da unidade de destilação atmosférica com temperatura de destilação superior à 427°C. Assim, o RAT é um corte de baixo valor comercial, entretanto, ele apresenta frações leves de valor agregado maior, como gasóleos, e a separação destas frações pode ser lucrativa. (RODRIGUES, 2009)

I.1 - Objetivos do trabalho

Os objetivos do presente trabalho são projetar uma coluna de destilação, cuja carga é o resíduo atmosférico de petróleo Marlin, e otimizá-la, para maximizar a produção de óleo neutro leve, que é o óleo lubrificante básico com maior valor agregado, dentre os que se pode produzir desta maneira (spindle, neutro leve, neutro médio, neutro pesado e bright stock). Serão variadas algumas propriedades da coluna, tais como pressão de operação, razão de refluxo, e fração vaporizada da carga. Também serão variados os internos da coluna, para verificar se é melhor uma coluna de pratos ou uma coluna recheada. Para isso, será utilizado o programa UniSim Design, para realizar a simulação das colunas.

I.2 - Estrutura do trabalho

No capítulo II é feita uma revisão bibliográfica sobre os óleos lubrificantes básicos, com informações sobre suas características, propriedades e processamento.

No capítulo III há um estudo sobre a caracterização da carga e uma estimativa das condições operacionais da coluna a vácuo a ser simulada, bem como da vazão dos produtos.

No capítulo IV é feita a simulação da coluna a vácuo, utilizando os dados obtidos no capítulo III, através do simulador UniSim Design.

No capítulo V é realizada a otimização da coluna a vácuo, variando algumas de suas condições operacionais, a saber: número de pratos, pressão de operação, razão de refluxo e fração vaporizada da carga.

No capítulo VI é feito o dimensionamento da coluna obtida no capítulo V. É determinado qual o melhor tipo de interno da coluna, assim como são calculados alguns de seus parâmetros.

No capítulo VII são apresentadas as conclusões que podem ser tiradas deste trabalho, e são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo II – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II.1 - Óleo lubrificante

II.1.1 - Introdução

A tecnologia de óleos básicos passou por muitas fases na sua evolução. Na primeira fase, gordura animal era utilizada como lubrificante. Inscrições da Antiguidade (1400 a.C.) mostram o uso de gordura de boi e de carneiro sendo aplicados nos eixos de carruagens. Muito pouco mudou nos 300 anos que se seguiram, apenas o fato de que, às vezes, a gordura vinha de animais mais exóticos, como de baleias.

Por volta da metade do século XIX, surgiram os primeiros óleos a base de petróleo. No entanto, não foram muito bem aceitos como lubrificantes, porque não funcionavam tão bem quanto à gordura animal.

No início do século passado, fabricantes de óleos lubrificantes iniciaram o processamento dos seus óleos básicos, de modo a melhorar o seu desempenho como lubrificantes.

À medida que a demanda por automóveis crescia, também aumentava a demanda por melhores lubrificantes, em 1923, a Society of Automotive Engineers classificou os óleos de motor pela sua viscosidade: leve, médio e pesado.

Nessa época o “processamento” dos óleos básicos constava de três processos principais:

- Tratamento com argila: Era usado para remover alguns dos piores componentes, usualmente aromáticos e compostos altamente polares, contendo enxofre e nitrogênio. Os componentes SO_x e NO_x devem ser removidos porque causam chuva ácida, e os compostos aromáticos, por serem carcinogênicos.

- Tratamento com ácido: Ácido sulfúrico concentrado era utilizado para reagir com os piores compostos dos óleos básicos e convertê-los em uma lama que poderia ser removida. Era um processo caro, mas eficiente, contudo praticamente desapareceu dos Estados

Unidos devido à preocupação ambiental, tanto relacionada ao uso do ácido, como à disposição final da lama.

- Tratamento com SO₂: Tratava-se de um processo primitivo de extração visando à remoção de alguns componentes dos óleos lubrificantes, usando um solvente reciclável. O solvente era geralmente muito tóxico e acabou sendo abandonado. No entanto, foi o primeiro passo para o atual processo de extração com solvente. (ORLANDO Jr., 2005)

II.1.2 - Lubrificação industrial

A lubrificação industrial compreende todos os aspectos de engenharia envolvidos no controle do atrito e desgaste. Sempre que duas superfícies se movem uma em relação à outra, havendo contato entre elas, desenvolve-se uma resistência ou força que tende a se opor ao movimento, denominado atrito. A função do lubrificar é atendida pelo óleo lubrificante, graças à sua propriedade de oleosidade, que permite a formação de um filme deslizante protetor das partes móveis. Esse filme deve enfrentar choques, cargas mecânicas e elevação de temperatura sem que se rompa. Devido às diferentes características e condições de funcionamento de máquinas e equipamentos, são necessários óleos lubrificantes de diferentes viscosidades.

Os óleos lubrificantes são usados em equipamentos nos setores automotivo, industrial, marítimo e ferroviário, nos variados componentes mecânicos, tais como rolamentos, engrenagens e mancais, que necessitam de lubrificação para que possam operar eficientemente. (VALLE, 2007)

II.1.3 - Funções de um óleo lubrificante

As funções mais comuns de um óleo lubrificante são: redução de atrito entre as superfícies, redução do desgaste, dissipação de calor, vedação, proteção contra ferrugem e corrosão, transmissão de força, remoção de contaminantes de isolamentos elétricos, amortecimento de choques, etc. Atuando como agente de remoção de calor gerado pela fricção ou por outras fontes, tais como combustão ou contato com outras substâncias que

estão em temperaturas elevadas, o lubrificante deve permanecer inalterado. Alterações na estabilidade térmica ou oxidativa reduzem a eficiência do lubrificante. A capacidade do lubrificante em permanecer efetivo na presença de contaminantes externos é muito importante. Em geral, estes contaminantes são a água, ácidos provenientes de combustão e material particulado.

São qualidades imperativas para um lubrificante:

- Apresentar uma excelente estabilidade térmica e boa resistência à oxidação;
- Pelo menos em parte, servir de veículo de transferência de calor e refrigerar as zonas quentes do motor;
- Neutralizar os ácidos formados durante a combustão de carburetos;
- Proteger as peças mecânicas contra a corrosão;
- Limitar a formação de depósitos ou vernizes nas zonas quentes do motor. Estes depósitos podem ser decorrentes do combustível não queimado e da própria degradação do óleo;
- Manter em suspensão dispersa as borras e depósitos nas zonas frias do motor;
- Proteger contra desgastes todos os elementos da distribuição submetidos a contato sob pressão elevada. (VALLE, 2007)

II.2 - Propriedades dos óleos industriais

Devido ao grande número de tipos de lubrificantes industriais, o número de restrições, e conseqüentemente o número de propriedades desejadas, é muito grande. Algumas dessas propriedades essenciais são:

a) Viscosidade: Essa é a característica essencial para todo lubrificante. A viscosidade cinemática é normalmente medida pelo tempo necessário ao óleo para fluir por um tubo capilar calibrado. A viscosidade varia com a pressão, mas a influência da temperatura é muito maior; ela decresce rapidamente com o aumento da temperatura, e há uma enorme bibliografia descrevendo equações e gráficos relacionando esses dois parâmetros. Pode-se citar em particular a norma ASTM D 341.

b) Índice de viscosidade: O índice de viscosidade é um número que resulta de um cálculo envolvendo as viscosidades a 40 e a 100 °C. Ele caracteriza a capacidade do lubrificante de manter uma viscosidade constante através de uma larga de temperatura. Essa propriedade pode ser melhorada através do uso de aditivos.

c) Ponto de fluidez: O ponto de fluidez é a menor temperatura em que um óleo ainda pode fluir enquanto é resfriado, sem agitação, sob condições padronizadas. O ponto de fluidez de bases parafínicas está ligada a cristalização das n-parafinas. O ponto de fluidez das bases naftênicas está relacionado com o aumento expressivo da viscosidade em baixas temperaturas. Essa propriedade pode ser melhorada através do uso de aditivos.

d) Ponto de anilina: É a temperatura mais baixa na qual o óleo é completamente miscível com o mesmo volume de anilina. Esse valor caracteriza o teor de aromáticos nos óleos; o ponto de anilina é maior para menores teores de aromáticos.

e) Resíduo de carbono: esta medida caracteriza a tendência de um óleo para formar depósitos de carbono não volátil, quando sofre evaporação seguida de pirólise. Esse resíduo, quando determinado de acordo com os métodos e aparelhos especiais padronizados (Conradson e Ramsbottom), denomina-se resíduo de carbono. (WAUQUIER, 1995)

II.3 - Óleos básicos lubrificantes – descrição de suas características

Os óleos básicos lubrificantes podem ser divididos em três tipos principais: os naftênicos, os parafínicos e os aromáticos. Estes últimos, devido ao seu grande poder de solvência, não são usados para lubrificação.

Os óleos lubrificantes podem ser gasosos, líquidos (o mais comum), pastosos ou semi-sólidos e sólidos. Os lubrificantes líquidos são classificados como minerais, graxos, óleos compostos (graxos e minerais) e sintéticos. Entre estes fluidos, os minerais ocupam a primeira posição quanto ao uso.

Os óleos de base mineral mais comumente encontrados são os parafínicos e os naftênicos, a saber:

Parafínicos: utilizados na fabricação de lubrificantes industriais, automotivos, ferroviários e marítimos, como aditivos para lubrificantes e combustíveis. Possuem como características:

- Alto ponto de fluidez;
- Alto índice de viscosidade;
- Maior resistência à oxidação;
- Menor resíduo de carbono;
- Menor oleosidade ou poder de lubrificação.

São vários os tipos de óleos lubrificantes parafínicos, dentre eles, podemos destacar:

- Bright stock
- Neutro leve
- Neutro médio
- Neutro pesado
- Cylinder oil
- Spindle
- Óleo extensor spindle

Naftênicos: são óleos hidrotratados, com baixos teores de aromáticos e ponto de fluidez, adequados à produção de óleos lubrificantes industriais para diversas aplicações. Além disso, possuem como características:

- Baixo índice de viscosidade;
- Menor resistência à oxidação;
- Maior resíduo de carbono;
- Maior oleosidade ou poder de lubrificação;
- Maior emulsibilidade. (ORLANDO Jr., 2005)

II.4 - Classificação dos óleos básicos lubrificantes

Segundo a classificação API (American Petroleum Institut), as bases se dividem em cinco grupos, sendo três deles reservados às bases parafínicas, uma para as bases sintéticas e outra para as demais bases minerais e sintéticas.

Tabela II.1 - Grupos de óleos básicos lubrificantes

Grupo I	Grupo II	Grupo III	Grupo IV	Grupo V
Bases minerais parafínicas			Polialfaolefinas (PAO)	Demais bases minerais e sintéticas
Saturados < 90% S > 0,03% 80 < IV < 120	Saturados = 90% S < 0,03% 80 < IV < 120	Saturados > 90% S < 0,03% IV > 120		

S – teor de enxofre

IV – índice de viscosidade

A indústria de lubrificantes amplia esta classificação, acrescentando os seguintes grupos, que diferem do original apenas pela faixa de índice de viscosidade:

Grupo I⁺: 103 < IV < 108

Grupo II⁺: 113 < IV < 119

Grupo III⁺: IV ≥ 140

Além dos grupos mencionados, existe o Grupo VI de óleos de base que englobam as poliolefinas internas (PIOs), que são quimicamente muito semelhantes às PAOs, porque ambas são produzidas pela oligomerização de olefinas lineares. Entretanto, elas possuem ramificações da cadeia mais curtas, o que as torna inferiores às PAOs, em relação ao índice de viscosidade, à volatilidade e propriedades a baixas temperaturas. (VALLE, 2007)

II.5 - Tipos de bases

II.5.1 - Bases minerais

Um óleo básico mineral ou base mineral pode ter origem no carvão, no xisto ou no petróleo. Com o desenvolvimento da indústria do petróleo, a partir de 1870, as bases oriundas desse mineral conquistaram espaço. A maior estabilidade e o melhor desempenho fizeram com que as bases minerais substituíssem as bases vegetais e a abundância do petróleo fez com que esse mineral se tornasse a principal fonte de bases minerais, superando o carvão e o xisto.

Os básicos minerais, constituídos de hidrocarbonetos, apresentam de 20 a 70 átomos de carbono e pesos moleculares em torno de 1000, podendo formar milhares de arranjos moleculares, que são distribuídos em três grupos: parafínicos, naftênicos e aromáticos. A tabela seguinte mostra o efeito da natureza química do óleo em algumas de suas propriedades.

Tabela II.2 - Influência da natureza química do óleo em algumas de suas propriedades

Hidrocarboneto	Índice de viscosidade	Ponto de fluidez	Resistência à oxidação do óleo	Grau de utilização do óleo
Parafinas lineares	Muito alto	Alto	Boa	Baixo
Isoparafinas com uma cadeia longa linear	Alto	Médio	Boa	Médio
Isoparafinas com cadeia lateral ramificada	Alto	Baixo	Boa	Alto
Monoaromáticos ou mononaftênicos altamente alquilados (cadeias longas)	Alto	Baixo	Boa	Alto
Policondensados (aromáticos ou naftênicos)	Baixo	Baixo	Baixa	Baixo

A natureza química é determinada na maior parte das aplicações; somente em condições pouco severas de operação pode-se usar indistintamente um ou outro tipo de óleo básico na formulação do óleo lubrificante acabado. A tabela seguinte apresenta algumas das características e utilizações dos três principais tipos de óleos básicos citados.

Tabela II.3 - Características e utilizações dos óleos básicos

Propriedade	Parafínicos	Naftênicos	Aromáticos
Índice de viscosidade	Alto	Baixo	Muito baixo
Ponto de fluidez	Alto	Baixo	Baixo
Volatilidade	Baixa	Alta	Muito alta
Poder de solvência	Baixo	Alto	Muito alto
Resíduo de carbono	Médio (granular)	Baixo (pó)	Alto
Exemplos de aplicação	Óleos de motor, turbina e hidráulico	Compressores de refrigeração, fluidos de corte e graxa	Fluido de processo

(VALLE, 2007)

II.5.2 - Bases sintéticas

Em geral, as bases sintéticas são obtidas a partir do petróleo, por processos petroquímicos, o que permite o controle da estrutura molecular dos compostos das bases e a total isenção de moléculas sulfuradas e nitrogenadas. Desta forma, as bases sintéticas são misturas mais homogêneas, no que diz respeito à estrutura dos seus componentes, e mais resistentes à oxidação quando comparadas às bases minerais, o que explica a superioridade das suas propriedades. Com as bases sintéticas, é possível obter um produto com baixo ponto de fluidez, aliado à baixa volatilidade, o que não é possível com uma base mineral. Entretanto, o maior obstáculo ao crescimento das bases sintéticas é o seu elevado preço, por isso algumas bases são usadas como aditivos em lubrificantes minerais. (VALLE, 2007)

II.5.3 - Bases vegetais e animais

As bases vegetais e animais constituem os óleos graxos, que são fortemente instáveis em temperaturas elevadas, formando compostos altamente prejudiciais às peças de equipamentos e máquinas. Oxidam-se facilmente em função da presença de duplas ligações nas suas moléculas. São pouco usadas, mais ainda encontram aplicações, como aditivos de

bases minerais e sintéticas. O óleo de algodão soprado é usado como aditivo de demulsibilidade, e na composição de lubrificantes biodegradáveis para máquinas agrícolas e equipamentos da indústria alimentícia.

A maior parte da produção de óleos graxos é destinada à fabricação de ácidos graxos, e atualmente, na produção de biodiesel.

Em geral, os óleos vegetais são obtidos a partir da extração por prensagem ou solvente de frutos, grãos e sementes triturados. Depois, seguem para etapa de refino, quando, em geral, passam pelos processos de dessaponificação e sopro a vapor. Os óleos animais são obtidos a partir de tecidos e órgãos de animais e, posteriormente, são refinados. (VALLE, 2007)

II.6 - Processamento de óleos lubrificantes básicos

II.6.1 - Processo de extração por solvente (convencional)

Por volta de 1930, o processamento de óleos lubrificantes por extração com solvente tornou-se uma tecnologia viável e tinha como objetivo melhorar a qualidade e o desempenho dos óleos básicos. Os solventes utilizados eram seguros e podiam ser reciclados (furfural e fenol). Nos Estados Unidos, 2/3 dos óleos básicos são processados dessa maneira. No Brasil, em termos de Petrobras, duas refinarias produzem óleos básicos lubrificantes: a REDUC (Refinaria de Duque de Caxias) e a RLAM (Refinaria Landulpho Alves), e o processo adotado em ambas é através da extração por solvente. (ORLANDO Jr., 2005)

A RLAM, situada na Bahia, utiliza o petróleo parafínico nacional (petróleo baiano), e produz os lubrificantes básicos neutro leve, neutro médio e bright stock. Já a REDUC utiliza petróleo parafínico importado, e produz, além dos óleos produzidos pela RLAM, os óleos spindle, spindle branco, isolante parafínico, neutro pesado, turbina leve, turbina pesado, cilindro I e cilindro II. (ORLANDO Jr., 2007)

Os óleos básicos processados pela rota solvente são comumente denominados de óleos básicos do Grupo I e são caracterizados como aqueles que contêm menos do que 90%

de saturados (mais do que 10 % de aromáticos) e mais do que 300 ppm de enxofre. (ORLANDO Jr., 2005)

II.6.2 - Hidrotratamento

O hidrotratamento foi desenvolvido em 1950 e utilizado, pela primeira vez, na indústria de lubrificantes na década de 60, como um processo de hidroacabamento, após a rota de extração por solvente.

Nesse processo se reage H_2 com o óleo básico, a temperaturas extremamente elevadas, na presença de um catalisador (Co-Mo, Ni-Mo), a fim de estabilizar os componentes mais reativos desse óleo, melhorando a cor e aumentando a sua vida útil. Esse processo remove algumas das moléculas que contêm nitrogênio e enxofre, mas não é severo o suficiente para remover uma quantidade significativa de compostos aromáticos. O hidrotratamento foi uma pequena melhoria da tecnologia de óleos básicos que, mais tarde, tornou-se importante. (QUINTANILHA, 2003)

II.6.3 - Hidrorrefino

Trata-se de uma forma mais severa de hidrotratamento. É feita pela reação de H_2 à carga de óleo básico, a temperaturas e pressões extremamente elevadas. As moléculas da carga são modificadas e craqueadas em moléculas menores. A grande maioria dos compostos de enxofre, nitrogênio e aromáticos são removidos. A remodelagem das moléculas restantes ocorre através da abertura de anéis naftênicos e da redistribuição de isômeros parafínicos, facilitadas pela presença de catalisador.

O processo de hidrorrefino consiste em duas etapas, a primeira de hidrotratamento para remoção de N_2 , e a segunda de hidrocraqueamento, para remoção final de N_2 , para ajuste final da qualidade dos resíduos e a geração de produtos leves. Após o processo de hidrocraqueamento catalítico, o efluente passa por uma destilação atmosférica, onde são retirados a nafta e o diesel. Os resíduos gerados, geralmente $370\text{ }^\circ\text{C}^+$ (acima do $370\text{ }^\circ\text{C}$), são separados em seus respectivos cortes de lubrificantes em uma torre de vácuo. Cada um

desses cortes é então submetido ao processo de hidroisodesparafinação e hidroacabamento, para ajuste final da qualidade dos óleos lubrificantes.

Após a Segunda Guerra Mundial, os predecessores da tecnologia moderna de catalisadores para hidrocrackeamento foram importados da Alemanha. A Chevron comercializou essa tecnologia para produção de combustíveis, no final dos anos 50. Em 1969, a Shell comercializou a primeira unidade de produção de óleos básicos pela rota de hidrocrackeamento. Nos anos 70, a Shell visava a tecnologia de hidroisomerização, associada à desparafinação por solvente, a fim de produzir óleos básicos com altos índices de viscosidade na Europa. Duas décadas mais tarde, a Exxon e outras companhias construíram plantas semelhantes. (QUINTANILHA, 2003)

A principal vantagem da rota de hidrorrefino é a sua maior flexibilização em termos de matéria-prima, podendo processar inclusive cargas pesadas. (QUINTANILHA, 2003) A Petrobras visa substituir a atual rota de produção de óleos lubrificantes (rota de extração por solvente, mais adequada para o processamento de petróleo do tipo leve, como o baiano e o árabe leve) para a rota de hidrorrefino, já que os petróleos que vem sendo encontrados estão cada vez mais pesados, e para que os petróleos brasileiros possam ser utilizados, com o intuito de diminuir os gastos relativos à importação do petróleo do tipo árabe, já que se importa cerca de 80% do que é usado na produção de óleos básicos lubrificantes, resultando em gastos de cerca de US\$ 900 milhões/ano. Desta forma, com a implantação da nova tecnologia, o aumento da produção passará para cerca de 826 milhões de litros/ano (contra os 650 milhões de litros/ano atuais), além da melhoria da qualidade do produto e diminuição dos gastos relativos à importação do petróleo, já que será utilizado o petróleo nacional. (ORLANDO Jr., 2005)

II.6.4 - Produção das bases minerais

O esquema convencional para a produção do óleo lubrificante envolve as seguintes etapas: seleção do destilado que tenha viscosidade apropriada, eliminação dos aromáticos por extração com solventes, com o objetivo de melhorar o seu índice de viscosidade, extração das parafinas com alto ponto de congelamento, e, finalmente, um trabalho brando de purificação com hidrogênio.

Os óleos lubrificantes estão presentes no resíduo que destila acima de 370 °C, isto é, na fração que é retirada na base da torre de destilação fracionada a pressão atmosférica. O resíduo dessa torre é, em seguida, destilado em outra torre, que opera a vácuo, obtendo-se uma série de frações que darão origem aos óleos lubrificantes de várias viscosidades, sendo que o número de frações depende do tipo de petróleo e das necessidades do refinador.

No caso dos petróleos de base parafínica, retira-se na torre de destilação a vácuo um óleo tipo “spindle” e os chamados destilados médio, leve e pesado. O resíduo é chamado “base para cilindro refinado a vapor” (steam refined stock ou cylinder stock). Os óleos destilados são designados como “neutros” (neutral). As bases para cilindro sofrem processamento posterior, dando origem aos óleos brilhantes (bright stock). Os óleos neutros e os “bright stock” são misturados em proporções adequadas, para dar as várias viscosidades desejadas.

Os óleos lubrificantes básicos sofrem uma série de tratamentos posteriores para remover constituintes indesejáveis ou instáveis:

- Extração por solvente, ou seja, desaromatização com solvente (furfural ou fenol), para redução do teor de compostos aromáticos, principalmente dos polinucleares. O processo de extração melhora a estabilidade térmica e oxidativa da base original, além de aumentar o índice de viscosidade;
- Desparafinação com solvente, constituídos de uma mistura de metiletilcetona (ou metilisobutilcetona) e tolueno, para eliminação das parafinas lineares de alto peso molecular, o que melhora o ponto de fluidez (menor temperatura na qual a substância ainda flui) do óleo. No processo, a mistura solvente e óleo básico é resfriada a uma temperatura entre -12 °C e -6 °C abaixo do ponto de fluidez desejado e os cristais formados são separados por cristalização;
- Hidrorrefino para a saturação de compostos instáveis e eliminação de compostos de enxofre, de nitrogênio e de oxigênio, sob a forma de H₂S, NH₃ e H₂O, que conferem ao óleo corrosividade, instabilidade de cor e à oxidação. O hidrorrefino consiste em passar o óleo aquecido e o hidrogênio em um leito aquecido;
- Tratamento com solvente, o propano, do resíduo da torre de vácuo para a desasfaltação do óleo, eliminando os produtos asfálticos de baixo índice de viscosidade;

- Outros processos de purificação podem ser usados, tais como uma filtração ou percolação em argila ativada para remover compostos resinosos, carbonáceos ou asfálticos que escurecem o óleo, melhorando sua cor, aparência e estabilidade. O tratamento com argila é um processo alternativo ao hidrorrefino. (VALLE, 2007)

A figura seguinte mostra todo este processo citado.

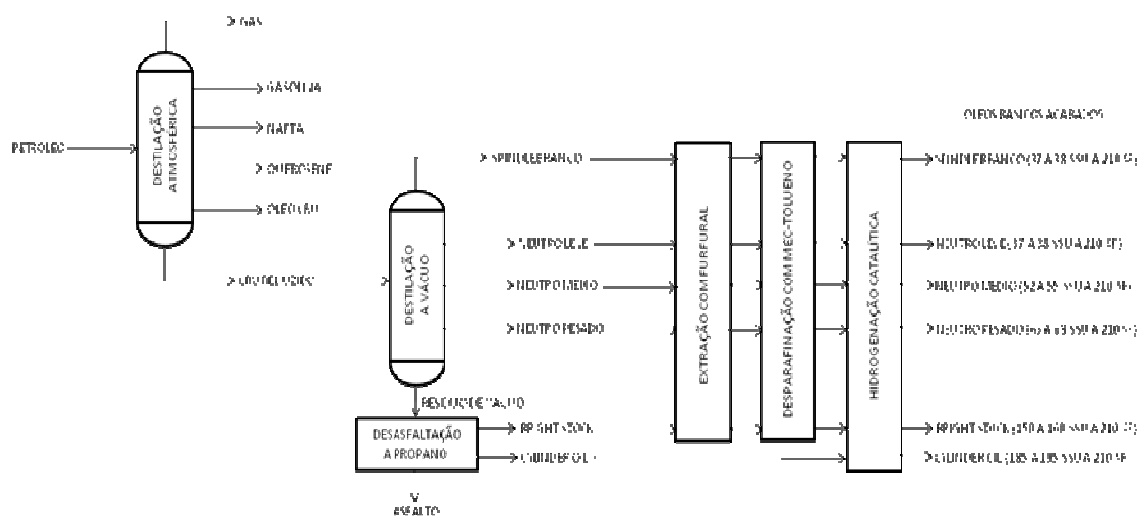


Figura II.1 – Fluxograma da produção de óleos básicos lubrificantes

II.7 - Óleos comercializados no Brasil

Os óleos lubrificantes básicos comercializados no Brasil estão relacionados na tabela a seguir, e deverão estar em acordo com as especificações estabelecidas pela ANP.

Tabela II.4 - Óleos básicos lubrificantes comercializados no Brasil

Óleo	Abreviação
Parafínico spindle 09	PSP 09
Parafínico neutro leve 30	PNL 30
Parafínico neutro médio 55	PNM 55
Parafínico neutro pesado 80	PNP 80
Parafínico neutro pesado 95	PNP 95
Parafínico bright stock 30	PBS 30
Parafínico bright stock 33	PBS 33
Parafínico turbina leve 25	PTL 25
Parafínico turbina pesado 85	PTP 85
Parafínico cilindro 45	PCL 45
Parafínico cilindro 60	PCL 60
Naftênico hidrogenado 10	NH 10
Naftênico hidrogenado 20	NH 20
Naftênico hidrogenado 140	NH 140

As abreviações foram estabelecidas utilizando o seguinte critério:

- a) código alfanumérico de duas ou três letras e dois ou três números;
- b) a primeira letra P ou N indica se o óleo é parafínico ou naftênico, respectivamente;
- c) a(s) letra(s) seguinte(s) resumem os nomes dos óleos;
- d) os números expressam a viscosidade cinemática típica a 40 °C de cada um dos óleos;
- e) nos óleos com viscosidade cinemática a 40 °C maior do que 215 cSt, ou seja, óleos PBS 30, PBS 33, PCL 45 e PCL 60, foram utilizados os valores típicos das viscosidades cinemáticas a 100 °C.

A seguir são listadas as especificações dos óleos lubrificantes básicos parafínicos e naftênicos.

Tabela II.5 - Especificação dos óleos básicos lubrificantes parafínicos

Características	PSP 09	PTL 25	PNL 30	PNM 55	PNP 80	PTP 85	PNM 95	PBS 30	PBS 33	PCL 45	PCL 60
Aparência	Límpido									-	-
Cor ASTM, máx.	1,0	1,5	1,5	2,5	2,5	2,5	3,5	8,0	6,5	-	-
Viscosidade, cSt, a 40 °C	8 - 11	23 - 27	27 - 33	50 - 62	75 - 83	80 - 87	94 - 102	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar
Viscosidade, cSt, a 100 °C	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	Anotar	28,5 - 32,7	30,6 - 34,8	41,0 - 45,3	57,5 - 65,8
Índice de viscosidade, mín.	90	100	100	95	95	100	95	95	95	75	75
Ponto de fulgor, °C, mín.	160	200	200	220	226	240	230	280	280	290	280
Ponto de fulgor, °C, máx.	-9	-6	-6	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-6	9
Índice de acidez total, mg KOH/g, máx.	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,1	0,05
Cinzas, % massa, máx.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,05	0,05
Resíduo de carbono Ramsbottom, % massa, máx.	0,10	0,10	0,10	0,5	0,20	0,5	0,20	0,90	0,70	3,0	4,0
Corrosividade ao cobre, 3h a 100 °C, máx.	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Estabilidade para oxidação por IAT 2,0mg KOH/g,h, mín.*	-	2500	-	-	-	2000	-	-	-	-	-

Emulsão a 54,4 °C, ml(min), máx.	-	40 - 40 - 0(15)	-	-	-	40 - 40 - 0(20)	-	-	-	-	-
Perda por evaporação, teste NOACK, máx	-	-	16	-	-	-	-	-	-	-	-

* O produto devera atender ao limite estabelecido com pelo menos uma composição de aditivos disponível no mercado. (VALLE, 2007)

Tabela II.6 - Especificação dos óleos lubrificantes básicos naftênicos

Características	NH 10	NH 20	NH 140
Aparência	Límpido	Límpido	Límpido
Cor ASTM, máx.	1,0	1,0	2,5
Viscosidade, cSt, a 40 °C	9 - 11	17 - 23	130 - 150
Viscosidade, cSt, a 100 °C	Anotar	Anotar	Anotar
Índice de viscosidade, mín.	Anotar	Anotar	Anotar
Corrosividade ao cobre, 3h a 100 °C, máx.	1	1	1
Ponto de fulgor, °C, mín.	144	158	210
Ponto de fulgor, °C, máx.	-39	-33	-18
Resíduo de carbono Ramsbottom, % massa, máx.	0,10	0,10	0,15
Índice de acidez total, mg KOH/g, máx.	0,05	0,05	0,05
Cinzas, % massa, máx	0,005	0,005	0,005

(VALLE, 2007)

Nas tabelas anteriores, foram indicados os valores mínimos (mín) e máximos (máx) das propriedades dos óleos.

Capítulo III - METODOLOGIA

Para a utilização do software UniSim Design para a simulação da coluna de destilação a vácuo, deve-se entrar com dados da carga a ser destilada. Também será necessário definir as variáveis que serão otimizadas para melhorar a produção do óleo neutro leve. Antes disso, porém, é necessária a escolha de um modelo termodinâmico adequado às condições operacionais da simulação. No presente trabalho, foi escolhido o modelo de Peng-Robinson, que representa bem o processo, já que ele é adequado para sistemas operando a baixas pressões.

III.1 – Caracterização da carga

Conforme dito anteriormente, a carga da coluna será resíduo atmosférico do petróleo Marlin. O petróleo contém um grande número de componentes, então seria impossível identificar todos eles. Sendo assim, para simplificar, podem-se definir os pseudocomponentes, que representam um grupo de componentes do óleo cru com propriedades similares. A geração desses pseudocomponentes é dada pelo simulador UniSim Design, através da função *Oil Manager*, após ter-se definido a curva de destilação do ponto de ebulição verdadeiro (curva de destilação PEV) do resíduo no simulador.

A curva de destilação PEV é obtida através de uma destilação em batelada, que utiliza uma coluna com 15 a 18 estágios teóricos. O volume de amostra pode variar de 0,5 a 30 litros. Esse procedimento gera uma curva de destilação que fornece a temperatura como função da fração mássica ou do volume recuperado. Pode ser conduzida tanto à pressão atmosférica quanto a pressões muito baixas. (JUNGMANN et al, 2009)

A tabela a seguir mostra a sua curva de destilação PEV, obtida a pressão atmosférica:

Tabela III.1 – Curva de destilação PEV do resíduo atmosférico do petróleo Marlin

% mássica	Temperatura (°C)
Início	390
5	444
10	466
20	494
30	517
40	537
50	557
60	576
70	595
80	619
90	649
95	674
Fim	727

Após inserir esses dados no simulador, ele forneceu os pseudocomponentes que caracterizam o óleo, bem como algumas de suas propriedades, listadas na tabela a seguir.

Tabela III.2 – Propriedades dos pseudocomponentes gerados

Pseudocomponente	PE (°C)	Peso molecular	Densidade (kg/m³)	Viscosidade a 40 °C (cP)	Viscosidade a 100 °C (cP)
NBP_396	396,3	352,1	884,2	2,7509	1,4494
NBP_409	408,7	363,5	887,7	3,2589	1,6011
NBP_421	421,1	383,9	893,4	4,3494	1,8928
NBP_443	443,2	419,3	903,2	7,5735	2,5912
NBP_470	469,6	457,7	913,4	14,862	3,7567
NBP_497	496,6	495,8	922,3	30,524	5,5362
NBP_525	524,5	538,9	930,0	69,247	8,5635
NBP_552	552,1	581,4	938,3	173,97	13,756
NBP_579	579,4	623,5	948,7	519,62	23,887
NBP_606	606,5	667,2	958,4	953,30	42,824
NBP_633	632,9	713,6	967,8	1843,4	81,129
NBP_674	674,5	781,2	981,6	5671,8	238,70

A seguir, o simulador calculou a composição molar do RAT, mostrada na tabela III.3.

Tabela III.3 – Composição molar do RAT

Pseudocomponente	Fração molar
NBP_396	0,013818
NBP_409	0,015246
NBP_421	0,016964
NBP_443	0,053873
NBP_470	0,103628
NBP_497	0,134030
NBP_525	0,144074
NBP_552	0,138188
NBP_579	0,134517
NBP_606	0,100048
NBP_633	0,071660
NBP_674	0,073952

Além disso, o simulador também forneceu um gráfico, onde é possível comparar as curvas de destilação PEV com os dados fornecidos ao simulador e com os dados calculados por ele. Pode-se verificar na figura a seguir que as curvas são coincidentes, o que indica que o cálculo realizado pelo simulador foi satisfatório.

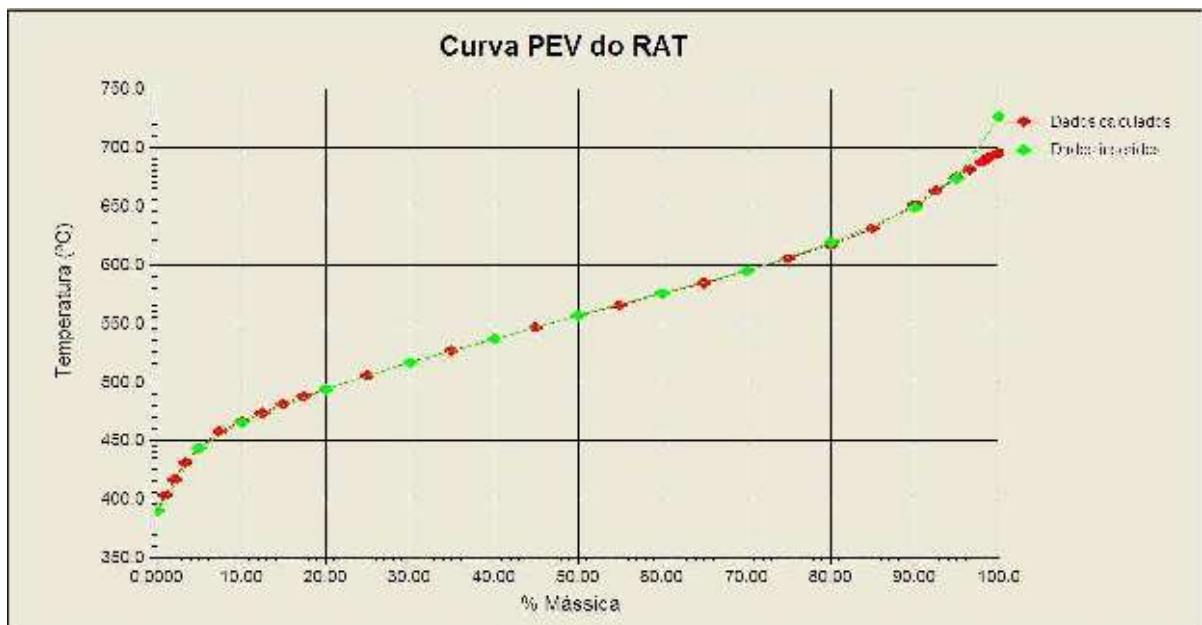


Figura III.1 – Curva de destilação PEV do RAT

III.2 – Simulação da coluna de *short cut distillation*

Antes de simular a coluna de destilação a vácuo, fez-se a simulação do processamento do RAT usando-se uma a coluna de *short cut distillation*. Este tipo de coluna calcula o número mínimo de pratos, bem como a razão de refluxo mínima da coluna, indicando as taxas de líquido e vapor nas seções da mesma, as cargas térmicas do condensador e do refeedor, o numero de estágios ideais e a localização do prato ótimo de alimentação. Este processo possibilita uma estimativa para a coluna de destilação a vácuo, já que poderão ser utilizadas algumas condições operacionais calculadas para essa coluna, tais como número de pratos, razão de refluxo e prato de alimentação, assim como também poderão ser utilizadas condições operacionais calculadas para a carga, como sua pressão e temperatura. Resumindo, esse tipo de coluna fornece uma base para que se possa simular a coluna a vácuo.

A figura a seguir mostra a *short cut distillation* esquematizada no simulador:

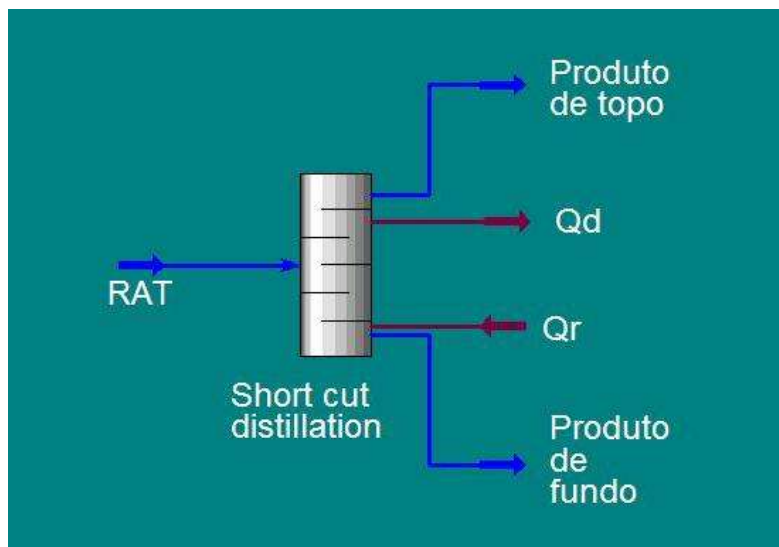


Figura III.2 – *Short cut distillation*

As seguintes condições operacionais foram utilizadas:

- Pressão do condensador: 10 mmHg (ou 0,193 psia). Orlando Jr, em 2005 e 2007, e Quintanilha, em 2003, utilizaram essa como sendo a pressão de operação da coluna. Portanto, também será utilizada no presente trabalho.
- Pressão do refeedor: 10,193 psia. De acordo com o método aproximado para uma destilação multicomposta (método de Fenske-Underwood-Gilliland), a pressão do fundo da coluna deve ser igual à pressão do condensador mais 10 psia. Esse valor também foi utilizado no presente trabalho.
- Pressão da carga: 7,693 psia. Também de acordo com o método aproximado para uma destilação multicomposta (método de Fenske-Underwood-Gilliland), a pressão do prato de carga deve ser igual à pressão do condensador mais 7,5 psia. Esse valor também foi utilizado no presente trabalho.
- Razão de refluxo: 2. Esse valor foi determinado arbitrariamente.
- Vazão de entrada da carga: 10000 kg/h. Esse valor foi determinado arbitrariamente, até que se tenha um valor da densidade da carga na temperatura de operação. Como já foi dito anteriormente, na seção II.6.3, a Petrobras tem uma capacidade de 650 milhões de litros/ano. Assim, determinado o valor da densidade, será possível determinar uma vazão mássica mais de acordo com a realidade.
- Fração vaporizada da carga: 0. Será considerado que a carga entrará líquida na coluna.
- Fração vaporizada dos produtos de topo e de fundo: 0. Será considerado que tanto o produto de topo quanto o produto de fundo serão líquidos.

Após inserir essas variáveis no simulador, ele calculou todas as outras condições operacionais da coluna. Os resultados são mostrados na tabela a seguir:

Tabela III.4 – Condições operacionais da coluna de *short cut distillation*

Condição operacional	Valor
Temperatura da carga (°C)	474,9
Número mínimo de estágios	5,248
Número real de estágios	7,865
Estágio ótimo de alimentação	4,263

Sendo assim, para simular a coluna a vácuo, serão utilizados os seguintes valores:

Tabela III.5 – Condições operacionais a serem utilizadas na coluna a vácuo

Condição operacional	Valor
Temperatura da carga (°C)	474,9
Número real de estágios	8
Estágio ótimo de alimentação	4

III.3 – Condições operacionais da carga e dos produtos

Após simular a coluna de *short cut distillation*, é possível agora simular a coluna a vácuo, pois há uma base de algumas de suas condições operacionais. Após introduzir os dados das condições de operação da coluna, ela deverá convergir e, além disso, os óleos lubrificantes deverão estar em determinadas faixas de viscosidade, mostradas na tabela a seguir:

Tabela III.6 – Faixas de viscosidade dos óleos lubrificantes

Óleo lubrificante	Faixa de viscosidade a 210 °F
Spindle branco	30 a 45 SSU (0,28 a 5,83 cSt)
Neutro leve	37 a 52 SSU (3,09 a 8,00 cSt)
Neutro médio	48 a 64 SSU (6,79 a 11,42 cSt)
Neutro pesado	64 a 85 SSU (11,42 a 16,42 cSt)

Como as faixas de viscosidade são determinadas a 210 °F (que equivale a 98,89 °C), foram colocados resfriadores, em cada corrente de saída da coluna, já que elas sairão da coluna em temperaturas muito maiores. A corrente de saída de cada resfriador está a 210 °F; assim, será possível saber se os óleos lubrificantes estão em suas respectivas faixas de viscosidade.

Não foi obtida a faixa de viscosidade do óleo bright stock.

III.3.1 – Condições operacionais da carga

Através de tentativas, verificou-se que, para que os óleos lubrificantes atingissem suas respectivas faixas de viscosidades, o estágio de alimentação da coluna deveria estar mais abaixo do que as saídas da coluna. Por esse motivo, a pressão do prato de carga foi modificada, para que um estágio mais abaixo da coluna ficasse com uma pressão menor, já que a pressão aumenta do topo para o fundo da coluna. Essa pressão foi determinada como sendo a menor pressão sem que o simulador acusasse o problema citado. A tabela a seguir mostra as novas condições da carga.

Tabela III.7 – Condições operacionais da carga

Condições operacionais do RAT	
Pressão	10,15 psia
Temperatura	486,8 °C
Fração vaporizada	0

A composição da carga é a mesma citada na seção III.1.

Com esses valores, o simulador determinou a densidade do RAT, que é igual a 600,2 kg/m³. Agora, torna-se possível utilizar uma vazão mássica mais realística de acordo com a Petrobras. Como já dito anteriormente, a Petrobras tem uma capacidade de 650 milhões de litros/ano, o que equivale a uma vazão mássica de 44535 kg/h.

III.3.2 – Vazões dos produtos

Para a simulação da coluna a vácuo, um dos parâmetros a ser especificado é a vazão dos produtos. Para tal, o procedimento a seguir foi utilizado.

Tal como foi feito para o RAT, os óleos lubrificantes também foram inseridos no UniSim Design. Suas curvas de destilação ASTM 1160, obtidas a pressão de 1 torr (1 mmHg) são as seguintes:

Tabela III.8 – Curva de destilação ASTM 1160 do spindle branco

% volumétrica	T (°C)
IBP	139,3
5	160,2
10	164,5
20	173,9
30	174,0
40	176,2
50	180,9
60	187,0
70	196,2
80	201,6
90	212,7
95	223,1
99	241,7

Tabela III.9 – Curva de destilação ASTM 1160 do neutro leve

% volumétrica	T (°C)
IBP	151,7
5	177,7
10	186,8
20	196,4
30	202,1
40	208,2
50	214,4
60	220,5
70	226,8
80	234,4
90	244,4
95	251,4
99	263,9

Tabela III.10 – Curva de destilação ASTM 1160 do neutro médio

% volumétrica	T (°C)
IBP	137,0
5	211,9
10	219,8
20	231,9
30	235,6
40	239,2
50	242,1
60	245,4
70	248,8
80	253,2
90	259,7
95	265,6
99	275,0

Tabela III.11 – Curva de destilação ASTM 1160 do bright stock

% volumétrica	T (°C)
IBP	207,7
5	287,5
10	297,8
20	312,1
30	325,2
40	338,1
50	350,2
60	361,8
62,5	364,0

Não foi encontrada a curva ASTM 1160 do óleo neutro pesado.

Em seguida, o simulador gerou as curvas PEV dos óleos, mostradas nas figuras a seguir:

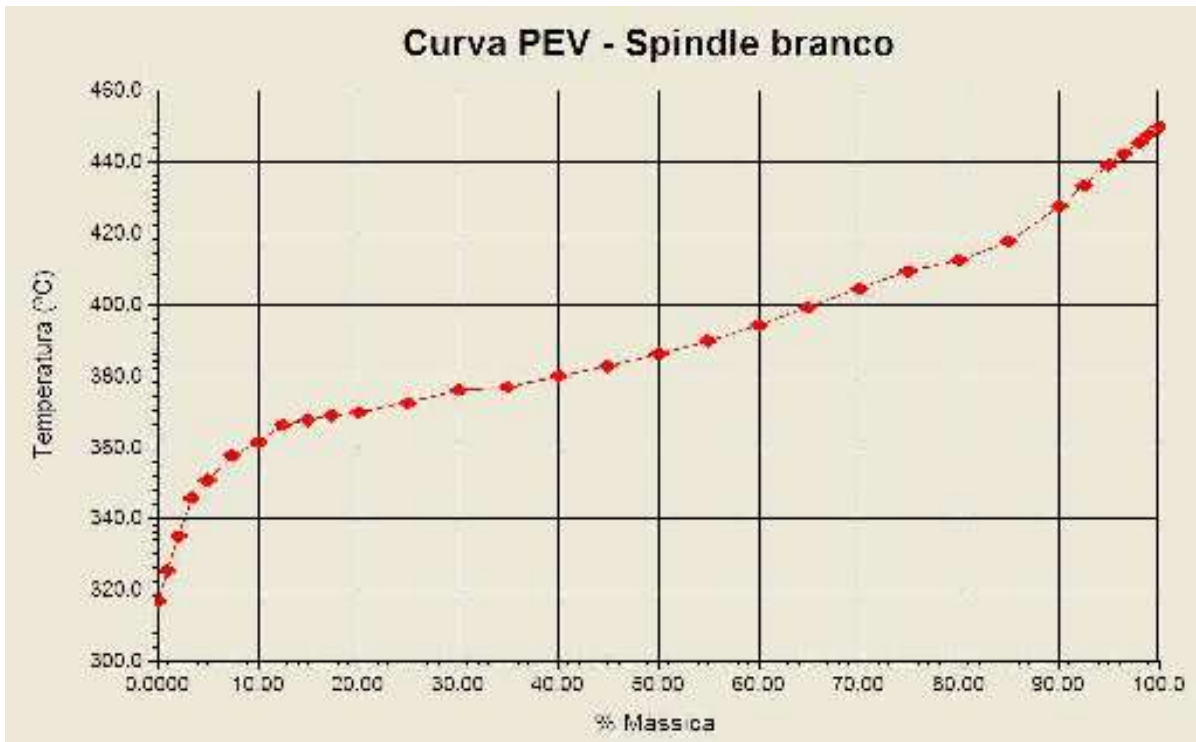


Figura III.3 – Curva de destilação PEV do spindle branco

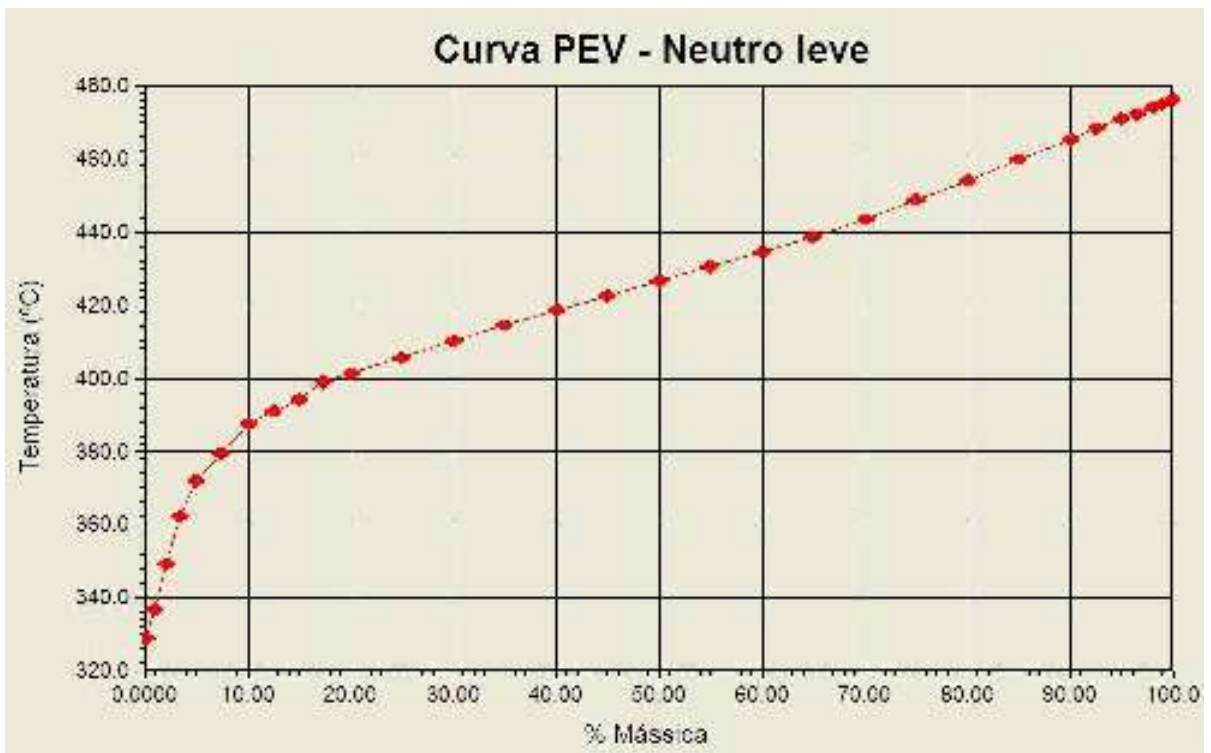


Figura III.4 – Curva de destilação PEV do neutro leve

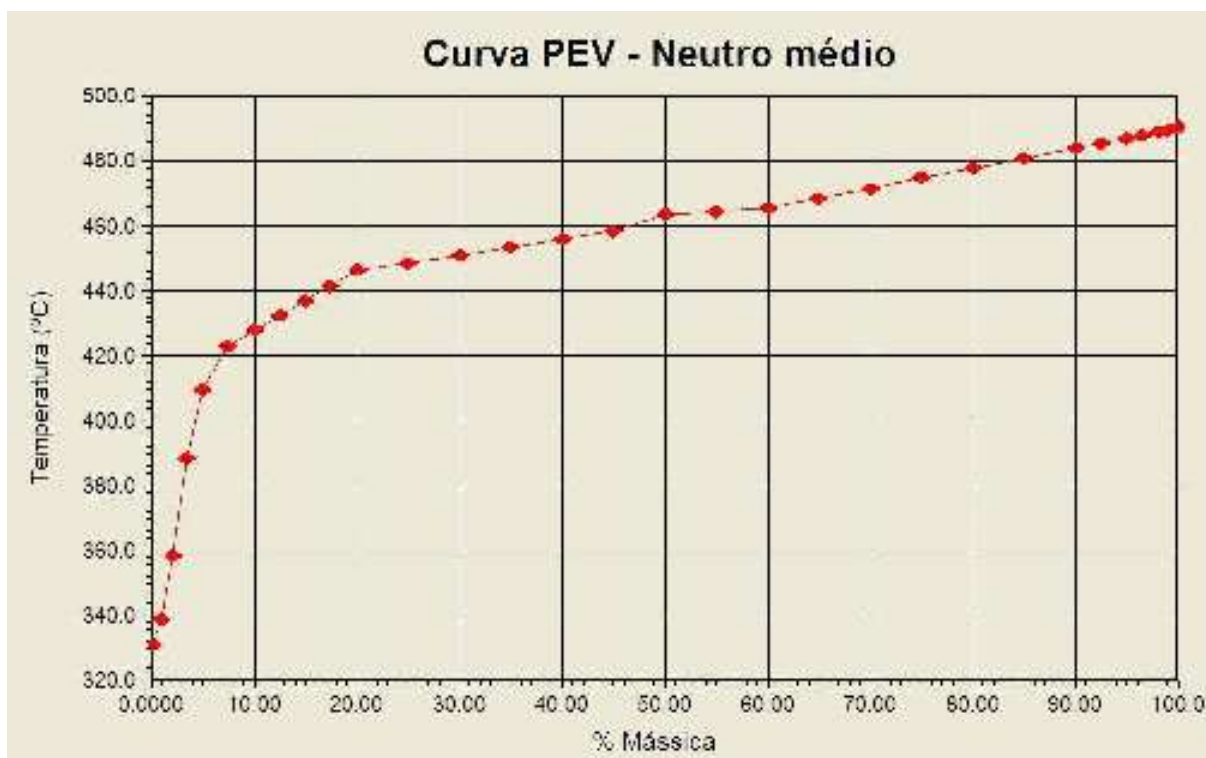


Figura III.5 – Curva de destilação PEV do neutro médio

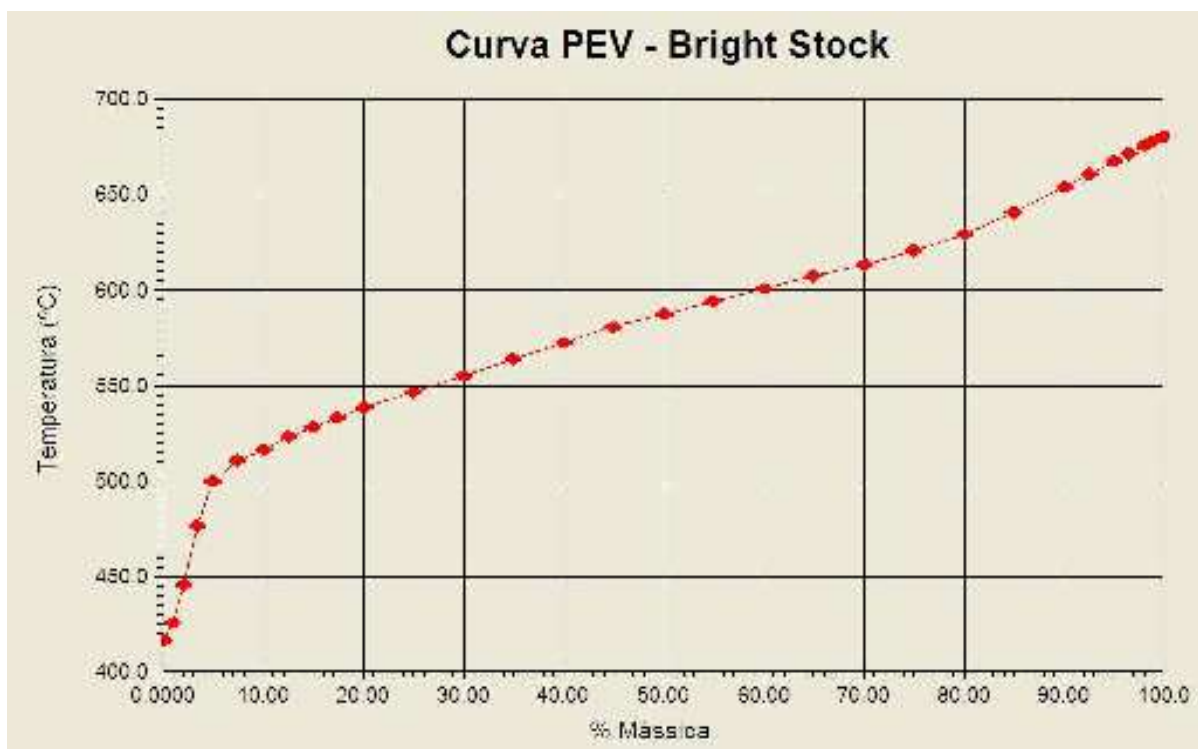


Figura III.6 – Curva de destilação PEV do bright stock

Após este procedimento, foi utilizada a função *Distribution Plot*. Esta função permite que seja feita uma análise quantitativa da amostra através da fração volumétrica, mássica ou molar, em termos de determinadas faixas de ebulição presentes no simulador. (JUNGMANN et al, 2009)

Contidas na parte do óleo de vácuo, são encontradas as seguintes faixas:

- Off Gas: Faixa situada até 370 °C;
- LVGO: Faixa compreendida entre 370 e 430 °C;
- HVGO: Faixa compreendida entre 430 e 560 °C;
- Vac Residue: Faixa compreendida entre 560 e 650 °C;
- Vac Residue: Faixa compreendida entre 650 e 750 °C.

Os gráficos para cada um dos óleos serão mostrados nas figuras a seguir.

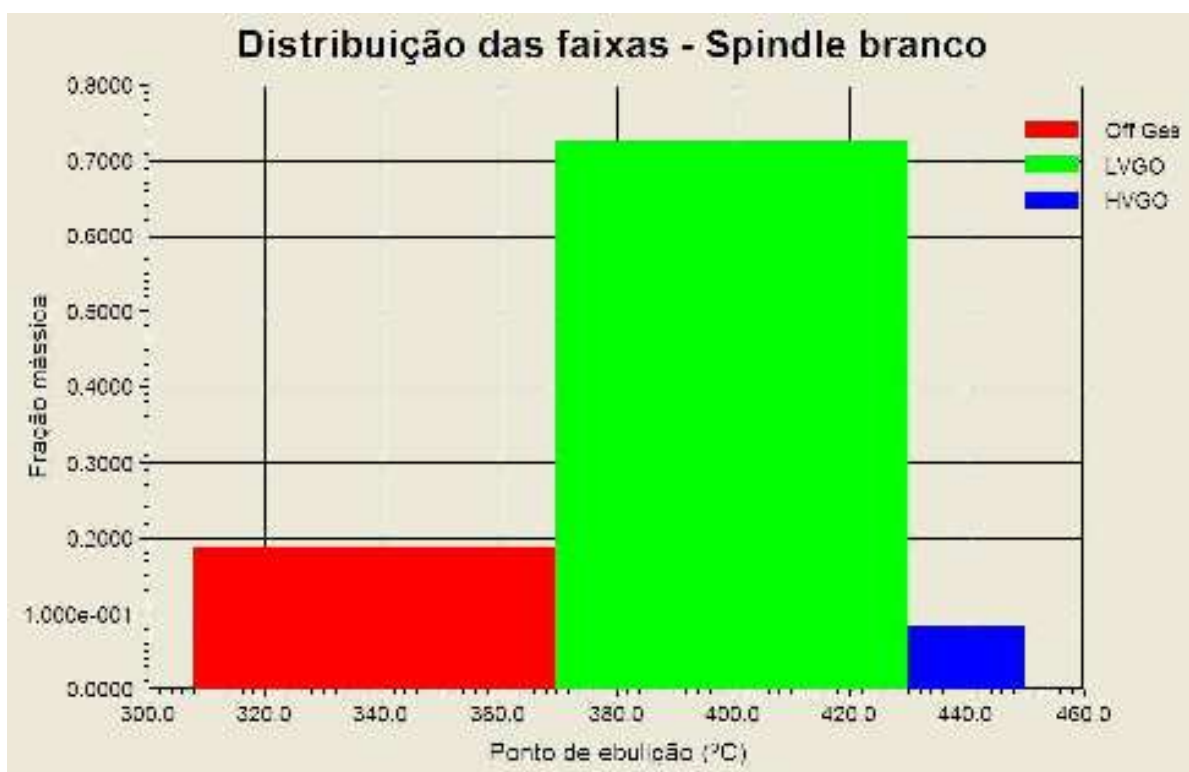


Figura III.7 – Distribuição das faixas do spindle branco



Figura III.8 – Distribuição das faixas do neutro leve

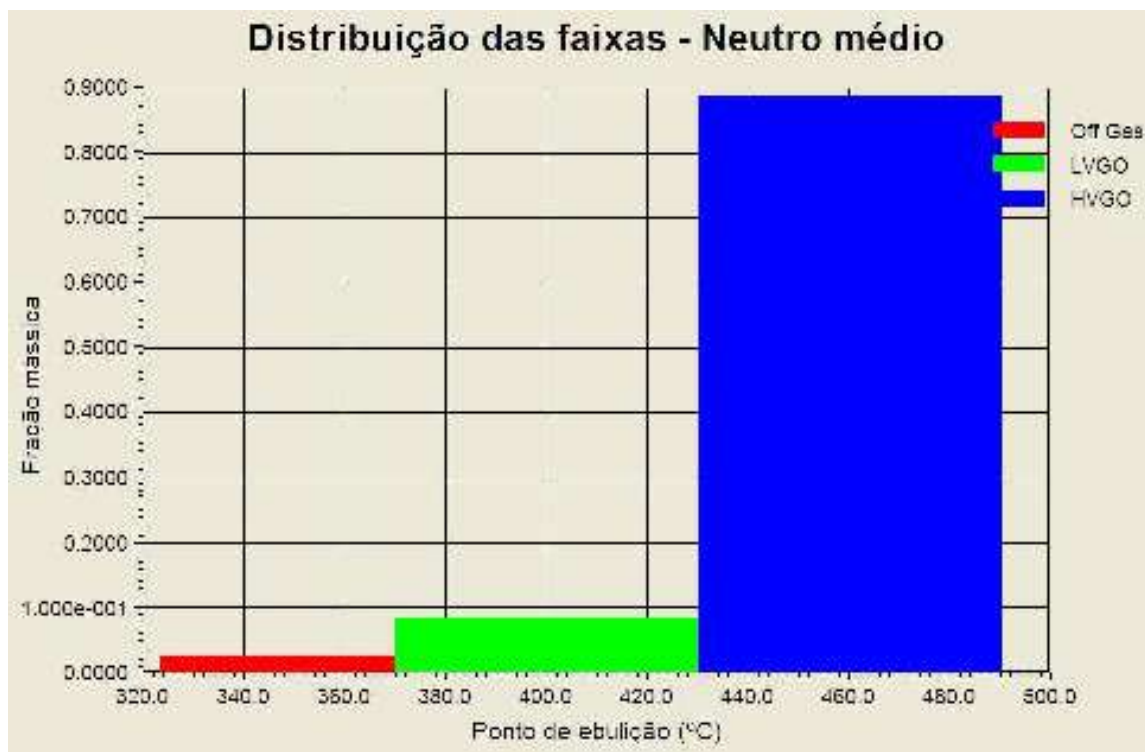


Figura III.9 – Distribuição das faixas do neutro médio

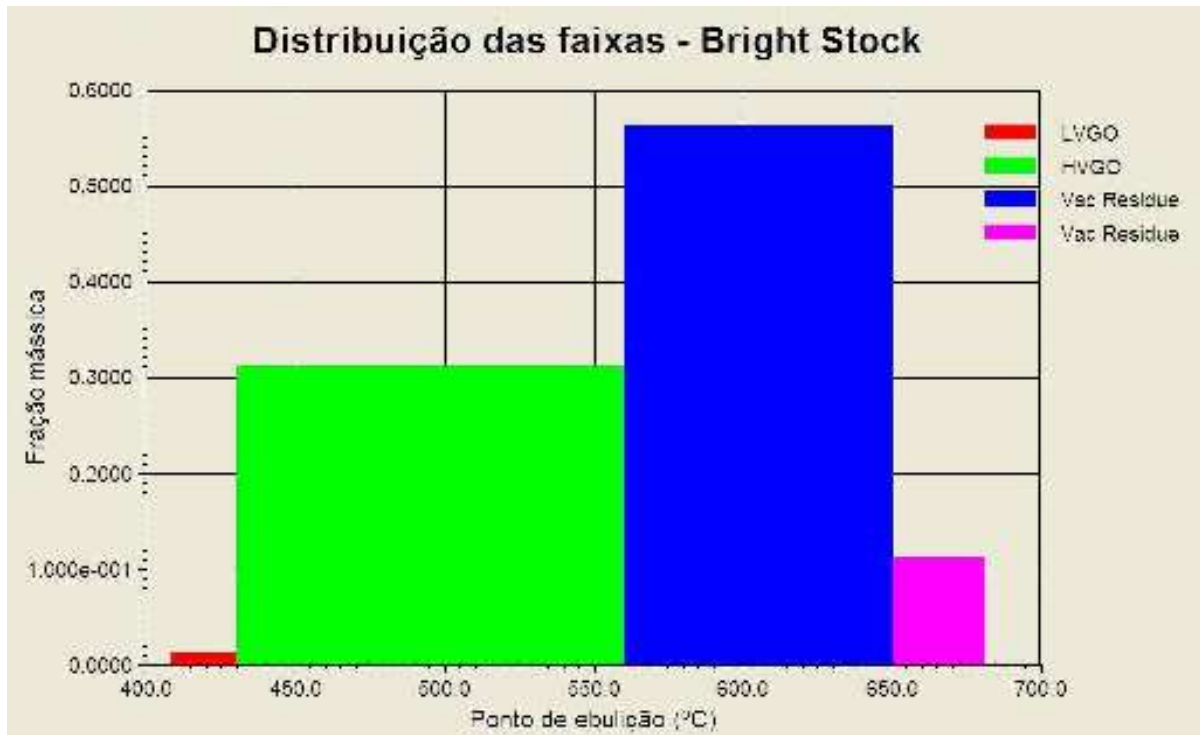


Figura III.10 – Distribuição das faixas do bright stock

O mesmo procedimento foi feito para o RAT que alimentará a coluna.

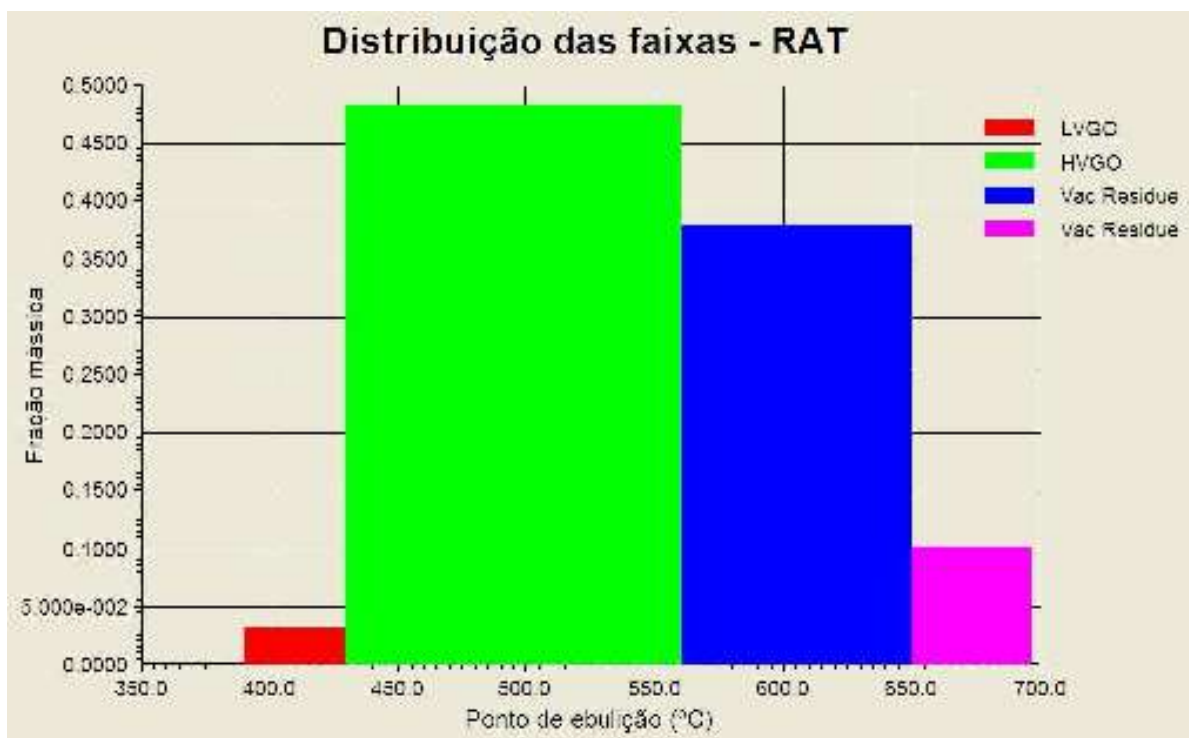


Figura III.11 – Distribuição das faixas do RAT

Os resultados dos gráficos estão na tabela a seguir:

Tabela III.12 – Distribuição das faixas dos óleos lubrificantes

	Spindle branco	Neutro leve	Neutro médio	Bright stock
Off Gas	0,1911	0,0472	0,0275	0,0000
LVGO	0,7289	0,4931	0,0850	0,0133
HVGO	0,0800	0,4583	0,8875	0,3183
Vac Residue	0,0000	0,0000	0,0000	0,5600
Vac Residue	0,0000	0,0000	0,0000	0,1100

Tabela III.13 – Distribuição das faixas do RAT

	Off Gas	LVGO	HVGO	Vac Residue	Vac Residue
RAT	0,0000	0,0319	0,4847	0,3806	0,1028

A seguir, devem-se normalizar cada uma das faixas dos óleos lubrificantes, para que se possa determinar a proporção das faixas no RAT e estimar as frações dos óleos lubrificantes que serão produzidos na destilação. Foi obtido, então, o seguinte resultado:

Tabela III.14 – Distribuição das faixas normalizadas dos óleos lubrificantes

	Spindle branco	Neutro leve	Neutro médio	Bright stock
Off Gas	0,7189	0,1776	0,1035	0,0000
LVGO	0,5521	0,3735	0,0644	0,0101
HVGO	0,0459	0,2628	0,5089	0,1825
Vac Residue	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000
Vac Residue	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000

O próximo passo é multiplicar cada coluna da tabela III.14 pela tabela III.13. Obtém-se, assim, uma estimativa da fração dos lubrificantes presentes em cada faixa. O resultado final é mostrado na tabela a seguir:

Tabela III.15 – Estimativa da fração dos óleos lubrificantes processados na destilação

Óleo lubrificante	Off Gas	LVGO	HVGO	Vac Residue	Vac Residue	Total
Spindle branco	0,0000	0,0176	0,0222	0,0000	0,0000	0,0399
Neutro leve	0,0000	0,0119	0,1274	0,0000	0,0000	0,1393
Neutro médio	0,0000	0,0021	0,2466	0,0000	0,0000	0,2487
Bright stock	0,0000	0,0003	0,0885	0,3806	0,1028	0,5722

Agora, basta expressar em termos de vazão mássica dos óleos lubrificantes. Como a carga inicial é de 44535 kg/h de RAT, deve-se multiplicar este valor pela fração dos lubrificantes, obtendo-se assim suas vazões mássicas.

Tabela III.16 – Estimativa da vazão dos óleos lubrificantes processados na destilação

Óleo lubrificante	Vazão (kg/h)
Spindle branco	1775,42
Neutro leve	6203,51
Neutro médio	11075,95
Bright stock	25482,29

É possível notar que a soma desses valores atinge a vazão total de RAT. Sendo assim, pode-se concluir que, neste processo, não há produção do óleo neutro pesado e, por isso, ele não será mais considerado nas simulações.

Capítulo IV - SIMULAÇÕES

IV.1 – Simulação da coluna a vácuo

Após a simulação da coluna, o próximo passo é otimizá-la, para tentar maximizar a vazão

No ambiente da coluna, o resíduo atmosférico foi denominado RAT. O spindle branco sai no topo da coluna, os óleos neutro leve e neutro médio são retiradas laterais, e o bright stock é o produto de fundo da coluna. Nas quatro correntes de saída da coluna, há um resfriador, para que as correntes sejam resfriadas a 210 °F, sendo possível verificar se as viscosidades dos óleos lubrificantes estão na faixa desejada.

A figura a seguir mostra a coluna a vácuo esquematizada no simulador:

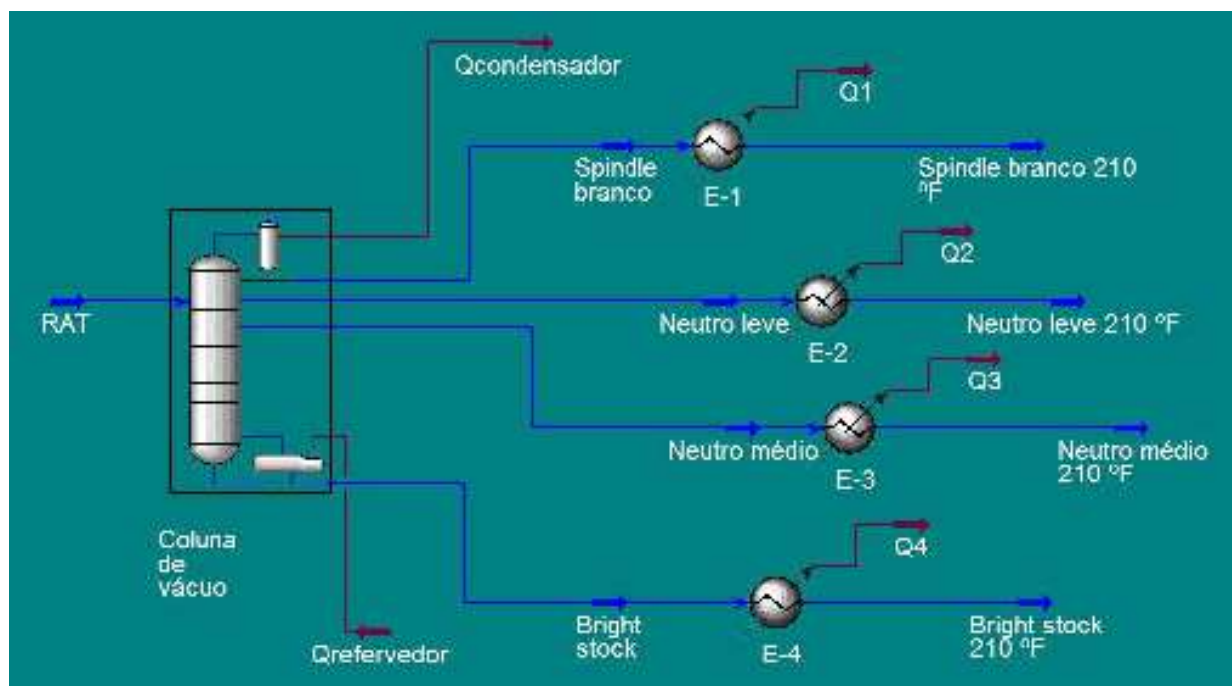


Figura IV.1 – Coluna a vácuo

As condições operacionais da coluna (tais como pressão de operação, razão de refluxo, pressão do prato de carga, temperatura da carga, número de estágios, estágio de

alimentação, vazão da carga, fração vaporizada da carga, vazão dos produtos e fração vaporizada dos produtos) são aquelas citadas no capítulo III.

Serão utilizadas unidades totais (condensador total e refervedor total).

A coluna convergiu e atingiu as faixas de viscosidades desejadas sob as seguintes condições:

Tabela IV.1 – Condições operacionais da coluna a vácuo

Condições operacionais	Valor
Pressão de operação	0,193 psia (10 mmHg)
Razão de refluxo	6,5
Pressão do prato de carga	10,15 psia
Temperatura da carga	486,8 °C
Estágio de alimentação	4

Sob essas condições, têm-se as seguintes condições das correntes envolvidas no processo:

Tabela IV.2 – Resultados da simulação

Corrente	Estágio de alimentação	Estágio de retirada	Temperatura (°C)	Pressão (kPa)	Vazão (kg/h)	Viscosidade a 210 °F (cSt)
RAT	4	-	486,8	70,00	44535	-
Spindle branco	-	Condensador	270,9	1,33	1775	4,87
Neutro leve	-	1	411,8	35,81	6203	7,31
Neutro médio	-	2	444,6	40,73	11077	11,10
Bright stock	-	Refervedor	549,8	70,28	25480	46,14

IV.2 – Metodologia das otimizações para otimizar a vazão do óleo neutro leve

Depois de a coluna ter sido simulada, o próximo passo é otimizá-la, para tentar maximizar a vazão do óleo neutro leve, que é um óleo lubrificante que possui alto valor agregado.

Para o processo de otimização, algumas das condições operacionais da coluna a vácuo serão variadas, enquanto outras serão mantidas constantes. A variável a ser monitorada será a vazão do óleo neutro leve. É importante ressaltar que não basta verificar

se a produção deste óleo foi maximizada, mas também se deve verificar se as viscosidades dos óleos lubrificantes estão dentro das faixas desejadas.

As variáveis que serão otimizadas são o número de pratos da coluna, a pressão de operação da coluna, a razão de refluxo e a fração vaporizada do RAT. Um resumo de como serão realizadas as otimizações estão na tabela V.1.

Tabela IV.3 – Otimizações a serem realizadas

Número de pratos	Pressão de operação	Razão de refluxo	Número de pratos	Pressão de operação	Razão de refluxo
6	10 mmHg	6	7	10 mmHg	6
		7			7
		8			8
		9			9
		10			10
	20 mmHg	6		20 mmHg	6
		7			7
		8			8
		9			9
		10			10
	30 mmHg	6		30 mmHg	6
		7			7
		8			8
		9			9
		10			10
	40 mmHg	6		40 mmHg	6
		7			7
		8			8
		9			9
		10			10

Número de pratos	Pressão de operação	Razão de refluxo
8	10 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	20 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	30 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	40 mmHg	6
		7
		8
		9
		10

Número de pratos	Pressão de operação	Razão de refluxo
9	10 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	20 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	30 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	40 mmHg	6
		7
		8
		9
		10

Número de pratos	Pressão de operação	Razão de refluxo
10	10 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	20 mmHg	6
		7
		8
		9
		10

Número de pratos	Pressão de operação	Razão de refluxo
10	30 mmHg	6
		7
		8
		9
		10
	40 mmHg	6
		7
		8
		9
		10

Para a variação da fração vaporizada do RAT, será usada a ferramenta *Case Studies*, do simulador UniSim Design. Essa ferramenta permite que se possa variar um parâmetro qualquer, mantendo os outros parâmetros constantes, para o monitoramento de uma

variável desejada. Nesse caso, a variável a ser variada será a fração vaporizada, e se monitorará a vazão do óleo neutro leve. O simulador fornece automaticamente um gráfico e uma tabela com os dados obtidos. Se alguma das condições não apresentar uma solução, o simulador também informa essa situação (na aba *Failed States*).

A fração vaporizada do RAT será variada de 0 (líquido saturado) a 1 (vapor saturado), em intervalos de 0,05.

IV.3 – Discussão das otimizações

Depois de todas as otimizações terem sido realizadas, uma análise das mesmas deve ser feita.

Várias condições operacionais propostas no item V.1 para a realização da coluna a vácuo fizeram com que a coluna não convergisse, como foi o caso da coluna com 6 pratos, pressão de operação de 10 mmHg e razão de refluxo igual a 6. Já com outras condições propostas, os óleos lubrificantes estavam fora das faixas de viscosidade especificadas, que foi o caso da coluna com 10 pratos, pressão de operação de 40 mmHg e razão de refluxo igual a 7. Nestes casos, não foi realizada a variação da fração vaporizada do RAT. No caso nos quais os óleos lubrificantes estavam fora da faixa de viscosidade, foi verificado que o aumento da fração de vapor na carga aumenta a viscosidade dos produtos, afastando-os ainda mais das faixas determinadas.

Para os casos em que a coluna convergiu e a viscosidades dos óleos estavam dentro das faixas especificadas, foi feita a variação da fração vaporizada do RAT, conforme descrito na seção V.1. Porém, para todos os casos houve condições em que, em certo ponto do processo, a coluna deixou de apresentar solução. A fração vaporizada máxima que fez com que algumas colunas ainda convergissem foi 0,60. Apenas quatro colunas atingiram esse valor, a saber: a coluna com 7 pratos, pressão de operação de 10 mmHg e razão de refluxo igual a 10, a com 8 pratos, pressão de operação de 10 mmHg e razão de refluxo igual a 10, a com 9 pratos, pressão de operação de 10 mmHg e razão de refluxo igual a 10, e a com 10 pratos, pressão de operação de 10 mmHg e razão de refluxo igual a 10. Este fato não quer dizer, porém, que essas quatro colunas tiveram a sua vazão de óleo neutro leve

maximizada, mas que esses casos tiveram menos estados que não convergiram (*Failed States*).

O caso em que houve a maior vazão do óleo neutro leve foi a coluna com 10 pratos, pressão de operação de 20 mmHg e razão de refluxo igual a 10. A seguir está o gráfico que mostra a variação da vazão deste óleo lubrificante com a variação da fração vaporizada do RAT, assim como uma tabela com os valores do gráfico. Nota-se que a coluna só convergiu (ou seja, o simulador foi capaz de calcular as condições operacionais da coluna) até a fração de vapor da carga ser igual a 0,30; após esse valor, a coluna não convergiu mais.

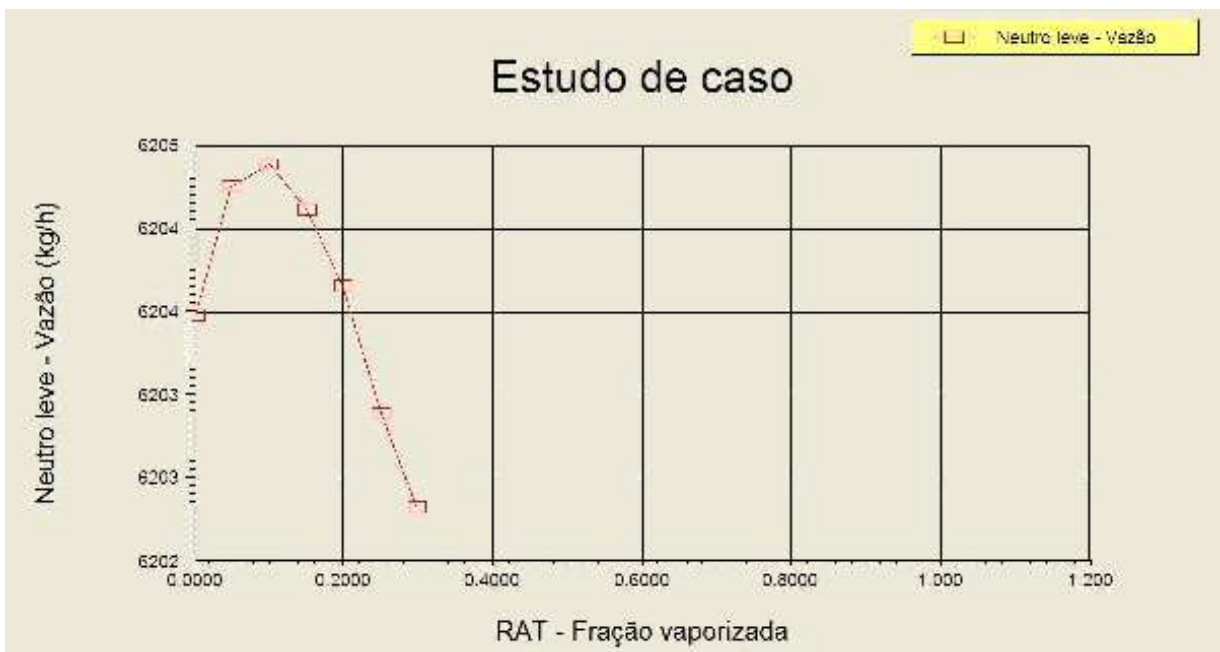


Figura IV.2 – Resultado da variação da vazão de óleo neutro leve com a variação da fração de vapor da carga

Tabela IV.4 – Resultado da variação da vazão de óleo neutro leve com a variação da fração de vapor da carga

Estado	Fração vaporizada	Vazão (kg/h)
Estado 1	0,00	6203,491
Estado 2	0,05	6204,266
Estado 3	0,10	6204,394
Estado 4	0,15	6204,120
Estado 5	0,20	6203,665
Estado 6	0,25	6202,893
Estado 7	0,30	6202,327

A maior vazão obtida de todas as otimizações foi 6204,394 kg/h. Porém, nota-se que a variação da vazão do óleo neutro leve foi muito pequena, não só nesse caso, mas em todos os outros em que houve convergência da coluna. Por esse motivo, a coluna escolhida para o processamento do RAT, dentre as opções propostas na seção V.1, é aquela em que os custos fixos são os mais baixos, ou seja, a coluna com menos pratos teóricos; com a maior pressão de operação, pois quanto maior o vácuo, maior o custo; e a menor razão de refluxo, que diminui os custos com energia no condensador e também no refeedor, ou seja, será utilizada a coluna com 7 pratos, pressão de operação de 40 mmHg, e razão de refluxo igual a 8. Além disso, a fração vaporizada da carga escolhida foi zero (líquido saturado), já que sua variação também não resulta em aumento significativo da vazão do óleo neutro leve, e um aumento da fração vaporizada da carga, ou seja, da temperatura da carga, só aumentaria os custos fixos do processo.

Capítulo V – DIMENSIONAMENTO DA COLUNA DE VÁCUO

O último passo é o dimensionamento da coluna de vácuo. A coluna dimensionada será a coluna escolhida no capítulo anterior: coluna com 7 pratos, pressão de operação de 40 mmHg, e razão de refluxo igual a 8.

Para tal, usa-se a ferramenta *Tray Sizing*, do UniSim Design. Essa ferramenta permite que se divida a coluna em seções e que se especifiquem seus internos, e então o simulador fornecerá os dados desejados, tais como altura e diâmetro de cada seção da coluna, dentre outros.

As quatro variáveis que serão analisadas serão a altura, o diâmetro, a perda de carga e a altura equivalente ao prato teórico (HETP – do inglês *Height Equivalent to the Theoretical Plate*), que relaciona a altura de recheio necessária para que ocorra a separação e, um estágio teórico. As duas últimas variáveis servem para que se possa analisar a eficiência da coluna a vácuo projetada.

O primeiro passo é dividir a coluna em seções. Uma seção é uma parte da coluna compreendida entre dois estágios com retirada lateral, um com retirada lateral e um de alimentação ou dois estágios de alimentação (o que não é o caso do presente trabalho). A coluna foi dividida em três seções, de acordo com a tabela V.1.

Tabela V.1 – Seções da coluna a vácuo

Seção	Estágios
1 ^a	1 a 2
2 ^a	3 a 4
3 ^a	5 a 7

Depois de dividir a coluna em seções, pode-se definir os internos da coluna. O simulador UniSim Design fornece inúmeras possibilidades de internos, tais como pratos perfurados, pratos com válvulas e vários tipos de recheios. Foram selecionados pratos perfurados e seis tipos de recheios diferentes, tentando variá-los o máximo possível, tanto em relação ao material (plástico, metal e cerâmica), quanto em relação ao tamanho (3/4 in, 1 in, 1&1/4 in e 2 in), e também em relação ao tipo (randômico ou estruturado).

As tabelas seguintes fornecem, respectivamente, o diâmetro, a altura, a perda de carga e o HETP em casa seção da coluna a vácuo. Nota-se que não há HETP para a coluna de pratos perfurados, já que esta é uma propriedade exclusiva de colunas recheadas.

Tabela V.2 – Diâmetro (em metros) das seções da coluna a vácuo

Internos	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Ballast Rings (Metal, Random) 1in	1,676	1,524	1,829
Cascade Miniring (Metal) N° 0	1,829	1,676	1,981
Glitsch Grid (Metal Structured) Structured	1,372	1,372	1,676
Intalox Saddles (Ceramic) 3/4 inch	2,134	2,134	2,438
Pall Rings (Plastic, random) 2 in	1,524	1,372	1,676
Raschig Rings 1/16 in wall (CSteel) 1&1/4in	2,134	1,981	2,438
Pratos perfurados	1,676	1,829	2,134

Tabela V.3 – Altura (em metros) das seções da coluna a vácuo

Internos	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Ballast Rings (Metal, Random) 1in	1,468	0,848	1,315
Cascade Miniring (Metal) N° 0	1,499	1,168	1,841
Glitsch Grid (Metal Structured) Structured	1,399	1,099	1,751
Intalox Saddles (Ceramic) 3/4 inch	1,555	1,255	1,960
Pall Rings (Plastic, random) 2 in	1,435	1,437	2,228
Raschig Rings 1/16 in wall (CSteel) 1&1/4in	1,555	1,228	1,960
Pratos perfurados	1,219	1,219	1,829

Tabela V.4 – Perda de carga (em kPa) das seções da coluna a vácuo

Internos	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Ballast Rings (Metal, Random) 1in	0,2360	0,2117	0,3531
Cascade Miniring (Metal) N° 0	0,3599	0,2978	0,5506
Glitsch Grid (Metal Structured) Structured	0,0732	0,0924	0,1375
Intalox Saddles (Ceramic) 3/4 inch	0,5066	0,2832	0,4779
Pall Rings (Plastic, random) 2 in	0,2281	0,3533	0,5634
Raschig Rings 1/16 in wall (CSteel) 1&1/4in	0,4079	0,3242	0,4841
Pratos perfurados	0,6651	0,6106	1,0268

Tabela V.5 – HETP (em metros) das seções da coluna a vácuo

Internos	Seção 1	Seção 2	Seção 3
Ballast Rings (Metal, Random) 1in	0,7338	0,4240	0,4382
Cascade Miniring (Metal) N° 0	0,7493	0,5838	0,6138
Glitsch Grid (Metal Structured) Structured	0,6997	0,5497	0,5838
Intalox Saddles (Ceramic) 3/4 inch	0,7776	0,6276	0,6533
Pall Rings (Plastic, random) 2 in	0,7174	0,7186	0,7427
Raschig Rings 1/16 in wall (CSteel) 1&1/4in	0,7776	0,6138	0,6533

Uma coluna tem um custo menor quanto menor for seu tamanho. Uma comparação entre os diâmetros e as alturas de cada seção permite verificar que o tipo Glitsch Grid apresentou um diâmetro menor em todas as seções, enquanto que o tipo Ballast Rings apresentou uma altura menor em duas das três seções da coluna.

Em relação à eficiência, sabe-se que a coluna é menos eficiente se a perda de carga aumenta. Além disso, grandes perdas de carga significam altos custos de energia para fazer com que o vapor flua ascendentemente na coluna. Deve-se, portanto, escolher o interno com a menor perda de carga. O modelo Glitsch Grid apresentou, novamente, a menor perda de carga em todas as seções.

Já em relação ao HETP, o modelo Glitsch Grid, pela correlação de Frank, possui o menor valor de na 1ª seção, enquanto o modelo Ballast Rings, pela correlação de Norton, possui o menor valor nas outras duas seções.

É interessante notar que o modelo Glitsch Grid, também pela correlação de Frank, apresentou o segundo menor valor de HETP para a 2ª e a 3ª seções, além de apresentar o segundo menor valor de altura para todas as seções, indicando que este modelo possui bons resultados para todos os quesitos avaliados.

Desta maneira, pode-se concluir que o melhor interno para a coluna a vácuo projetada é o modelo Glitsch Grid, que obteve os melhores resultados em relação aos outros internos estudados.

Capítulo VI – CONCLUSÃO

VI.1 – Conclusões

Foi realizada uma simulação de uma destilação a vácuo do resíduo atmosférico do petróleo Marlin, com o objetivo de se obter óleos lubrificantes básicos e de se maximizar a produção do óleo neutro leve.

A carga foi bem caracterizada, já que a curva de destilação PEV dos dados inseridos no simulador e a curva calculada pelo mesmo foram coincidentes.

Após a convergência da coluna, e posterior verificação da viscosidade dos óleos lubrificantes, que deveriam estar dentro de uma faixa especificada, foi realizada a otimização da mesma, para maximizar a produção do óleo neutro leve, de alto valor agregado. Foi verificado, de acordo com os casos estudados, que a alteração das condições operacionais da coluna praticamente não modificou a vazão do óleo neutro leve, sendo, portanto, escolhida a coluna que tivesse os menores custos fixos, ou seja, a coluna com 7 pratos, pressão de operação de 40 mmHg, razão de refluxo igual a 8, e fração vaporizada da carga igual a zero, ou seja, a carga é líquida saturada.

O dimensionamento da coluna a vácuo indicou que o melhor modelo de interno a ser usado é o recheio do tipo Glitsch Grid, pois apresenta o menor diâmetro e pequena altura, minimizando os custos fixos, baixa perda de carga e baixo HETP, indicando uma boa eficiência.

VI.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Uma primeira sugestão é a simulação de todo o processo da produção de óleos lubrificantes básicos, desde a destilação atmosférica do petróleo Marlin, passando pela destilação a vácuo, extração e desparafinação com solvente, até a obtenção dos óleos acabados.

Uma segunda sugestão é uma avaliação econômica deste processo, para que se possa verificar se este processo é ou não viável.

Capítulo VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

JUNGMANN, Alexandre Ramos e SALLES, Mário Henrique Galvão. *Estudo da Viabilidade de Separação de levas do RAT Através da Destilação a Vácuo*. Projeto final de Curso, Engenharia Química, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

ORLANDO Jr., Aloísio Euclides. *Simulação e Otimização Preliminar de Colunas de recheios Estruturados na obtenção de Óleos Lubrificantes*. Projeto final de Curso, Engenharia Química, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.

ORLANDO Jr., Aloísio Euclides. *Análise de Desempenho de Colunas de Destilação Contendo Recheios estruturados*. Dissertação de Mestrado, Engenharia Química, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

QUINTANILHA, L.F.N. *Estimação de Propriedades Termodinâmicas e de Transporte de Óleos lubrificantes*. Projeto final de Curso, Engenharia Química, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2003.

RODRIGUES, Juliana Braga. *Avaliação do Processo ROSE Usando Diferentes Solventes*. Projeto final de Curso, Engenharia Química, Escola de Química, UFRJ, Rio de Janeiro, 2009.

VALLE, Maria Leticia Murta. *Produtos do Setor de Combustíveis e Lubrificantes*. Publit Soluções Editoriais, 2007.

WAUQUIER, Jean Pierre. *Petroleum Refining 1 - Crude Oil – Petroleum Products – Process Flowsheets*. – Éditions Technip, França, 1995.