

Dissertação de Mestrado

Otimização de um processo real de destilação atmosférica de petróleo utilizando simulação de processos e métodos estatísticos

Maria Bianca Medeiros de Mello Nobrega

Natal, janeiro de 2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA



DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Otimização de um processo real de destilação atmosférica de petróleo utilizando simulação de processos e métodos estatísticos

Maria Bianca Medeiros de Mello Nobrega

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Chiavone Filho

Coorientadora: Prof^a. Dr^a. Silvana Mattedi e Silva

Natal/RN
Janeiro/2018

Maria Bianca Medeiros de Mello Nobrega

Otimização de um processo real de destilação
atmosférica de petróleo utilizando simulação de processos
e métodos estatísticos

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química, sob a orientação do Prof. Dr. Osvaldo Chiavone Filho e coorientação da Prof^a. Dr^a. Silvana Mattedi e Silva.

Natal/RN
Janeiro/2018

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Nobrega, Maria Bianca Medeiros de Mello.

Otimização de um processo real de destilação atmosférica de petróleo utilizando simulação de processos e métodos estatístico / Maria Bianca Medeiros de Mello Nobrega. - 2018.

84 f.: il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. Natal, RN, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Osvaldo Chiaivone Filho.

Coorientador: Prof.^a Dr.^a Silvana Mattedi e Silva.

1. Petróleo - Dissertação. 2. Torre de destilação - Dissertação. 3. Otimização - Dissertação. 4. Simulação - Dissertação. 5. Método de superfície de resposta. I. Chiaivone Filho, Osvaldo. II. Silva, Silvana Mattedi e. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 622.142:681.5

NOBREGA, M. B. M. M. Otimização de um processo real de destilação atmosférica de petróleo utilizando simulação de processos e métodos estatísticos. Dissertação de Mestrado, UFRN, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Área de concentração: Engenharia Química, Natal, Brasil, 2017.

Orientador: Osvaldo Chiavone Filho.

Coorientadora: Silvana Mattedi e Silva.

Resumo: A crescente demanda energética mundial tem ocasionado uma elevação nos preços da energia e exigindo cada vez mais a utilização de técnicas que aumentem a eficiência dos processos nas indústrias. Acrescente-se, ainda, que no contexto ambiental, o aumento da eficiência energética tem um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para um desenvolvimento sustentável. Dessa forma, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de otimizar o consumo de energia do condensador de topo de uma torre de destilação atmosférica de petróleo, instalada em uma das maiores refinarias do Brasil. A otimização consistiu na determinação de valores ótimos para a vazão de vapor de retificação e temperatura de carga, que minimizam o consumo de energia do condensador, atendendo os critérios de especificação de produtos e limites operacionais dos equipamentos. Foi desenvolvida uma metodologia de trabalho, que inclui as etapas de modelagem, análise de sensibilidade, planejamento fatorial e Método de Superfície de Resposta (MSR). Essas etapas foram desenvolvidas usando o simulador comercial Petro-SIM[®] e os *softwares* STATISTICA[®] e Microsoft Excel[®]. Os resultados obtidos demonstram que, a refinaria opera em condições operacionais próximas aos valores ótimos, mas ainda é possível obter ganhos significativos através do ajuste da vazão de vapor de retificação e da temperatura de carga. As alterações da vazão de vapor para 280,00 ton/d e da temperatura de carga para 363,64 °C podem gerar uma redução de 0,81% na carga térmica global e uma economia mensal de R\$341.733,00. Vale ressaltar ainda uma redução mensal de 2.148 m³ de água utilizada para a produção de vapor. Dessa forma, além da possibilidade de se obter ganhos reais, a metodologia desenvolvida pode ser utilizada como uma ferramenta de otimização para a melhoria da eficiência energética, mesmo em processos complexos como a destilação de petróleo.

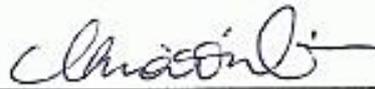
Palavras-Chave: otimização, torre de destilação, petróleo, simulação, método de superfície de resposta.

Maria Bianca Medeiros de Mello Nobrega

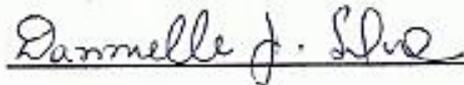
**OTIMIZAÇÃO DE UM PROCESSO REAL DE DESTILAÇÃO ATMOSFÉRICA
DE PETRÓLEO UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE PROCESSOS E MÉTODOS
ESTATÍSTICOS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – PPGEQ, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química.

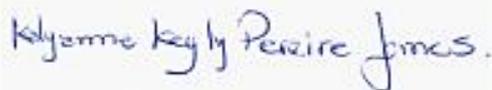
Aprovada em 05/01/2018



Prof. Dr. Osvaldo Chiavone Filho
Orientador – UFRN



Dra. Danielle Janainne da Silva
Membro Externo – USP



Prof^a. Dr^a. Kalyanne Keyly Pereira Gomes
Membro Externo – UFERSA

NOBREGA, M. B. M. M. Optimization of a real crude oil atmospheric distillation process using process simulation and statistical methods. Dissertation, UFRN, Graduate Program in Chemical Engineering, Area of Concentration: Chemical Engineering, Natal, Brazil, 2017.

Advisor: Osvaldo Chiavone Filho.

Co advisor: Silvana Mattedi e Silva.

Abstract: The increasing global demand for energy has caused a rise in energy prices and has required the search for techniques that enhance the efficiency of processes in industries. Furthermore, in the environmental context, increasing energy efficiency plays a key role in reducing greenhouse gas emissions, contributing to sustainable development. This work was developed with the objective of optimizing the energy consumption of the top condenser of an atmospheric petroleum distillation tower, installed in one of the largest refineries in Brazil. The optimization consisted in the determination of optimum conditions for the stripping steam and feed temperature, which minimize the condenser energy consumption, according the product specification requirement and the equipment operational limits. The working methodology developed includes the steps of modeling, sensitivity analysis, factorial design and Response Surface Method (MSR). This was possible with the aid of the commercial simulator Petro-SIM[®] and the softwares STATISTICA[®] and Microsoft Excel[®]. The results demonstrate that the refinery operates at operational conditions close to optimum values, but significant gains can still be reach by adjusting the stripping steam flowrate and feed temperature. The change in the steam flowrate to 280.00 t/d and the feed temperature to 363.64 °C can generate a reduction of 0.81% in the overall thermal load and a monthly savings of R\$ 341,733.00. It is also worth mentioning a monthly reduction of 2,148 m³ of water for the steam production. Thus, in addition to the possibility of real gains, this developed methodology is able to be an optimization tool to improve energy efficiency, even in complex processes such as petroleum distillation.

Keywords: optimization, distillation column, crude oil, simulation, response surface method.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Jorge de Mello.

O hoje que meu coração sente em ausência é aquecido pelo sempre do melhor homem que me instruiu a ser amor e verdade como ele sempre foi em nós.

AGRADECIMENTOS

À Deus, que não me permite desistir e mostra-me sempre luz dos esforços diante da persistência.

Aos meus pais, Jorge e Inácia, pelo amor e apoio incondicional sempre.

Aos meus irmãos, Beto e Leonardo, pela certeza de nunca estar sozinha.

Ao meu esposo, Marcelo Corsini, meu grande amor e maior incentivador.

Aos meus filhos, Victor e Ester, que me mostram a verdade sobre não haver limites para o amor.

Aos meus orientadores, Prof. Osvaldo Chiavone Filho e Prof^ª. Silvana Mattedi e Silva, pilares de sabedoria, essenciais na certeza da minha entrega a engenharia química.

Ao Prof. Salvador Ávila, por viabilizar esse estudo e por me apresentar a engenharia química sob uma nova perspectiva. Aos Professores Humberto Neves Maia de Oliveira, Dannielle Janainne da Silva e Kalyanne Keyly Pereira Gomes por participarem das Bancas de Qualificação e Defesa do meu mestrado.

A todos os meus amigos de uma vida, em especial Neit, Michelle, Marina, Livia e Lilian. Esses que me levam alegrando a vida, obrigada por estarem sempre presentes com coração e ombros.

Ao meu amigo e escritor Marinésio, pelo apoio durante a revisão desse trabalho.

Aos meus caros colegas do laboratório de termodinâmica e do programa de engenharia industrial da UFBA, que me mostraram que há sempre bons amigos nos esperando onde formos. Em especial ao Alexandre, Diego e Pedro. Aos amigos do grupo de fotoquímica e equilíbrio de fases da UFRN, em especial a Dannielle, Deborah e Adolfo, pelo suporte acadêmico e amizade.

Aos programas de pós-graduação em Engenharia Química da UFRN e da UFBA, especialmente ao Prof. Eduardo Lins de Barros Neto, a Prof^ª. Gorete Ribeiro de Macêdo e a Mazinha, fundamentais na extensão do meu trajeto acadêmico. Ao CNPQ pelo apoio financeiro.

À PETROBRAS pelos esforços em apresentar-me a seriedade da vida profissional tendo a engenharia química como centro. Em especial ao gerente Geraldo Márcio e aos engenheiros Eric Knop, Wesley Dantas, Ricardo Cerqueira e Saulo Almeida.

Meu muito obrigada a todos que de alguma forma participaram desse grande passo, este jamais seria possível não fossem pessoas que se colocaram no meu caminho com presença e ajuda.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	2
1.1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	2
1.2 - OBJETIVOS	6
1.2.1 - Objetivo geral.....	6
1.2.2 - Objetivos específicos	6
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	8
2.1 - DESTILAÇÃO ATMOSFÉRICA DE PETRÓLEO	8
2.1.1 - Torres de destilação atmosférica.....	10
2.1.2 - Produtos da destilação atmosférica.....	11
2.1.3 - Principais variáveis operacionais	13
2.2 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE PROCESSOS	15
2.3 - OTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS	16
2.3.1 - Planejamento fatorial e superfície de resposta.....	17
2.3.2 - Otimização de torres de destilação	19
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA	24
3.1 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO	24
3.2 - OTIMIZAÇÃO	26
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	30
4.1 - MODELAGEM E SIMULAÇÃO	30
4.1.1 - Levantamento de dados.....	30
4.1.2 - Verificação da estabilidade da unidade.....	34
4.1.3 - Modelagem e ajuste da unidade	35
4.1.4 - Validação do modelo	37
4.2 - OTIMIZAÇÃO	39
4.2.1 - Análise de sensibilidade.....	40
4.2.2 - Planejamento fatorial	46
4.2.3 - Identificação dos fatores mais significativos	49
4.2.4 - Determinação dos modelos matemáticos.....	51
4.2.5 - Elaboração das superfícies de resposta	52
4.2.6 - Determinação das condições operacionais ótimas	54

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
ANEXOS	71
ANEXO A: RESULTADOS DAS ANÁLISES DE LABORATÓRIO DAS CORRENTES	71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Consumo mundial de energia em quadrilhões BTU, 1990-2040 (Fonte: U.S. Energy Information Administration – EIA, 2016).	2
Figura 1.2 – Consumo mundial de energia por fonte em quadrilhões BTU, 1990-2040 (Fonte: U.S. Energy Information Administration – EIA, 2016).	3
Figura 2.1 – Processo de unidade de destilação de petróleo bruto de três estágios.....	10
Figura 2.2 – Número de artigos publicados no período de 2001 a 2016 sobre otimização de torres de destilação (Fonte: Scopus/Elsevier, 2017).....	20
Figura 3.1 – Metodologia: Etapa modelagem e simulação de processos.	26
Figura 3.2 – Metodologia: Etapa otimização.....	28
Figura 4.1 – Fluxograma do processo estudado de destilação atmosférica de petróleo.....	32
Figura 4.2 – Modelo da unidade elaborado no Petro-SIM.	35
Figura 4.3 – Dados inseridos no Petro-SIM na etapa de modelagem.....	36
Figura 4.4 – Curvas de destilação dos produtos reais e simuladas.....	37
Figura 4.5 – Fluxograma de processo: variáveis manipuladas e função objetivo.	40
Figura 4.6 – Variação da CT do condensador de topo com a temperatura da carga.	41
Figura 4.7 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a temperatura da carga.	42
Figura 4.8 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a temperatura da carga – PIE, PFE e T85%.....	43
Figura 4.9 – Variação da CT do condensador de topo com a vazão de vapor de retificação... ..	44
Figura 4.10 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a vazão de vapor de retificação.	45
Figura 4.11 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a vazão de vapor de retificação – PIE, PFE, T85%.....	45
Figura 4.12 – Variações e limites de especificação dos pontos chaves das curvas de destilação dos produtos.....	48
Figura 4.13 – Diagrama de Pareto – CT do condensador.....	49
Figura 4.14 – Diagrama de Pareto – PFE da NP.	50
Figura 4.15 – Superfície de resposta – CT do condensador em função da temperatura de carga e vazão de vapor.	52
Figura 4.16 – Superfície de resposta – PFE da NP em função da temperatura de carga e vazão de vapor.	53
Figura 4.17 – Superfície de resposta – CT do condensador (Gcal /h) em função da temperatura de carga e vazão de vapor – vista plana.	54

Figura 4.18 – Comparativo entre as cargas térmicas no cenário padrão e C1.....	57
Figura 4.19 – Comparativo entre as cargas térmicas no cenário padrão e C2 e C3.	58
Figura 4.20 – Análise econômica com as condições operacionais do cenário C1.	59
Figura 4.21 – Análise econômica com as condições operacionais dos cenários C2 e C3.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Trabalhos de modelagem e otimização utilizando simulação, planejamento fatorial e MSR.	21
Tabela 4.1 – Lista de equipamentos.	33
Tabela 4.2 – Lista dos principais instrumentos.	34
Tabela 4.3 – Verificação da estabilidade da unidade.	35
Tabela 4.4 – Fatores de calibração.	36
Tabela 4.5 – Desvios absolutos entre as curvas de destilação reais e simuladas.	38
Tabela 4.6 – Desvios relativos das vazões e densidades dos produtos.....	39
Tabela 4.7 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento fatorial.....	47
Tabela 4.8 – Matriz do planejamento fatorial 3 ² - CT do condensador.....	47
Tabela 4.9 – Matriz do planejamento fatorial 3 ² - PFE da NP.	49
Tabela 4.10 – Fatores significativos dos modelos.....	51
Tabela 4.11 – Resultados da otimização.	56
Tabela A.1 – Resultado das análises de laboratório – correntes líquidas.....	71
Tabela A.2 – Resultado das análises de laboratório – corrente gasosa.	72

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES

% – porcentagem

ANOVA – Análise de variância

°C – graus Celsius (unidade de temperatura)

cal – caloria (unidade de energia)

CT – carga térmica

CT_{COND} – carga térmica do condensador de topo

d – dia (unidade de tempo)

DL – diesel leve

DP – diesel pesado

GRG – gradiente reduzido generalizado

h – hora (unidade de tempo)

kgf/cm² – quilograma força por centímetro quadrado (unidade de pressão)

kWh – quilowatt-hora (unidade de energia)

m³ – metro cúbico (unidade de volume)

MSR – metodologia de superfície de resposta

NP – nafta pesada

PIE – ponto inicial de ebulição

PFE – ponto final de ebulição

PFE_{NP} – ponto final de ebulição da nafta pesada

QI – querosene iluminante

RAT – resíduo atmosférico de petróleo

RCF – refluxo circulante de fundo

RCI – refluxo circulante intermediário

RCT – refluxo circulante de topo

R\$ – real

TC – temperatura de carga

ton – tonelada (unidade de massa)

VVR – vazão de vapor de retificação

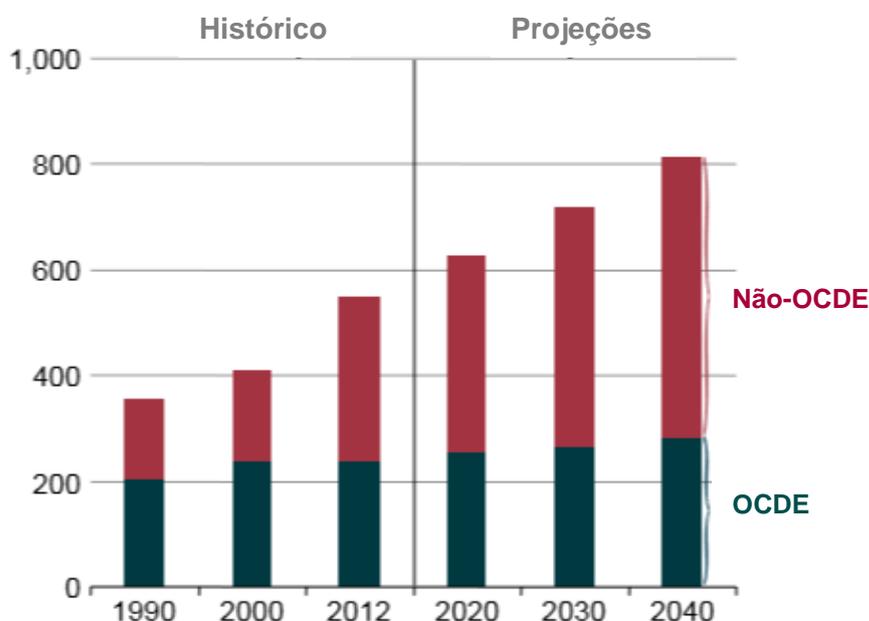
Capítulo 1

Introdução

Capítulo 1 - Introdução

1.1 - Considerações gerais

A utilização de técnicas que aumentem a eficiência energética dos processos na indústria de petróleo é fundamental para garantir a operabilidade das plantas e atender à crescente demanda energética de forma sustentável. Conforme Figura 1.1, estudos realizados pela U.S. Energy Information Administration - EIA, 2016 indicam que ocorrerá no período de 28 anos, de 2012 a 2040, um crescimento de 48% na demanda de energia mundial. Essa crescente demanda tem ocasionado a elevação do preço da energia e exigido a sua utilização de forma mais eficiente (Taqvi *et al.*, 2016). Além disso, no contexto ambiental, o aumento da eficiência energética tem um papel fundamental na redução das emissões de gases de efeito estufa, contribuindo para um desenvolvimento sustentável. O Acordo de Paris, que entrou em vigor em 04 de novembro de 2016, mostra a relevância da redução dessas emissões. Através desse acordo, 197 países, inclusive o Brasil, assumem o compromisso de contribuir na redução das emissões com o objetivo de conter o aumento da temperatura média global (Vandyck *et al.*, 2016).



OCDE: PAÍSES QUE FAZEM PARTE DA ORGANIZAÇÃO PARA COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO; Não-OCDE: PAÍSES QUE NÃO FAZEM PARTE DA OCDE

Figura 1.1 – Consumo mundial de energia em quadrilhões BTU, 1990-2040
(Fonte: U.S. Energy Information Administration – EIA, 2016).

Conforme Figura 1.2, embora as previsões apontem para um aumento significativo na utilização de energias renováveis, estima-se que a utilização de combustíveis fósseis representará 78% do total de energia consumida no mundo em 2040. Entre os combustíveis fósseis, os derivados de petróleo, continuarão a ser a maior fonte de energia mundial, principalmente em função da sua utilização nos setores industriais e de transporte (U.S. Energy Information Administration - EIA, 2016). Com relação ao Brasil, o petróleo e seus derivados representam a maior fonte de consumo e de oferta interna de energia do país. Em 2015, a utilização do petróleo e seus derivados correspondeu a 37,3% do total de energia disponibilizada no país (Empresa de Pesquisa Energética - EPE, 2016).

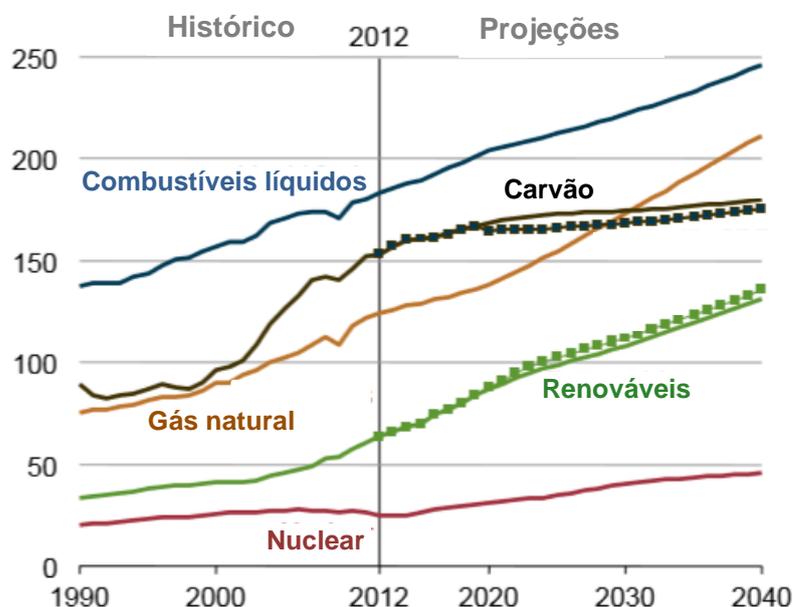


Figura 1.2 – Consumo mundial de energia por fonte em quadrilhões BTU, 1990-2040 (Fonte: U.S. Energy Information Administration – EIA, 2016).

Por outro lado, a indústria petrolífera vem enfrentando uma nova realidade em função da redução do preço do petróleo, ocasionando um desequilíbrio na economia e geopolítica internacional. Essa crise atingiu todas as grandes empresas do setor, reduzindo seus investimentos devido à diminuição dos lucros. No Brasil, a redução dos preços do petróleo associada à atual crise político-econômica tem ocasionado uma desaceleração das atividades no setor petrolífero. Devido à importância desse setor na economia do país, essa desaceleração ocasionou a redução de renda e empregos, assim como a diminuição na arrecadação de

royalties, que afeta diretamente a receita dos estados e municípios, agravando ainda mais a crise econômica nacional.

Nesse contexto, é importante o estudo de técnicas que auxiliem na redução do consumo de energia nas indústrias. Em uma planta industrial, o processo de destilação consome 40-70% dos custos operacionais e investimentos de capital. A baixa eficiência das torres de destilação convencionais e o aquecimento global têm impulsionado empresas e governos para encontrar tecnologias alternativas que demandem menos energia. Com esse propósito, pesquisadores têm se concentrado em descobrir tecnologias eficazes em termos termodinâmicos e econômicos (Shahandeh *et al.*, 2014).

A destilação é provavelmente o processo mais estudado em termos de otimização e controle (Taqvi *et al.*, 2016). Uma pequena melhoria operacional muitas vezes significa um enorme benefício econômico. Portanto, a otimização energética de uma torre de destilação ocasiona ganhos significativos e fundamentais para garantir a lucratividade das operações de refino, principalmente no atual contexto da indústria petrolífera (Yao & Chu, 2012).

Nos últimos anos, o projeto e a otimização de instalações de petróleo bruto têm recebido um interesse considerável da pesquisa. Além disso, ocorreu um aumento significativo na aplicação de técnicas computacionais para análise de processos existentes e futuros. Modelos rigorosos, simplificados e estatísticos/empíricos têm sido empregados para simular torres de destilação complexas. Esses modelos podem ser incorporados em um esquema de otimização para determinar a melhor configuração para se alcançar uma determinada função objetivo (Ochoa-Estopier *et al.*, 2013; Taqvi *et al.*, 2016).

A simulação de torres de destilação, utilizando simuladores comerciais, permite reproduzir o comportamento desse processo em um curto período de tempo. Os simuladores possibilitam a resolução de equações complexas, utilizando rotinas e métodos internos. A simulação de processos em conjunto com métodos estatísticos pode ser utilizada na otimização de torres de destilação de petróleo. Os resultados obtidos são confiáveis e podem direcionar a escolha de condições operacionais ótimas para o processo ou aperfeiçoar projetos futuros (Enríquez *et al.*, 2014; Long & Lee, 2012).

O planejamento fatorial e a metodologia de superfície de resposta são métodos baseados em princípios estatísticos que têm se mostrado como uma importante ferramenta no estudo de torres de destilação. Esses métodos possibilitam a otimização de processos complexos através

do desenvolvimento e análise de um modelo matemático. Esse modelo é desenvolvido a partir de um número mínimo de ensaios ou simulações e sua validação pode ser realizada através da análise de variância (ANOVA), do método de regressão linear e do Diagrama de Pareto (Barros Neto *et al.*, 2002; Ferreira, 2015; Montgomery & Runger, 2003).

Esses métodos estatísticos têm sido aplicados com sucesso em pesquisas relacionadas as torres de destilação extrativa de etanol (Batista *et al.*, 1998), torres de destilação de paredes divididas para fracionamento de derivados de petróleo (Long & Lee, 2012; Sangal *et al.*, 2012) e destilação molecular de resíduo de petróleo (Liñan *et al.*, 2012). Além de também se destacarem nas áreas como biotecnologia, nanotecnologia e alimentos (Madani *et al.*, 2015).

Diante de tais considerações, a realização de trabalhos que impulsione o desenvolvimento e utilização de técnicas de otimização na indústria de petróleo é extremamente importante para viabilizar economicamente a operação das unidades existentes e atender à crescente demanda energética, assim como as regulamentações ambientais exigidas.

O presente trabalho tem como propósito otimizar, em termos de melhoria da eficiência energética, uma torre de destilação atmosférica de petróleo existente. Essa torre está atualmente instalada em uma refinaria no Nordeste do Brasil e esse trabalho foi desenvolvido através de uma parceria entre as Universidades Federais do Rio Grande do Norte (UFRN) e Bahia (UFBA). Para tal, serão aplicados métodos estatísticos associados com simulação de processo com o objetivo de determinar as condições operacionais ótimas da torre. Nesse sentido, a realização desse trabalho poderá reduzir o consumo de energia da planta, contribuindo para a melhoria do atual cenário da indústria de petróleo. Além disso, a utilização de uma abordagem científica em um processo real, fortalecerá o vínculo entre a academia e a indústria. Essa proximidade favorece a implantação de novas linhas de pesquisas aplicadas, trazendo benefícios socioeconômicos e técnico-científicos.

Esse trabalho apresenta-se disposto da seguinte forma: no capítulo 2 apresenta-se a revisão bibliográfica com conceitos e estudos relevantes na área de destilação atmosférica de petróleo, modelagem, simulação e otimização de processos; no capítulo 3 descreve-se a metodologia utilizada para o desenvolvimento desse estudo; no capítulo 4 expõe-se os resultados obtidos e a análise dos mesmos; e por fim, no capítulo 5 encontram-se as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

1.2 - Objetivos

1.2.1 - Objetivo geral

Determinar as condições operacionais ótimas, em termos de eficiência energética, de uma torre de destilação atmosférica de petróleo, localizada em uma das maiores refinarias de petróleo do Brasil.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Simular uma torre de destilação atmosférica de petróleo utilizando simulador comercial e validar os resultados obtidos com os dados da planta;
- Determinar as variáveis operacionais a serem manipuladas, considerando o sistema de controle instalado e a influência dessas variáveis no funcionamento dos demais equipamentos da unidade;
- Analisar a influência das variáveis selecionadas no consumo de energia elétrica do condensador de topo da torre de destilação e na especificação dos produtos;
- Obter e validar o modelo matemático que represente a influência das variáveis operacionais selecionadas no consumo de energia elétrica do condensador de topo da torre de destilação;
- Determinar as condições operacionais ótimas, em termos de redução do consumo de energia elétrica do condensador de topo da torre de destilação, utilizando simulação e métodos estatísticos.



Capítulo 2

Revisão Bibliográfica



Capítulo 2 - Revisão Bibliográfica

2.1 - Destilação atmosférica de petróleo

A destilação é um processo físico de separação baseado na diferença dos pontos de ebulição dos componentes. A separação dos componentes ocorre de acordo com suas volatilidades relativas, que indicam o grau de facilidade de vaporização entre dois componentes. Se a volatilidade relativa é alta, um componente tem uma tendência muito maior para vaporizar que o outro e eles poderão ser separados mais facilmente através do processo de destilação. Dessa forma, em todo o processo de destilação a fase vapor possuirá uma maior concentração do componente mais volátil que a fase líquida, após o contato entre as duas fases (Kister, 1992; Speight, 2007).

A destilação em geral representa o método mais eficiente e econômico de separação de misturas líquidas. Do ponto de vista cinético, a transferência de massa por unidade de volume em uma destilação é limitada somente pelas resistências difusionais em cada lado da interface líquido-vapor nas fases turbulentas, sem a presença de substâncias inertes. Em quase todos os processos de separação, existem a presença de solventes inertes ou matrizes sólidas, que diminuem o fluxo de massa. A destilação, portanto, tem um potencial para elevadas taxas de transferência de massa. Do ponto de vista termodinâmico, conceitualmente, o processo de destilação pode ser desenvolvido para demandar somente o trabalho mínimo de separação (Kister, 1992).

O petróleo bruto é uma mistura de hidrocarbonetos, geralmente no estado líquido, que também pode possuir compostos de nitrogênio, oxigênio, enxofre e traços de compostos metálicos (Speight, 2015). Para a conversão de petróleo bruto nos produtos desejados, de forma econômica e ambientalmente viável, são utilizados diversos processos de refino que podem ser divididos em separação, conversão e tratamento. Em alguns processos, como a destilação, os constituintes da corrente de alimentação são separados sem alteração na sua estrutura. Já no craqueamento, onde as moléculas complexas são quebradas em moléculas mais simples, os constituintes sofrem alterações consideráveis (Speight, 2007).

Em uma refinaria de petróleo, a destilação atmosférica é geralmente a primeira etapa do processo de refino, sendo fundamental para a obtenção dos produtos comercializáveis como gás liquefeito de petróleo, nafta petroquímica, gasolina, querosene de aviação e óleo diesel. Cada

refinaria tem o seu próprio esquema de processamento, que é determinado pela disponibilidade dos equipamentos de processo, características do petróleo bruto, custos de operação e demanda de produto. O modelo de fluxo ótimo para cada refinaria é definido por fatores econômicos e não existem duas refinarias idênticas em suas operações (Gary & Handwerk, 2001)

Em uma unidade de destilação convencional de três estágios, o petróleo bruto inicialmente passa através de uma rede de trocadores de calor. Essa rede utiliza o calor das correntes laterais de alta temperatura das torres de destilação. Em seguida, o petróleo bruto pré-aquecido segue para um processo de dessalgação, para a remoção dos traços de água e sal. O petróleo bruto dessalgado é encaminhado para uma outra rede de trocadores de calor, onde é pré-aquecido até cerca de 280 °C. Após a segunda rede de trocadores de calor, o petróleo é encaminhado para uma torre pré-flash ou pré-fracionadora. Nessa torre ocorre a separação das frações leves do petróleo, que possuem temperaturas de ebulição relativamente baixas e não precisam de mais aquecimento para serem separadas. O produto de fundo da torre pré-fracionadora é encaminhado para um forno para ser aquecido até cerca de 340 – 370 °C, temperaturas mais elevadas são geralmente evitadas devido ao craqueamento térmico e a formação de coque sob pressão atmosférica. Após atingir a temperatura especificada, o petróleo é então enviado para a torre de destilação atmosférica que opera na pressão atmosférica ou um pouco acima dessa. Nessa etapa são obtidas as frações relativas à nafta, ao querosene, ao diesel e ao resíduo atmosférico. Para maior aproveitamento do petróleo, o resíduo atmosférico da torre de destilação atmosférica é encaminhado para um forno e em seguida para uma torre de destilação a vácuo, onde ocorre a separação das frações mais pesadas (Gary & Handwerk, 2001; Gu *et al.*, 2015; Ochoa-Estopier & Jobson, 2015; Speight, 2007).

As correntes laterais da torre de destilação são encaminhadas para torres de retificação para a separação das frações mais leves, que retornam para a torre de destilação. Os produtos de fundo dessas torres de retificação são encaminhados para processamento em plantas a jusante, como por exemplo plantas de tratamento, craqueamento e dessulfurização. Em alguns casos, as correntes laterais de diferentes torres de destilação são encaminhadas para unidades de mistura para a formação de produtos de maior valor comercial ou para formação de produtos especificados para a entrada nas plantas a jusante (Gu *et al.*, 2015; Ibrahim *et al.*, 2017).

A Figura 2.1 apresenta o processo de uma unidade de destilação de petróleo bruto de três estágios.

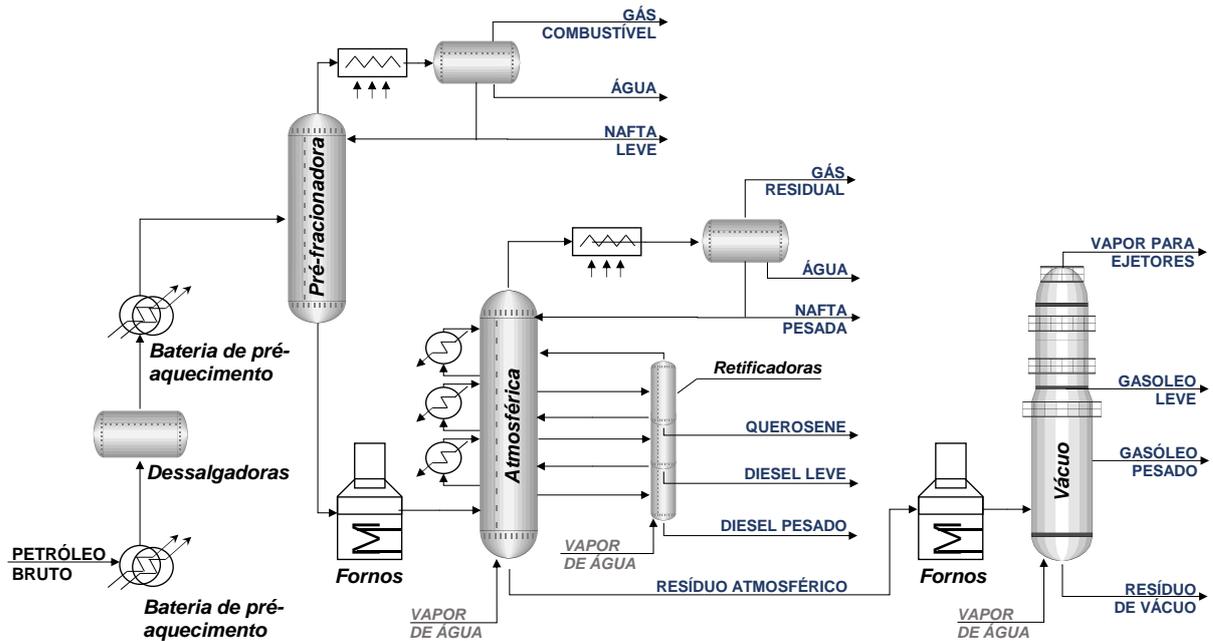


Figura 2.1 – Processo de unidade de destilação de petróleo bruto de três estágios.

2.1.1 - Torres de destilação atmosférica

Uma torre de destilação atmosférica funciona de acordo com os princípios da destilação fracionada, com a separação das frações ao longo da torre em função das diferenças de volatilidade dos componentes. A torre é constituída por diversos estágios de equilíbrio termodinâmico. Em cada estágio, o vapor formado é mais rico em componentes mais voláteis e o líquido em componentes menos voláteis. Dessa forma, após os sucessivos estágios, é possível se obter produtos com elevado grau de pureza e com a composição desejada (Speight, 2007).

A eficiência de uma torre de destilação pode ser avaliada a partir do seu número de bandejas ou pratos teóricos. Um prato teórico é uma seção hipotética da torre na qual o vapor e o líquido efluentes estão em equilíbrio. Em geral, quanto maior o número de pratos, maior a altura da torre e maior a sua eficiência. Ou seja, uma torre com elevado número de pratos possibilita a obtenção de produtos com elevado grau de pureza. Na prática, a condição de equilíbrio dificilmente é alcançada e o desempenho de um prato real é influenciado pelas suas características físicas e pelas propriedades e vazões das fases (Speight, 2007).

Uma torre de destilação pode ser dividida em duas seções, a de retificação e a de esgotamento. Essas duas seções são divididas pela zona de flash ou ponto de introdução da

carga. A seção de retificação corresponde a seção superior da torre, onde são concentradas as frações mais voláteis através do contato entre o vapor que sobe na torre com o refluxo interno de líquido. A seção de esgotamento corresponde a seção inferior da torre, onde são concentradas as frações menos voláteis da carga através da remoção dos componentes mais leves da corrente líquida que desce pela zona de flash (Kister, 1992).

Além dessas seções, uma torre de destilação convencional também possui um condensador de topo, um vaso de refluxo e um refeedor. O condensador de topo tem como objetivo condensar total ou parcialmente o vapor efluente do topo da torre. Esse condensado, com ou sem vapor, é encaminhado para o vaso de refluxo, onde ocorre a separação das fases. Em seguida, uma parte do líquido efluente desse vaso retorna para a torre através de bombeio e a outra constitui o destilado. O refeedor tem por objetivo vaporizar parcialmente o líquido efluente do fundo da torre, visando uma maior produção de vapor para aquecimento da mesma. Algumas torres de destilação atmosférica também utilizam a injeção de vapor d'água para reduzir a temperatura de ebulição dos componentes mais voláteis (Ibrahim *et al.*, 2017; Speight, 2007).

O refluxo interno de líquido na torre é obtido através da condensação da corrente de topo, que retorna parcialmente para a torre através de bombeio. No entanto, a retirada lateral dos produtos reduz o refluxo interno, ocasionando perdas na transferência de massa e sobrecarregando o sistema de refluxo de topo. Dessa forma, para garantir o refluxo abaixo dos pontos de retirada dos produtos, são utilizadas as correntes de refluxo circulante. Essas correntes são retiradas lateralmente da torre, fornecem calor para correntes de petróleo bruto ou outras unidades e retornam numa temperatura inferior à saída. No interior da torre, essas correntes resfriadas entram em contato com a corrente de vapor, ocasionando a condensação e garantindo o refluxo interno de líquido (Gary & Handwerk, 2001).

2.1.2 - Produtos da destilação atmosférica

Os principais componentes do petróleo bruto são o carbono e o hidrogênio, em menores quantidades estão presentes o enxofre (0,1 a 8% em massa), o nitrogênio (0,1 a 1% em massa), o oxigênio (0,1 a 3% em massa) e traços de componentes como vanádio, níquel, ferro e cobre, presentes na mistura em ordem de concentração de parte por milhão. A composição e as propriedades do petróleo bruto variam em função do campo de produção e da profundidade do

poço. No entanto, também podem ser encontradas variações no petróleo bruto proveniente de um mesmo poço. Devido à essa diversidade de tipos de petróleo, é necessário o conhecimento de suas propriedades para a obtenção de produtos especificados, bem como dos métodos mais adequados de conversão (Perry & Green, 1997; Speight, 2015).

Através da destilação, é possível a obtenção de produtos gasosos no topo da torre, produtos não voláteis no fundo e outros produtos líquidos nas correntes intermediárias. Os principais produtos formados em uma unidade de destilação atmosférica convencional são: gás combustível, gás liquefeito de petróleo (GLP), nafta, querosene, gasóleos atmosféricos e resíduo atmosférico (Ibrahim *et al.*, 2017; Speight, 2007).

O gás combustível é o produto mais leve obtido na destilação e é formado principalmente pelos gases metano e etano e em menores quantidades, propano e butano. Também são encontrados traços de gás sulfídrico em alguns gases. O GLP é uma mistura gasosa formada basicamente por propano e butano, retirada pelo topo das torres pré-fracionadoras. Em unidades de destilação que não possuem essas torres, esse gás é obtido juntamente com a nafta leve nas torres de destilação atmosférica (Gary & Handwerk, 2001).

A nafta é um produto do petróleo com uma faixa de destilação geralmente entre 30 °C e 200 °C, sendo um produto precursor da gasolina devido à sua faixa de ebulição e ao número de carbonos. Em função da configuração da unidade de destilação, podem ser produzidos um ou dois tipos de nafta: (1) uma única nafta com ponto final de ebulição de 205 °C e obtida através da destilação direta ou (2) essa mesma fração dividida em mais dois cortes, nafta leve e nafta pesada. A nafta pode ser utilizada em diversas aplicações, desde a produção de solventes até a preparação de óleos comestíveis. As características que determinam a utilização da nafta para uma determinada aplicação são volatilidade, poder de dissolução, pureza e odor (Speight, 2015).

O querosene é a fração de petróleo que apresenta uma faixa de destilação entre a nafta e o diesel, com valores geralmente entre 150 °C e 300 °C. Essa fração de petróleo possui um baixo ponto de fulgor e pode ser utilizado como óleo de iluminação. Em alguns casos, essa fração também pode ser utilizada para a produção de querosene de aviação. No entanto, a quantidade e a qualidade do querosene produzido e, conseqüentemente sua aplicação, dependem do tipo de petróleo bruto utilizado. Muitas vezes a sua produção não é rentável, sendo melhor aproveitada através da mistura com as correntes de gasóleos (Speight, 2007; 2015).

Os gasóleos atmosféricos são os produtos da destilação atmosférica com uma faixa de destilação geralmente entre 180 °C e 380 °C. Podem ser classificados de diversas maneiras e sua maior utilização é como combustível de motores a diesel. O diesel possui uma faixa de destilação de aproximadamente 182 °C a 316 °C e devido à elevada demanda desse produto, parte da sua composição tem sido obtida também através dos processos de craqueamento (Gary & Handwerk, 2001; Speight, 2007).

O resíduo atmosférico, também chamado de RAT, é o produto de fundo das torres de destilação atmosféricas e a carga das torres de destilação a vácuo. Quando comparado aos demais produtos obtidos na torre, o RAT é mais complexo em termos de composição e impurezas (Gary & Handwerk, 2001; Speight, 2007).

Em função da complexidade da composição dos produtos do petróleo, não é viável a determinação da sua composição em termos de componentes puros através de análises elementares. A caracterização é geralmente realizada através das curvas de destilação em conjunto com outras propriedades, como por exemplo a densidade. A caracterização dos produtos é necessária para sua especificação, pois para cada fração de petróleo ser classificada como um determinado produto é necessário que as curvas de destilação e as propriedades estejam dentro das faixas de especificação desse produto. A especificação dos produtos do petróleo é extremamente difícil de ser obtida somente através do processo de destilação. Por isso, o objetivo da destilação é fornecer as frações de petróleo, com suas respectivas faixas de destilação, como carga para os demais processos de refino e tratamento, onde é alcançada a especificação final dos produtos (Speight, 2007).

2.1.3 - Principais variáveis operacionais

Uma torre de destilação atmosférica deve processar a carga visando à obtenção dos produtos especificados, mesmo quando ocorrem variações em termos de vazão e composição. Os principais objetivos do controle de uma torre de destilação são: (a) obter os produtos especificados; (b) otimizar a operação da torre de destilação através da maximização do rendimento dos produtos e minimização dos custos operacionais. A torre também deve operar de forma segura, para evitar acidentes que possam causar danos humanos e ao meio ambiente (Campbell, 1992).

Existem diversas variáveis operacionais que são controladas e acompanhadas em uma torre de destilação atmosférica, como por exemplo: (1) Temperatura de carga; (2) Pressão de topo; (3) Temperatura de topo; (4) Vazão de refluxos circulantes; (5) Vazão das retiradas laterais; (6) Vazão do vapor de retificação.

- (1) Temperatura de carga: tem a finalidade de definir o grau de aquecimento da carga e, conseqüentemente o percentual de vaporização necessário para a destilação. Dessa forma, a carga da torre será constituída de duas correntes, uma na fase vapor e outra na fase líquida. A primeira sobe pela torre e é constituída pelas frações mais leves do petróleo. A segunda desce para o fundo da torre e é composta por frações mais pesadas do petróleo. Além disso, o percentual de vaporização da carga é uma variável importante no controle da cor do diesel.
- (2) Pressão de topo: é frequentemente mantida constante para que a operação da torre de destilação se mantenha estável. A operação, a pressão constante, apresenta benefícios como a minimização da necessidade de compensação para controle de temperatura e prevenção de inundação e gotejamento (Mauricio-Iglesias *et al.*, 2014).
- (3) Temperatura de topo: é geralmente a única temperatura controlada diretamente na torre. Essa temperatura é ajustada através da vazão de refluxo de topo, ou seja, se a temperatura de topo subir para um valor acima do especificado, a vazão de refluxo será aumentada para que o refluxo reduza a temperatura na torre. Como as faixas de destilação dos produtos estão relacionadas as temperaturas nos pratos de retirada, a temperatura de topo pode influenciar diretamente na composição dos produtos (Kister, 1992).
- (4) Vazão de refluxos circulantes: tem por finalidade reduzir a temperatura ao longo da torre e diminuir a vazão de refluxo de topo. O refluxo circulante remove calor da torre através da retirada de parte dos produtos, que após trocarem calor com outras correntes da unidade, retornam para a torre em uma temperatura inferior (Gary & Handwerk, 2001).
- (5) Vazão das retiradas laterais: determina, além do volume de produto retirado da torre, a composição e conseqüentemente as propriedades desses produtos. Ou seja, a alteração da vazão de retirada de um determinado produto ocasiona a modificação da sua faixa de destilação e também de outras propriedades como densidade e ponto de fulgor (Campbell, 1992).

- (6) **Vazão de vapor de retificação:** é injetado na torre para reduzir a pressão parcial dos vapores de hidrocarbonetos, auxiliando na vaporização dos componentes mais leves dos produtos laterais e de fundo da torre. Dessa forma, a injeção do vapor auxilia na especificação do ponto inicial de ebulição e conseqüentemente do ponto de fulgor dos produtos.

2.2 - Modelagem e simulação de processos

A simulação de processos consiste na reprodução do comportamento de processos reais através da utilização de simuladores, que são ferramentas computacionais capazes de resolver problemas complexos em um curto período de tempo. A simulação possibilita a obtenção de previsões sobre o comportamento dos processos, como por exemplo o consumo esperado de uma determinada matéria-prima ou a temperatura necessária para se obter um determinado rendimento. O conhecimento prévio dessas informações pode auxiliar nas tomadas de decisão relativas aos aspectos físicos e econômicos das plantas industriais, reduzindo os custos operacionais e de instalação. Dessa forma, a simulação é extremamente importante tanto para o dimensionamento de novos equipamentos, quanto para a otimização e o acompanhamento operacional de instalações existentes.

Nas duas últimas décadas, a simulação tem sido amplamente utilizada em processos químicos contínuos e em batelada. Nesse período, ocorreu um aumento significativo na utilização de ferramentas computacionais, como os simuladores, que têm sido usadas pelos engenheiros para aprofundar análises dos processos existentes e futuros (Taqvi *et al.*, 2016). Os simuladores de processo podem ser classificados como modular ou orientado por equações. Nos simuladores modulares, o cálculo dos equipamentos é realizado de forma sequencial, ou seja, a corrente de saída calculada de um equipamento é usada como a corrente de entrada do seguinte. Já nos simuladores orientados por equações, as equações dos processos são resolvidas simultaneamente. Os simuladores comerciais Aspen HYSYS, Petro-SIM e PROII são exemplos de simuladores modulares (Biegler *et al.*, 1999; KBC, 2016).

Os modelos das simulações de processo podem ser classificados como de estado estacionário ou dinâmico. No modelo de estado estacionário as variáveis são independentes do tempo e no modelo dinâmico as variáveis são dependentes do tempo. Todos os processos reais

são dinâmicos, mas quando as alterações das variáveis são pequenas em relação ao tempo, pode-se utilizar o modelo estacionário (Perry & Green, 1997).

A destilação é uma das mais detalhadas unidades dentro de um simulador de processo. Uma torre de destilação pode ser modelada como um conjunto de unidades flash, onde cada prato representa um estágio de equilíbrio. Para que esses estágios sejam corretamente representados e, conseqüentemente sejam obtidos resultados precisos, é necessária a escolha do pacote termodinâmico mais adequado para o processo. Essa escolha influencia significativamente os resultados e os fatores mais importantes a serem considerados nessa etapa são: a composição da mistura; a pressão e a temperatura de operação; a disponibilidade dos parâmetros de interação (Biegler *et al.*, 1999; Perry & Green, 1997).

2.3 - Otimização de processos

Otimizar significa tornar ótimo ou buscar o ótimo. Logo, a otimização de processos é um conjunto de métodos que tem por objetivo identificar a melhor solução, para um determinado problema de processo, entre um conjunto de alternativas sem necessariamente avaliar explicitamente todas as possíveis alternativas. O processo de otimização é de extrema importância para a engenharia, uma vez que a função clássica do engenheiro é projetar o novo, de forma mais eficiente e com custos menores, bem como elaborar procedimentos para melhorar o funcionamento de unidades existentes (Perlingeiro, 2005; Handogo, 2012).

Os problemas de otimização são dificultados por fatores como descontinuidades na função e nas restrições, não-linearidade da função e das restrições, sensibilidade da função em relação às variáveis de projeto e multimodalidade da função. Em função disso, não existe um método universal de otimização (Perlingeiro, 2005).

Para aplicar os métodos de otimização, é necessário primeiramente definir uma função objetivo, que é a função que se deseja otimizar. Exemplos típicos de funções objetivos para projetos de engenharia são custo operacional, rendimento de produtos e lucro global. Os valores da função objetivo são obtidos através da alteração das variáveis do problema. Essas variáveis podem ser fisicamente representadas pelas dimensões dos equipamentos ou condições operacionais da planta. Também devem ser consideradas as restrições do processo, como por exemplo, a faixa de operação da temperatura de topo de uma torre de destilação ou a

especificação de um determinado produto. Portanto, as variáveis do problema devem ser ajustadas para atender as restrições do problema (Biegler *et al.*, 1999).

Métodos estatísticos são uma excelente ferramenta para auxiliar na concepção de novos produtos, bem como no desenvolvimento e melhoria de processos existentes (Montgomery & Runger, 2003). Como os processos reais são geralmente complexos, a manipulação de todas as variáveis de um problema para atingir um determinado objetivo exige um elevado esforço e tempo, que na maioria das vezes não se dispõe. Em função disso, os processos de otimização são realizados através de técnicas e métodos que sistematizam esse processo, facilitando a determinação do ponto ótimo. Dentre os diversos métodos de otimização, a utilização do planejamento fatorial em conjunto com a análise das superfícies de respostas permite a obtenção de condições otimizadas de um processo através dos fundamentos estatísticos.

2.3.1 - Planejamento fatorial e superfície de resposta

As técnicas de planejamento experimental e análises de experimentos são um conjunto de procedimentos matemáticos e estatísticos utilizados para desenvolver, melhorar e otimizar os processos. Também pode ser utilizado para avaliar a relevância dos efeitos de diversos fatores na resposta de um sistema, mesmo na presença de interação entre eles (Mahdi *et al.*, 2008). De acordo com Montgomery & Runger (2003), o planejamento de experimentos é uma técnica extremamente importante no estudo de processos complexos. No planejamento de experimentos, o engenheiro efetua alterações nas variáveis controladas do sistema ou processo, observa os dados de saída e em seguida determina quais variáveis ou subconjunto de variáveis tem maior influência no desempenho da saída. Para sistemas com elevado número de variáveis e interação entre elas, um método extremamente eficiente é o planejamento de experimentos fatoriais.

A metodologia de planejamento fatorial utiliza a combinação entre os níveis de dois ou mais fatores, possibilitando a determinação das interações entre as variáveis analisadas e o efeito conjunto delas sobre uma resposta. Fundamentada na teoria estatística, essa metodologia minimiza o esforço e o tempo utilizados, pois os resultados são obtidos com um menor número de ensaios capazes de representar toda a região de interesse. Consequentemente, os custos para a realização dos ensaios são reduzidos (Mahdi *et al.*, 2008; Montgomery & Runger, 2003; Rodrigues & Iemma, 2005).

Em um planejamento fatorial, os fatores são as variáveis independentes do sistema e os níveis são os valores fixados pelo pesquisador para esses fatores. Por exemplo, em uma torre de destilação podemos selecionar dois fatores como a temperatura de topo e a vazão de refluxo. Se especificarmos dois valores, um mínimo e um máximo para a temperatura de topo e para a vazão de refluxo, teremos um sistema com 2 níveis para cada um dos 2 fatores (Montgomery & Runger, 2003).

Para um determinado processo, sendo k o número de fatores em estudo e N os respectivos níveis para cada fator, um planejamento fatorial completo pode ser realizado através de N^k ensaios ou medidas. Diferentes tipos de planejamento fatorial têm sido utilizados para determinar o efeito dos fatores na resposta de um determinado processo. O planejamento 2^k é extremamente utilizado, principalmente nas fases iniciais de um processo, pois possibilita a obtenção de informações úteis com um pequeno número de medidas. De acordo com a necessidade, também são utilizados planejamentos diferentes, como 3^k ou 4^k . No entanto, o número de ensaios cresce exponencialmente com o aumento do número de fatores, praticamente inviabilizando a utilização de esquemas completos para 6 ou mais fatores com 2 níveis e para 4 ou mais fatores com 3 níveis (Madani *et al.*, 2015; Rodrigues & Iemma, 2005).

Outra metodologia, que associada ao planejamento fatorial, tem sido aplicada com sucesso para análise dos experimentos e na resolução de problemas de otimização, é a metodologia de superfície de resposta (MSR). Essa metodologia consiste em um conjunto de métodos matemáticos e estatísticos que possibilitam a construção de superfícies de respostas através da elaboração de um modelo matemático. Essas superfícies representam graficamente o comportamento de uma determinada resposta de interesse em função das variáveis de entrada e sua interpretação possibilita a determinação das condições ótimas de um processo (Souza *et al.*, 2016). Dessa forma, o planejamento fatorial reduz o número de ensaios necessários para a obtenção dos dados que são utilizados para a elaboração das superfícies de resposta.

A validação do modelo matemático, utilizado para a elaboração da superfície de resposta, pode ser realizada através de ferramentas estatísticas como ANOVA (análise de variância) ou o método de regressão linear. Na análise de variância, é realizada uma decomposição algébrica dos desvios das respostas observadas em relação à resposta média global. Em seguida, a comparação desses desvios é apresentada em termos quantitativos. Por fim, os resultados são submetidos a testes para calcular os intervalos de confiança. O método de regressão linear consiste na análise da regressão linear obtida pelos dados experimentais e

preditos. Nesse método, considera-se que o modelo está ajustado quando o número 1 estiver dentro do intervalo de confiança do coeficiente angular da reta e o número 0 dentro do intervalo de confiança do coeficiente linear. Além disso, modelos cujo coeficiente de determinação (R^2) for maior ou igual a 0,9, são considerados satisfatórios (Ferreira, 2015).

Outra ferramenta que também pode ser utilizada para validação do modelo é o Diagrama de Pareto, que permite visualizar graficamente tanto a magnitude quanto a importância dos efeitos das variáveis na resposta analisada. Esse diagrama é composto por valores absolutos dos fatores envolvidos e suas interações, qualquer efeito que ultrapasse a linha referente ao nível de confiança de 95% é considerado significativo (Talavera, 2002).

2.3.2 - Otimização de torres de destilação

Os processos da indústria de petróleo possuem um elevado custo de operação e manutenção, como custos relacionados a perda de eficiência de equipamentos e instalações, que ocasionam um aumento no consumo de energia e a redução da capacidade operacional das plantas (Waheed *et al.*, 2014). Dentre os diversos processos de uma refinaria, um dos maiores custos operacionais é no processo de destilação, principalmente devido ao elevado consumo de energia no refeedor, cujo calor é fornecido através de um sistema de utilidades, como vapor ou óleo térmico (Taqui *et al.*, 2016).

Além do refeedor, o processo de destilação de petróleo também apresenta elevados consumos de energia nas seguintes etapas: aquecimento do petróleo bruto até a temperatura de entrada da torre de destilação; produção de vapor para o processo de *stripping*; bombeamento dos produtos e utilidades; reaproveitamento de água para arrefecimento do produto de topo (Gu *et al.*, 2015).

De acordo com Arjmand *et al.* (2011), otimizar torres de destilação através da redução do consumo de energia, seja na fase de concepção de projeto ou no ajuste das condições operacionais, afetam significativamente a eficiência econômica de uma planta. Dessa forma, a otimização de torres de destilação tem se tornado extremamente relevante nos últimos anos, principalmente devido aos elevados custos de energia e das exigências cada vez maiores na qualidade dos produtos derivados de petróleo (Handogo, 2012). Além disso, no contexto relacionado a sustentabilidade dos processos industriais e desenvolvimento de tecnologias limpas, uma redução de energia das torres de destilação pode ser convertida em redução das emissões de CO₂ (Tarighaleslami *et al.*, 2012).

Uma revisão da literatura, na base de dados Scopus (Elsevier), mostrou que nos últimos anos ocorreu um aumento significativo de estudos relacionados a otimização de torres de destilação. A Figura 2.2 apresenta o número de artigos publicados sobre esse tema no período de 2001 a 2016.

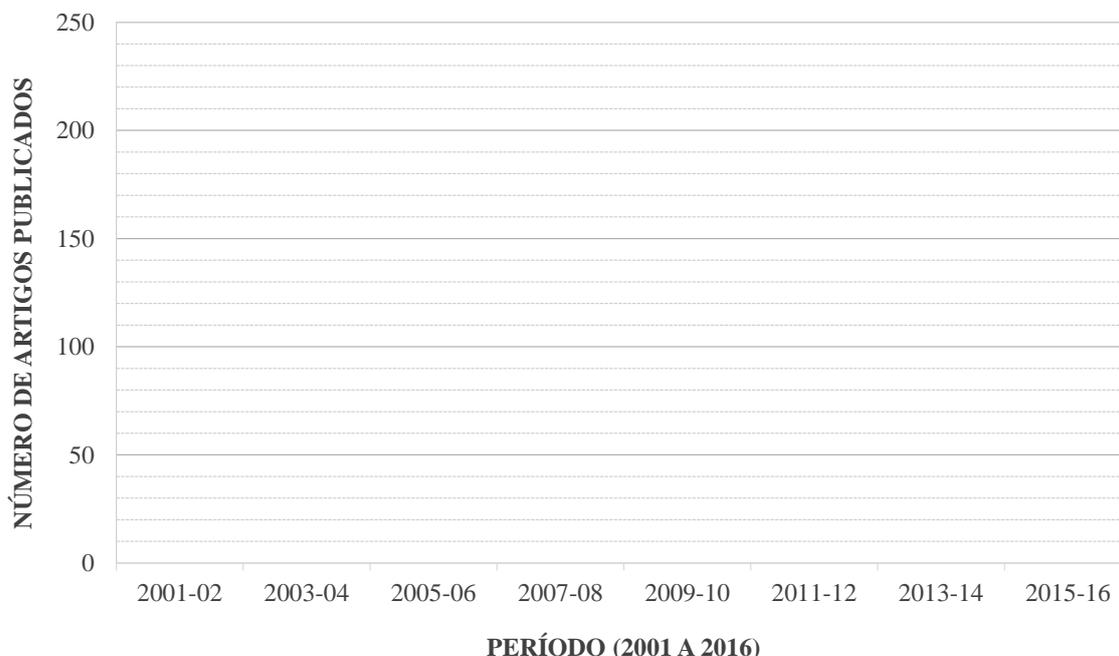


Figura 2.2 – Número de artigos publicados no período de 2001 a 2016 sobre otimização de torres de destilação (Fonte: Scopus/Elsevier, 2017).

A simulação de processos associada à métodos estatísticos tem se mostrado uma importante ferramenta na otimização de processos complexos, como torres de destilação. Os simuladores comerciais de processo possuem algoritmos internos que possibilitam a resolução de equações e modelos de forma rápida e eficiente (Ibrahim *et al.*, 2017). Os métodos estatísticos fornecem resultados confiáveis na predição e otimização de processos e têm sido aplicados com sucesso em diversas áreas da indústria de petróleo (Madani *et al.*, 2015). É importante ressaltar ainda que, de acordo com Arjmand *et al.* (2011), devido à complexidade da composição do petróleo bruto e da diversidade dos produtos gerados, a otimização de torres de destilação de petróleo também deve considerar as experiências práticas e os estudos de caso de cada unidade.

Dentre os diversos métodos estatísticos, o planejamento fatorial e a MSR têm sido amplamente utilizados na otimização de processos (Ferreira, 2015). De acordo com Enríquez *et al.* (2014), esses métodos podem ser utilizados para aumentar a rentabilidade de processos em plantas de fracionamento de hidrocarbonetos, gerando resultados confiáveis que podem auxiliar na tomada de decisão sobre investimentos futuros na planta.

A Tabela 2.1 apresenta alguns trabalhos, em ordem cronológica, de modelagem e otimização utilizando simulação, planejamento fatorial e MSR.

Tabela 2.1 – Trabalhos de modelagem e otimização utilizando simulação, planejamento fatorial e MSR.

Autor	Descrição do trabalho	Método utilizado	Resultados alcançados
Batista <i>et al.</i> (1998)	Otimização do processo de destilação extrativa com vaporização e refluxo secundário	Planejamento fatorial e MSR	Redução de 57,5% no consumo de energia em relação ao processo de destilação extrativa convencional
Talavera (2002)	Otimização de planta de processamento de gás natural	Simulação, planejamento fatorial e MSR	Predição das regiões de operação da planta em que se especificam o gás
Mahdi <i>et al.</i> (2008)	Caracterização e modelagem do processo de dessalgação de petróleo	Planejamento fatorial e MSR	Obtenção de valores ótimos para as eficiências de remoção de sal (93,28%) e de remoção de água (94,80 e 89,57%)
Arjmand <i>et al.</i> (2011)	Otimização energética de unidade de destilação atmosférica de petróleo	Simulação	Redução de 12,6% na carga térmica do condensador de topo
Sangal <i>et al.</i> (2012)	Otimização de coluna de destilação com paredes divididas de benzeno-tolueno-p-xileno e nafta reformada	Simulação e MSR	Redução de 4,86% no consumo de energia total do processo

Liñan <i>et al.</i> (2012)	Modelagem do processo de destilação molecular de RAT	Simulação e planejamento fatorial	Predição da vazão de destilado, bem como a influência da temperatura da destilação na taxa de evaporação.
Long & Lee (2012)	Otimização de colunas de destilação com paredes divididas utilizadas como debutanizadoras e depropanizadoras	Planejamento fatorial e MSR	Redução de 25 a 28% no consumo de energia do refeedor
Enríquez <i>et al.</i> (2014)	Otimização de planta de fracionamento de hidrocarbonetos	Simulação, planejamento fatorial e MSR	Redução de 4,4% no consumo das unidades quentes e 1,8% das unidades frias
Gu <i>et al.</i> (2015)	Otimização energética de processo de destilação de petróleo com 4 estágios	Simulação	Redução de 2,79% no consumo de energia
Ibrahim <i>et al.</i> (2017)	Projeto de unidades de destilação de petróleo utilizando simulação e otimização	Simulação	Melhoria do projeto de unidades de destilação de petróleo, possibilitando tanto a determinação da configuração das unidades, como tanto suas condições operacionais

Portanto, a simulação de processos com planejamento fatorial e MSR constituem uma ferramenta extremamente útil em processos de otimização de torres de destilação, fornecendo resultados confiáveis que podem ser utilizados para melhorar a eficiência energética do sistema e conseqüentemente a sua rentabilidade.

Capítulo 3

Metodología

Capítulo 3 - Metodologia

Para o desenvolvimento desse estudo foram realizadas as seguintes etapas principais: (1) modelagem e simulação (2) otimização. A primeira etapa teve por objetivo representar o comportamento do processo estudado no simulador. A segunda, definir as condições operacionais ótimas, em termos de minimização do consumo de energia elétrica no condensador de topo da torre de destilação.

3.1 - Modelagem e simulação

Essa etapa consistiu na representação do processo de destilação real no simulador comercial, visando à obtenção do modelo validado para a etapa de otimização. A modelagem e a simulação foram desenvolvidas usando o simulador comercial Petro-SIM[®] (versão 6.1) da *KBC Advanced Technologies*, que utiliza modelos de processo aprovados para modelagem rigorosa de refinarias de petróleo.

Os dados iniciais da unidade foram obtidos através da documentação técnica, como fluxogramas de engenharia e processo, folhas de dados e memórias de cálculo. A documentação técnica foi utilizada para compreensão do processo e levantamento de informações estruturais como número de pratos da torre, limite de vazão das bombas e dimensão e capacidade dos trocadores de calor e vaso de topo. Além disso, também foram obtidas informações sobre o sistema de controle e medição da unidade.

Após o levantamento de dados iniciais, foi realizada a escolha do melhor período para representar a unidade no simulador. O período selecionado deve representar um momento de estabilidade operacional, ou seja, em que não ocorrem muitas variações nas condições operacionais. A determinação desse período é de extrema importância para a validação da modelagem desenvolvida, pois somente um período estável possibilita uma correta representação na unidade no simulador, visto que as características dos produtos variam de acordo com as condições operacionais na unidade.

Dessa forma, foi selecionado o período do último teste de corrida realizado na unidade, com duração de 6 horas. O teste de corrida consiste em um teste operacional onde as condições operacionais são mantidas constantes e são realizadas coletas e análises de amostras dos

produtos obtidos durante o teste. Além disso, para a carga da unidade, também é preparado um tanque com elevada concentração do petróleo de maior utilização na refinaria.

A verificação da estabilidade do período do teste de corrida foi realizada através da comparação entre o desvio padrão das variáveis com os valores tidos como padrão da empresa (*Benchmark*). Para que um determinado período seja considerado estável, é necessário que as principais variáveis não apresentem desvios superiores aos valores padrão da empresa. Os valores das variáveis foram obtidos através do programa PI (*Plant Information*), que possui o registro de todos os instrumentos de controle da planta.

As amostras dos produtos coletadas durante o período do teste de corrida foram analisadas no laboratório, para a obtenção das composições, curvas de destilação e propriedades. Nesse estudo, essas análises foram extremamente importantes para a validação do modelo no simulador. O gás de topo foi caracterizado através de cromatografia gasosa. Os produtos laterais foram caracterizados através das curvas de destilação ASTM D86. O resíduo atmosférico (RAT), ao contrário dos demais produtos, não foi caracterizado diretamente por análises de laboratório. Como o RAT é encaminhado para a destilação a vácuo, sua caracterização foi obtida no simulador através da sintetização da carga, realizada a partir das análises dos produtos gerados na destilação a vácuo. A curva utilizada para caracterizar o RAT foi a curva de destilação PEV, devido ao elevado PFE desse produto.

Após a verificação da estabilidade e obtenção de todos os dados, foi realizada a modelagem e o ajuste da unidade no simulador Petro-SIM. O pacote termodinâmico selecionado para esse estudo foi Peng-Robinson em função da sua ampla utilização no setor de petróleo. Para a resolução dos cálculos relacionados a torre de destilação, foi selecionado o método *Distop® Calibration*, método robusto que permite flexibilidade quando comparado a métodos mais rigorosos. Em seguida, foram inseridas as informações obtidas no levantamento de dados e as condições operacionais obtidas no período de estabilidade da unidade. Posteriormente, foram realizadas as simulações, os ajustes e as simplificações necessárias para a representação do processo de destilação no simulador.

Por último, foi realizada a validação do modelo através da comparação entre as curvas de destilação dos produtos, obtidas no laboratório, e os valores simulados, nas mesmas condições operacionais.

A Figura 3.1 apresenta os passos da etapa de modelagem e simulação de processos.

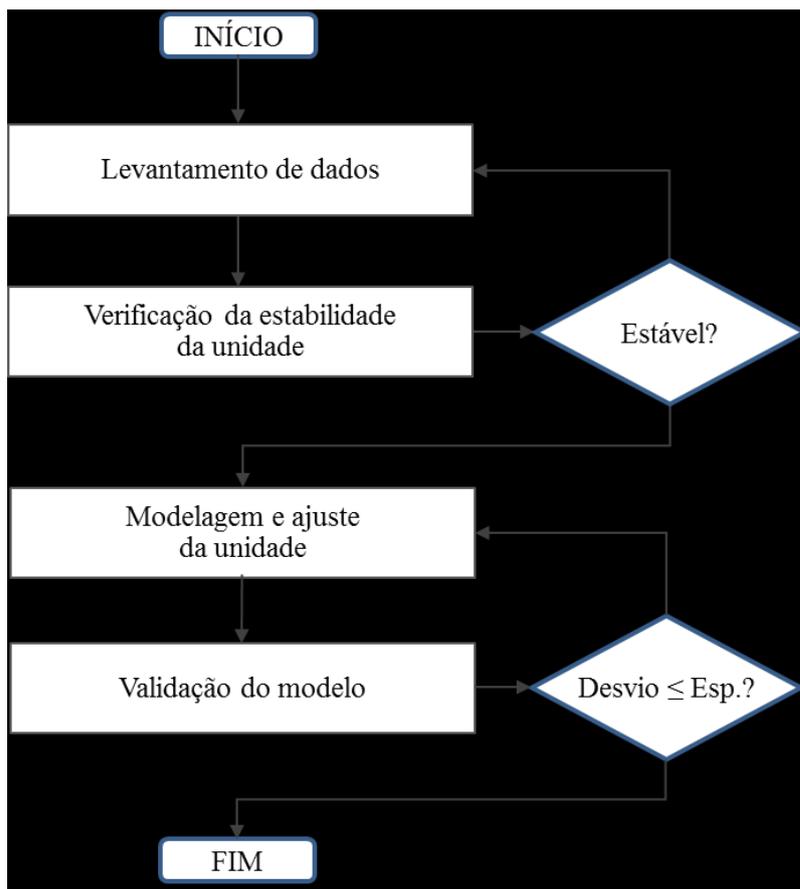


Figura 3.1 – Metodologia: Etapa modelagem e simulação de processos.

3.2 - Otimização

Essa etapa consistiu na identificação das condições operacionais ótimas, que minimizam o consumo energético no condensador de topo, sem alterar a qualidade dos produtos. Dessa forma, a função objetivo desse estudo é a carga térmica (CT) do condensador de topo. A otimização foi realizada usando o simulador Petro-SIM[®] (versão 6.1) da *KBC Advanced Technologies* e do software STATISTICA[®] (versão 7.0) da *StatSoft Inc.*, que utiliza ferramentas para análises estatísticas.

O primeiro passo da etapa de otimização foi a realização da análise de sensibilidade, para identificar como as variáveis manipuladas selecionadas influenciam a CT do condensador de topo e a qualidade dos produtos da torre de destilação. Essa análise foi realizada utilizando o simulador Petro-SIM através do método direto, onde se altera uma variável por vez e observa-se o comportamento sobre uma resposta. Por exemplo, a temperatura de entrada da carga foi variada, mantendo-se todas as demais variáveis constantes, e verificou-se a influência na CT

do condensador de topo. As variáveis manipuladas foram selecionadas a partir da experiência operacional e da análise dos documentos e sistema de controle da unidade.

Após a análise de sensibilidade, foi realizado o planejamento fatorial, que define as simulações que precisam ser realizadas para se identificar a influência cruzada entre as variáveis na função objetivo. Em seguida, com os resultados da simulação e utilizando o *software* STATISTICA, foi obtido o modelo matemático para representar a influência das variáveis na CT do condensador de topo. Visto que o objetivo desse trabalho é reduzir o consumo de energia sem alterar a qualidade dos produtos, também foi realizado o planejamento fatorial para a obtenção do modelo matemático que represente a influência das variáveis na qualidade dos produtos. Para a simplificação dos modelos, foi utilizado o Diagrama de Pareto, que apresenta graficamente a importância das variáveis e suas interações nas respostas. Aquelas consideradas menos significativas foram retiradas do modelo, pois não alteram significativamente as respostas. A validação dos modelos foi realizada através do método de regressão linear e com os modelos validados foram obtidas as superfícies de resposta.

Com o modelo matemático, foi possível determinar as condições operacionais ótimas através da minimização da função objetivo. Ou seja, nessa fase foram determinados os valores ótimos para as variáveis manipuladas que minimizam o consumo de energia do condensador de topo, atendendo os critérios de especificação de produtos e limites operacionais dos equipamentos. Em seguida, foram realizadas as estimativas de redução de consumo de energia na planta e o impacto econômico dessa redução. Essa etapa foi realizada utilizando o *software* Excel[®] (versão 2013) da *Microsoft Corporation*, através do desenvolvimento de uma planilha de cálculo que utiliza o método GRG não linear do suplemento *Solver*.

A Figura 3.2 apresenta os passos da etapa de otimização.

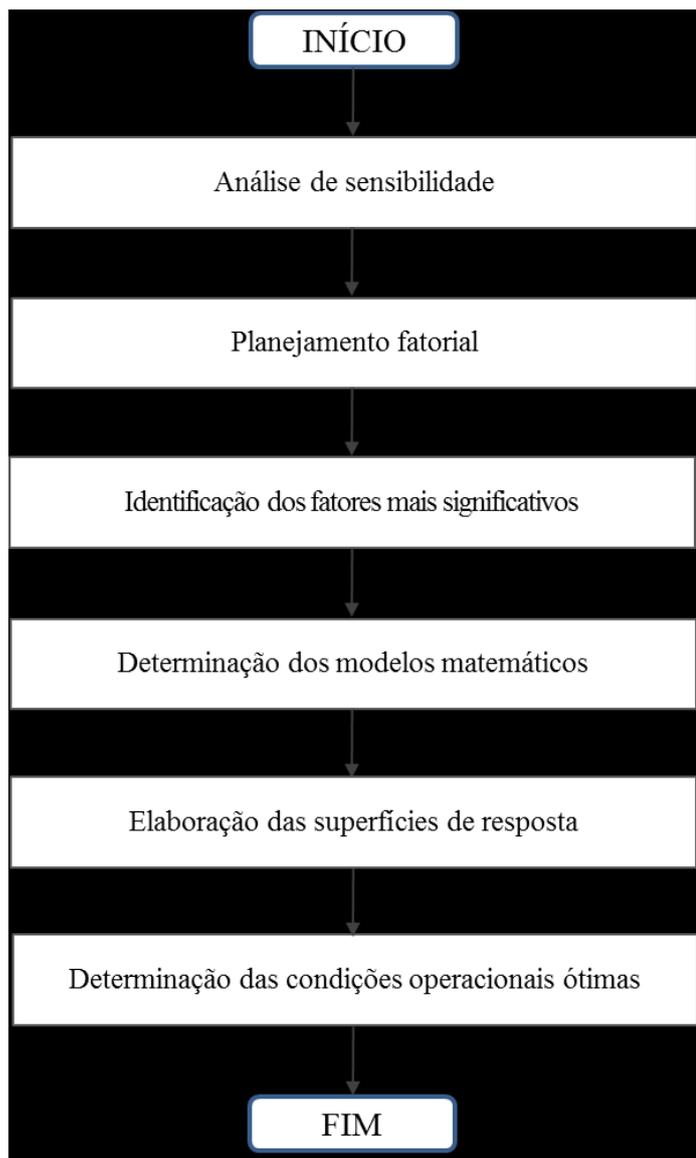


Figura 3.2 – Metodologia: Etapa otimização.

Capítulo 4

Resultados e Discussões

Capítulo 4 - Resultados e Discussões

4.1 - Modelagem e simulação

Com o objetivo de representar o comportamento real do processo de destilação de petróleo no simulador Petro-SIM, foram realizados os seguintes passos na etapa de modelagem e simulação: levantamento de dados, verificação da estabilidade, modelagem e ajustes e validação do modelo.

4.1.1 - Levantamento de dados

Nessa etapa foram obtidas as informações iniciais para a modelagem e simulação do processo estudado nesse trabalho. Essas informações estão representadas na Figura 4.1 e nas Tabelas 4.1 e 4.2. A Figura 4.1 apresenta o fluxograma de processo de destilação atmosférica de petróleo estudado. A Tabela 4.1 apresenta a lista dos equipamentos existentes. A Tabela 4.2 apresenta a lista dos principais instrumentos.

No processo de destilação apresentado na Figura 4.1, o petróleo, após ser aquecido nos fornos até aproximadamente 360 °C, é enviado para a torre de destilação T-01. O petróleo entra parcialmente vaporizado na zona de flash, que opera numa pressão de aproximadamente 0,75 kgf/cm²_g. O líquido proveniente da zona de flash é retificado através do vapor d'água injetado no fundo da torre, cuja vazão é controlada por uma válvula globo e é medida através do FT-013. No fundo da torre, o resíduo atmosférico (RAT) é retirado através das bombas B-09A~C e segue para a unidade de destilação à vácuo. A medição da vazão desse resíduo é realizada através do FT-012.

O vapor proveniente da zona de flash sobe para a seção de fracionamento e em contato com o líquido que desce do topo da torre, são obtidas as frações de querosene iluminante (QI), diesel leve (DL) e diesel pesado (DP). Esses produtos são enviados para as torres de retificação, onde ocorre a remoção dos leves e conseqüentemente a correção do ponto inicial de ebulição e do ponto de fulgor. Essa retificação é realizada com o auxílio de injeção de vapor nas torres T-02A/B/C. O QI é encaminhado para a torre T-02A e em seguida para os permutadores P-09A/B através das bombas B-06A/B. O DL é encaminhado para a torre T-02B e em seguida para os

permutadores P-10A/B através das bombas B-07A/B. O DP é encaminhado para a torre T-02C e em seguida para os permutadores P-11 e P-12A~D através das bombas B-08A/B. O controle de vazão do QI, DL e DP é realizado pelas válvulas de controle e medidores de vazão FV/FT-009, FV/FT-010 e FV/FT-011, respectivamente. Os vapores de hidrocarbonetos provenientes das três torres retificadoras retornam para a torre atmosférica e em conjunto com o vapor d'água saem pelo topo da torre.

O sistema de topo da torre T-01 é constituído por condensadores, um vaso de topo e bombas de água ácida e NP. Os vapores de hidrocarbonetos e o vapor d'água saem pelo topo da torre T-01 numa pressão de aproximadamente 0,40 kgf/cm²_g. Em seguida, são encaminhados para os condensadores primários e secundários P-06A/B e P-07A/B, respectivamente. Nesses condensadores ocorre uma condensação parcial dos vapores e a temperatura de saída é de aproximadamente 50 °C. A mistura formada de gás, hidrocarbonetos condensados e água é encaminhada para separação no vaso de topo trifásico V-01, que opera numa pressão de aproximadamente 0,15 kgf/cm²_g. O gás efluente do vaso segue para um sistema de recuperação de gases ou para tocha. A água ácida é retirada do vaso através das bombas B-04A/B e é encaminhada para o sistema de água ácida saturada. A NP é retirada do vaso através das bombas B-05A/B. Essa NP é parcialmente encaminhada para resfriamento nos permutadores P-08A/B e em seguida é direcionada para unidade de tratamento cáustico ou tancagem. A outra parte dessa nafta constitui o refluxo de topo da torre T-01 e sua vazão é controlada por uma válvula globo em conjunto com o medidor de vazão FV/FT-008.

O refluxo circulante de topo (RCT) também constitui parte do refluxo de topo da torre T-01, complementando a vazão de NP proveniente do vaso V-01. Para garantir refluxo de líquido abaixo dos pontos de retirada dos produtos, são utilizadas as correntes de refluxo circulante intermediário (RCI) e de refluxo circulante de fundo (RCF). Essas correntes saem da torre, fornecem calor para correntes de petróleo bruto ou outras unidades e retornam para a torre numa temperatura inferior à saída. O RCT é encaminhado para os permutadores P-05A~D através da B-03A/B e em seguida retorna para torre na temperatura de 68 °C. O RCI é encaminhado para os permutadores P-03A/B e P-04A~D através da B-02A~C e em seguida retorna na temperatura de aproximadamente 197 °C. O RCF estava fora de operação durante a realização do estudo. O controle de vazão do RCT e RCI é realizado pelas válvulas de controle/medidores de vazão FV/FT-005 e FV/FT-002/003, respectivamente.

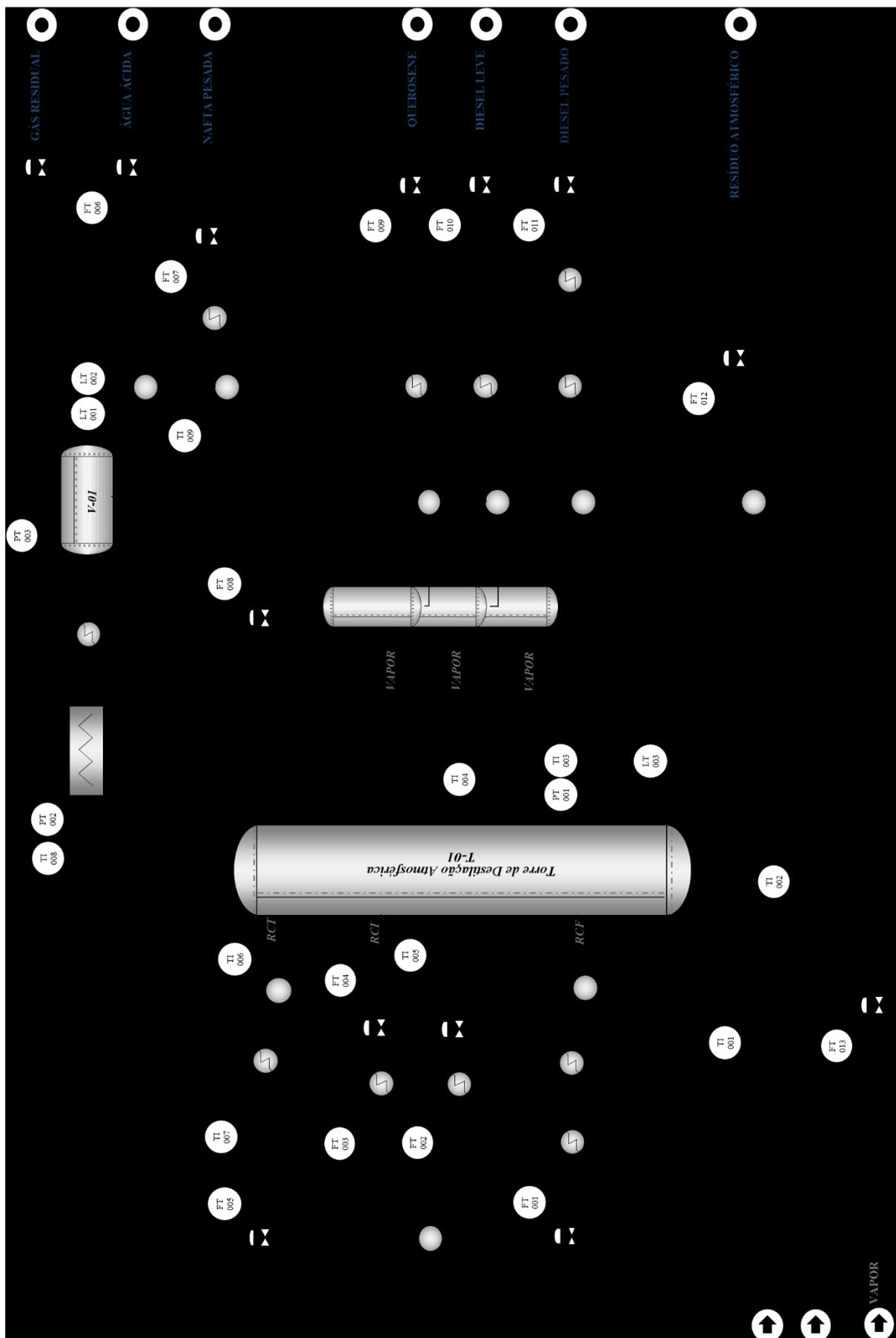


Figura 4.1 – Fluxograma do processo estudado de destilação atmosférica de petróleo.

Tabela 4.1 – Lista de equipamentos.

Equipamento	Descrição
T-01	Torre de destilação atmosférica
T-02A	Torre retificadora de QI
T-02B	Torre retificadora de DL
T-02C	Torre retificadora de DP
V-01	Vaso de topo da torre atmosférica
P-01A/B	Permutador de calor de RCF (fora de operação)
P-02	Permutador de calor de RCF (fora de operação)
P-03A/B	Permutador de calor de RCI
P-04A~D	Permutador de calor de RCI
P-05A~D	Permutador de calor de RCT
P-06A/B	Condensador primário – <i>air cooler</i>
P-07A/B	Condensador secundário – resfriamento com água
P-08A/B	Permutador de calor de NP
P-09A/B	Permutador de calor de QI
P-10A/B	Permutador de calor de DL
P-11	Permutador de calor de DP
P-12A~D	Permutador de calor de DP
B-01A/B	Bomba de RCF (fora de operação)
B-02A~C	Bomba de RCI
B-03A/B	Bomba de RCT
B-04A/B	Bomba de água ácida
B-05A/B	Bomba de NP
B-06A/B	Bomba de QI
B-07A/B	Bomba de DL
B-08A/B	Bomba de DP
B-09A~C	Bomba de RAT

Tabela 4.2 – Lista dos principais instrumentos.

Instrumento	Variável operacional
FT-002/003/004	Vazão de RCI
FT-005	Vazão de RCT
FT-006	Vazão de água ácida
FT-007	Vazão de NP
FT-008	Vazão de refluxo de topo
FT-009	Vazão de QI
FT-010	Vazão de DL
FT-011	Vazão de DP
FT-012	Vazão de RAT
FT-013	Vazão de injeção de vapor da T-01
TI-001/002	Temperatura da carga da T-01
TI-003	Temperatura na zona de <i>flash</i>
TI-004	Temperatura de saída de RCI e do DL
TI-005	Temperatura de retorno de RCI
TI-006	Temperatura de saída de RCT
TI-007	Temperatura de retorno de RCT
TI-008	Temperatura de topo da T-01
TI-009	Temperatura da NP
PT-001	Pressão na zona de <i>flash</i>
PT-002	Pressão de topo da T-01
PT-003	Pressão do vaso V-01
LT-001	Nível de água ácida no V-01
LT-002	Nível de NP no V-01
LT-003	Nível de líquido na T-01

4.1.2 - Verificação da estabilidade da unidade

A verificação da estabilidade da unidade foi realizada através da comparação entre o desvio padrão das principais variáveis operacionais durante o teste de corrida com valores tidos como padrão da empresa (*Benchmark*), abaixo dos quais as variáveis podem ser consideradas estáveis. Esses valores tidos como padrão da empresa (*Benchmark*) são satisfatoriamente baixos

quando comparados com os valores absolutos das variáveis. A Tabela 4.3 apresenta os desvios padrões utilizados para verificar a estabilidade da unidade.

Tabela 4.3 – Verificação da estabilidade da unidade.

Variável	Desvio Padrão	
	BenchMark	Período do teste de corrida
Vazão de alimentação (m ³ /d)	350,0	296,4
Vazão de refluxo de topo (m ³ /d)	150,0	34,8
Vazão de refluxo circulante (m ³ /d)	100,0	91,8
Vazão de vapor (ton/d)	30,00	1,89
Temperatura (°C)	10,0	3,0
Pressão (kgf/cm ²)	0,100	0,042

Conforme apresentado na Tabela 4.3, todas as variáveis analisadas obedeceram ao critério de estabilidade. Portanto, o período selecionado pode ser utilizado para a modelagem da torre de destilação, incluindo as análises laboratoriais dos produtos obtidos nesse período. Essas análises estão apresentadas nas Tabelas A.1 e A.2 (Anexo A).

4.1.3 - Modelagem e ajuste da unidade

A Figura 4.2 apresenta o modelo da unidade elaborado no Petro-SIM e a Figura 4.3 apresenta os dados que foram inseridos no simulador para a modelagem da unidade.

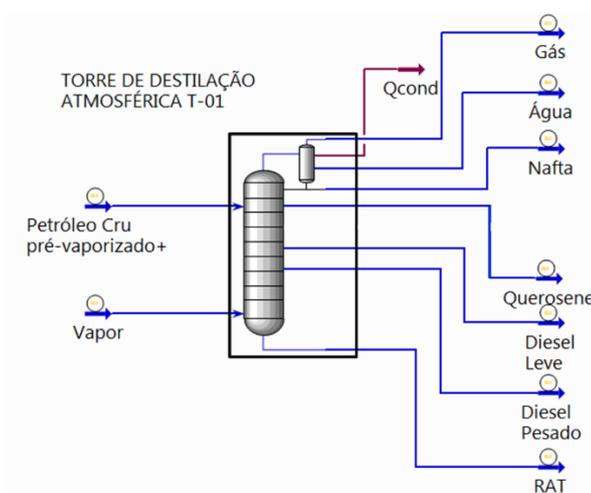


Figura 4.2 – Modelo da unidade elaborado no Petro-SIM.

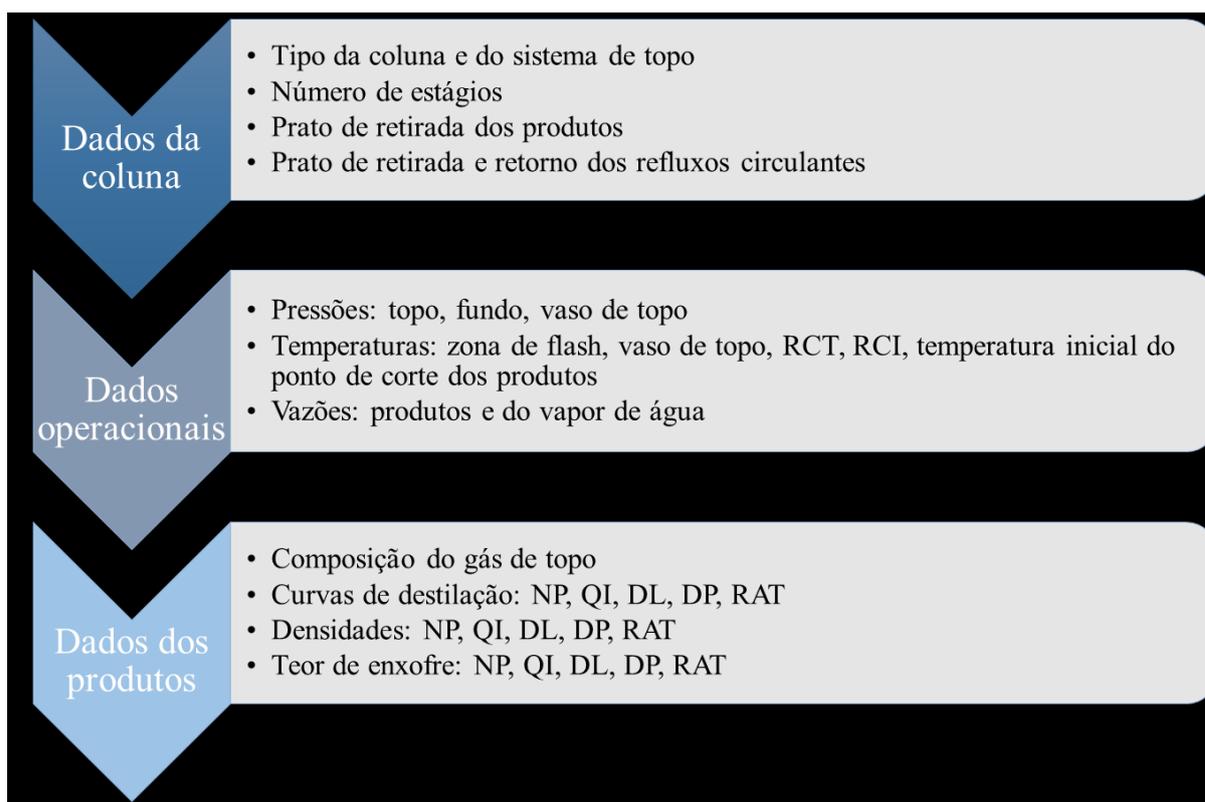


Figura 4.3 – Dados inseridos no Petro-SIM na etapa de modelagem.

Como resultado da modelagem, também foram obtidos os fatores de calibração apresentados na Tabela 4.4. Esses fatores foram calculados pelo método *Distop* e representam o desempenho do fracionamento da torre. Se as curvas de destilação, geradas a partir dos fatores de calibração, coincidirem com as curvas obtidas através das análises de laboratório, as propriedades calculadas pelo modelo também deverão ser iguais aos dados da unidade. Dessa forma, fatores de calibração bem ajustados possibilitam uma boa representação da unidade real no simulador.

Tabela 4.4 – Fatores de calibração.

Fator de calibração	NP	QI	DL	DP	RAT
<i>Front shape factor</i>	1,0000	1,4000	0,8269	1,0180	1,1910
<i>Back shape factor</i>	1,0000	0,7051	0,9464	0,8955	1,0460
<i>Volume interchange</i>	0,0034	1,5684	2,1029	2,7838	4,9145

Os *shape factors* são utilizados para ajustar os pontos iniciais e finais das curvas de destilação dos produtos. Um modelo ajustado deve apresentar *shape factors* entre 0,6 e 1,4. O *front shape factor* ajusta os pontos iniciais da curva de destilação do produto e o *back shape*

factor ajusta os pontos finais da curva de destilação do produto adjacente mais leve. Um aumento no valor do *front shape factor* ocasiona uma redução de componentes leves no referido produto. Um aumento no valor do *back front shape* ocasiona uma redução de componentes pesados do produto adjacente mais leve. Além disso, *shape factors* com valores superiores a 1 tendem a comprimir as extremidades da curva de destilação, enquanto valores inferiores a 1 tendem a expandi-la (KBC, 2017).

O *volume interchange* indica a qualidade do fracionamento e é calculado a partir das curvas de destilação de dois cortes adjacentes. Além disso, esse fator é utilizado no cálculo da eficiência das seções, que possibilita a determinação do formato das curvas de destilação nos pontos entre 10 e 90% (KBC, 2017).

4.1.4 - Validação do modelo

A validação dos fatores de calibração, e conseqüentemente do modelo, foi obtida através da comparação entre as curvas de destilação obtidas através de análises de laboratório e as simuladas. As vazões e densidades dos produtos também foram analisadas, para complementar a análise. A Figura 4.4 apresenta a comparação entre as curvas de destilação dos produtos reais e simuladas. A Tabela 4.5 apresenta os desvios absolutos entre essas curvas.

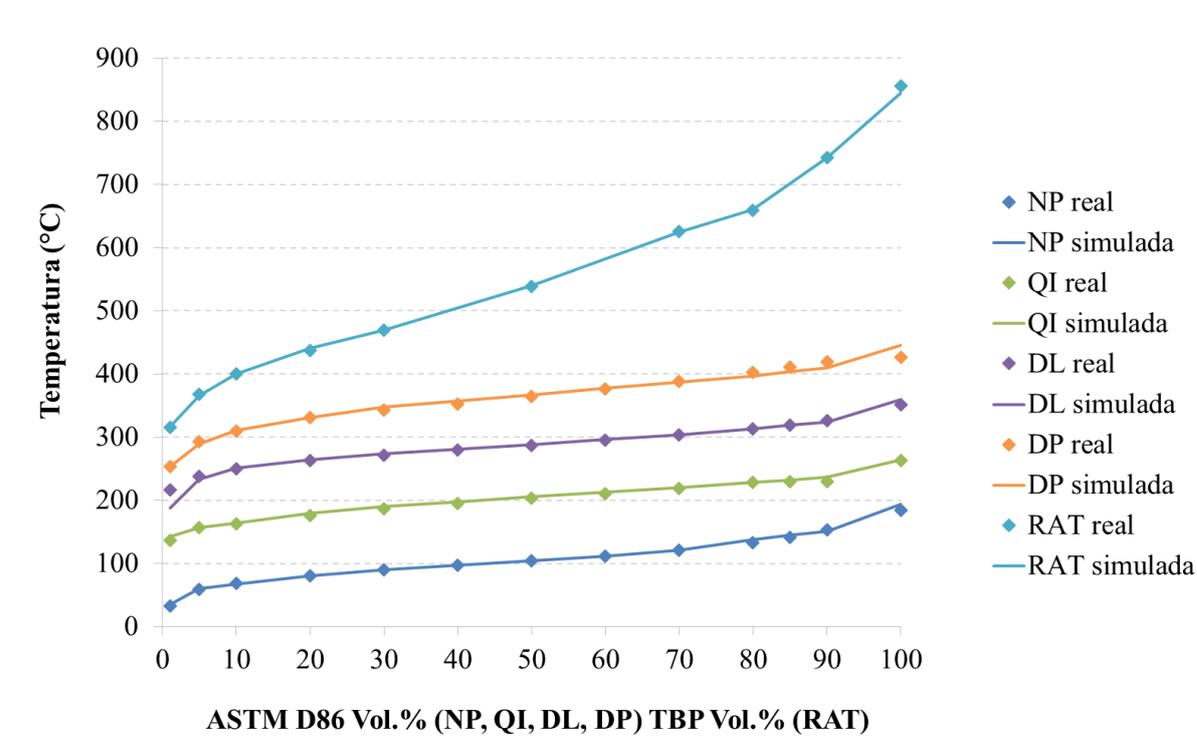


Figura 4.4 – Curvas de destilação dos produtos reais e simuladas.

Tabela 4.5 – Desvios absolutos entre as curvas de destilação reais e simuladas.

Análise	NP	QI	DL	DP	RAT
Tipo de destilação	ASTM D86	ASTM D86	ASTM D86	ASTM D86	PEV
01% Vol. Vaporiz. (°C)	1,9	6,1	28,6	0,2	0,8
05% Vol. Vaporiz. (°C)	1,0	0,6	4,8	3,5	2,3
10% Vol. Vaporiz. (°C)	1,4	0,6	1,4	1,1	0,2
20% Vol. Vaporiz. (°C)	0,1	3,4	1,3	0,0	3,2
30% Vol. Vaporiz. (°C)	0,0	3,7	1,5	4,8	0,1
40% Vol. Vaporiz. (°C)	0,2	2,6	0,2	5,0	-
50% Vol. Vaporiz. (°C)	0,7	2,2	0,8	2,6	0,5
60% Vol. Vaporiz. (°C)	0,7	1,7	1,1	1,3	-
70% Vol. Vaporiz. (°C)	0,5	0,5	0,4	1,7	0,9
80% Vol. Vaporiz. (°C)	5,3	0,9	0,2	5,7	1,3
85% Vol. Vaporiz. (°C)	3,6	3,0	0,3	7,2	-
90% Vol. Vaporiz. (°C)	1,5	7,2	2,5	9,1	0,3
100% Vol. Vaporiz. (°C)	9,2	0,7	8,0	19,3	10,5

Os resultados apresentados na Figura 4.4 e na Tabela 4.5 mostram que as curvas simuladas se ajustam aos valores reais. Os maiores desvios foram observados nos pontos iniciais e finais das curvas, como já era esperado. Esses pontos têm um maior erro associado, independente do tipo de destilação, portanto, não representam pontos confiáveis em uma calibração de modelo (Camões, 2014).

O critério utilizado para validação do modelo foi o desvio absoluto máximo de 10 °C entre os pontos das curvas simuladas e os valores reais, com exceção dos pontos iniciais e finais. Esse critério é utilizado pela empresa que opera a torre e também foi encontrado na literatura. Analisando a Tabela 4.5, é possível perceber que todos os pontos analisados atendem ao critério estabelecido.

As vazões e as densidades dos produtos foram analisadas através dos desvios relativos entre os valores reais e os simulados. A Tabela 4.6 apresenta os desvios relativos encontrados.

Tabela 4.6 – Desvios relativos das vazões e densidades dos produtos.

Produto	Vazão	Densidade
NP	0,099	0,566
QI	0,130	0,544
DL	1,030	0,003
DP	0,466	0,063
RAT	0,253	-

Assim como as curvas de destilação, observa-se que as vazões e densidade também foram modelados de forma satisfatória, com desvios relativos inferiores a 1,1%. A densidade do RAT não foi avaliada em função da ausência dessa análise de laboratório durante o teste de corrida. No entanto, como o RAT não é um produto especificado na destilação atmosférica, a ausência desse dado não influencia esse estudo.

Portanto, baseado nos resultados apresentados, pode-se afirmar que a modelagem e simulação da torre de destilação apresentaram resultados satisfatórios, com desvios dentro dos limites estabelecidos. Dessa forma, a torre de destilação modelada é capaz de representar o comportamento real da torre existente e pode ser utilizada na otimização, visando à redução do consumo de energia do processo.

4.2 - Otimização

A otimização da unidade teve por objetivo determinar as condições operacionais ótimas, visando à minimização do consumo energético no condensador de topo. Os resultados da otimização estão apresentados nas seis etapas abaixo. Inicialmente, é realizada a análise de sensibilidade (4.2.1) com o objetivo de identificar a influência das variáveis manipuladas selecionadas na carga térmica (CT) do condensador de topo e na qualidade dos produtos. Em seguida, o planejamento fatorial (4.2.2) define as simulações que são necessárias para a otimização do processo estudado. Na etapa de identificação dos fatores mais significativos (4.2.3) são determinados os efeitos mais importantes na CT do condensador de topo e na qualidade dos produtos. Posteriormente, o modelo matemático foi determinado (4.2.4) e as superfícies de resposta foram elaboradas (4.2.5), possibilitando a obtenção de uma equação

final que represente a função objetivo. Por fim, a otimização foi realizada através da determinação das condições operacionais ótimas (4.2.6).

4.2.1 - Análise de sensibilidade

Para a realização da análise de sensibilidade, inicialmente, foram selecionadas as variáveis que seriam manipuladas nesse estudo. Essa seleção foi realizada em conjunto com a empresa que opera a torre, uma vez que diversas variáveis da unidade possuem limitações, em função da influência no restante das unidades de processo da refinaria. Como exemplo, podemos citar os refluxos circulantes da torre, que são variáveis manipuláveis pela operação, mas que influenciam na troca térmica do petróleo e de diversos produtos. Assim, uma otimização na CT do condensador de topo através da alteração dos refluxos circulantes poderia significar perdas nas demais unidades da refinaria. Portanto, após reuniões técnicas, foram definidas como variáveis manipuladas a temperatura da carga e a vazão de vapor de retificação. A Figura 4.5 apresenta o fluxograma de processo com essas duas variáveis e com a função objetivo.

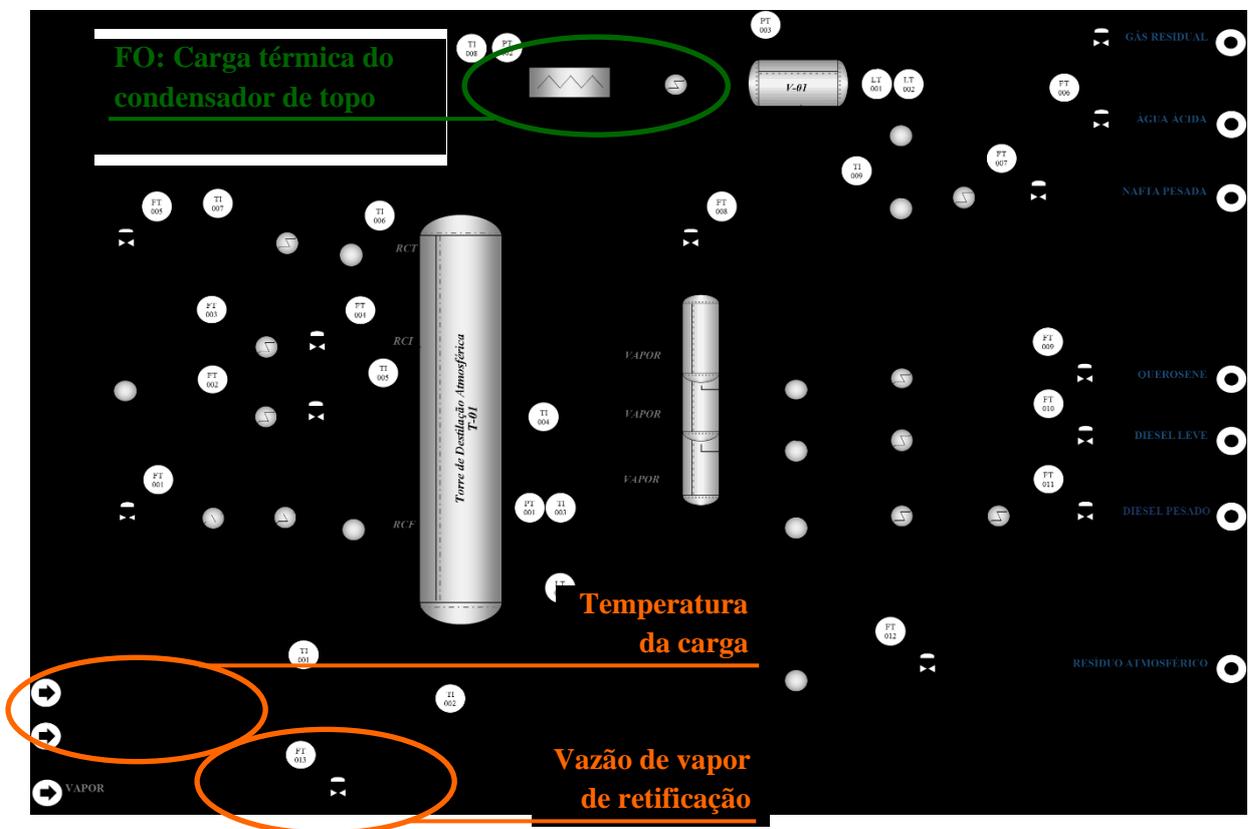


Figura 4.5 – Fluxograma de processo: variáveis manipuladas e função objetivo.

A partir da definição das variáveis manipuladas, a análise de sensibilidade foi realizada através do método direto, com a alteração de uma variável por vez e a observação do comportamento sobre uma resposta. As respostas escolhidas para essa análise foram a carga térmica do condensador de topo e a qualidade dos produtos, uma vez que o objetivo desse trabalho é minimizar a carga térmica mantendo-se a qualidade dos produtos. Os resultados dessa análise estão apresentados nas seguintes seções: influência da temperatura de carga e influência da vazão de vapor de retificação.

Influência da temperatura de carga

Para avaliar a influência da temperatura de carga na CT do condensador de topo, todas as outras variáveis foram mantidas constantes. Da mesma forma, foi realizada a análise da influência dessa variável na especificação dos produtos. A faixa operacional da temperatura de carga utilizada nesse estudo foi de 359 °C a 375 °C. Esses valores foram informados pela empresa que opera a torre T-01, em função dos limites operacionais dos equipamentos e instrumentos instalados.

A Figura 4.6 ilustra a variação da CT do condensador de topo com a temperatura de carga.

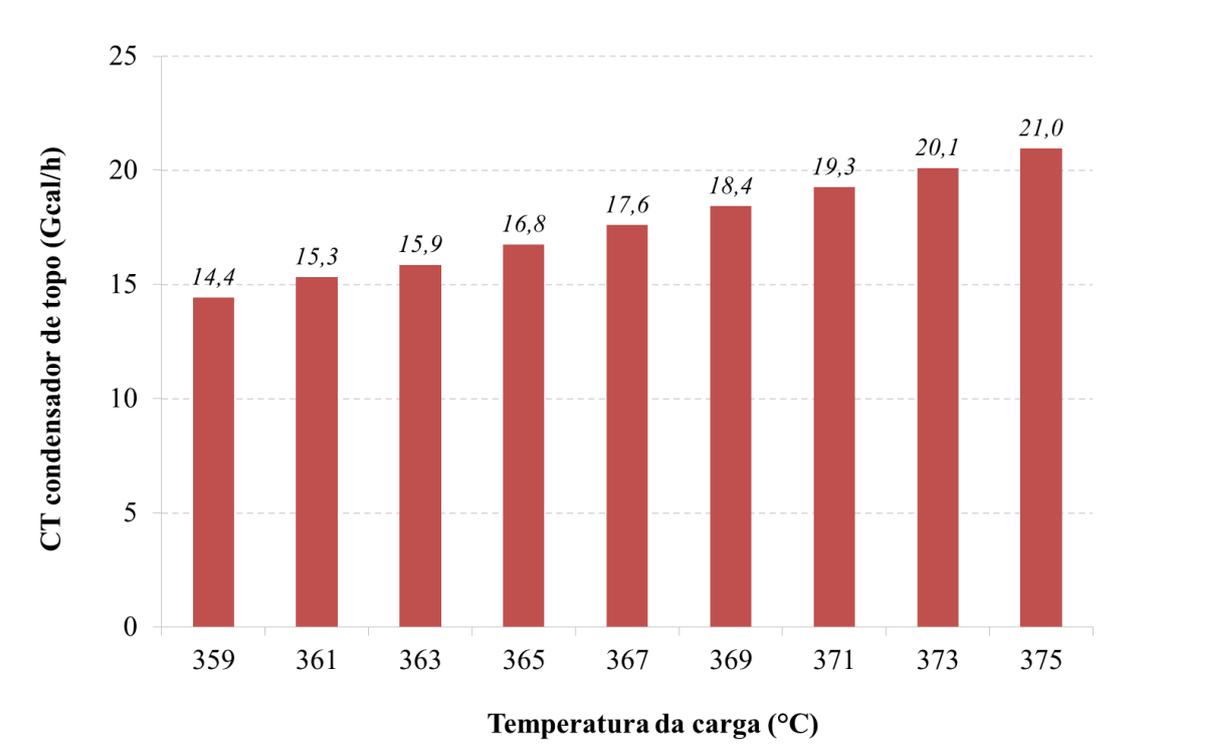


Figura 4.6 – Variação da CT do condensador de topo com a temperatura da carga.

Conforme esperado, a elevação da temperatura de carga ocasiona um aumento na CT do condensador. Quando se eleva a temperatura de carga, mantendo-se as demais variáveis constantes, ocorre um aumento na temperatura de topo e para a redução dessa temperatura ao valor inicial é necessário um aumento na vazão de refluxo de topo. Conseqüentemente, as vazões internas de líquido e vapor serão maiores. Como uma quantidade maior de vapor deverá ser resfriado no condensador de topo, sua CT será elevada e mais energia será consumida.

As Figuras 4.7 e 4.8 mostram a influência da temperatura de carga nas curvas de destilação dos produtos. Nesse estudo, o critério utilizado para avaliar a qualidade dos produtos foi a curva de destilação.

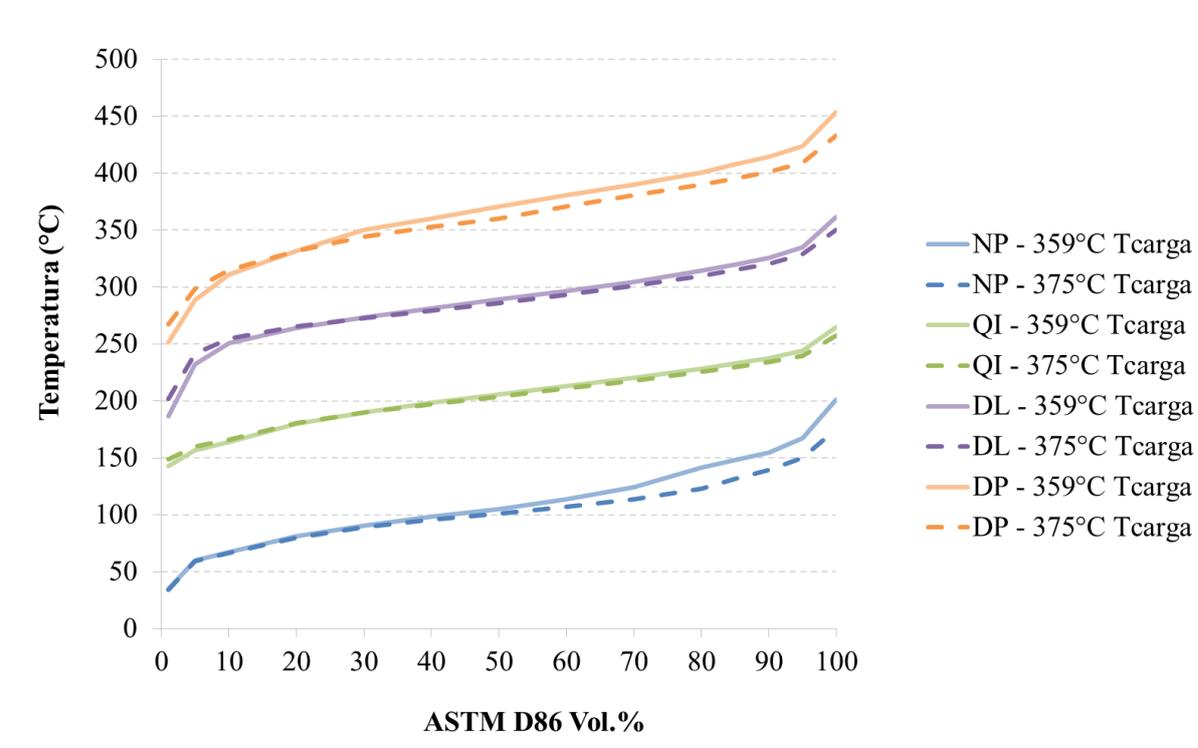


Figura 4.7 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a temperatura da carga.

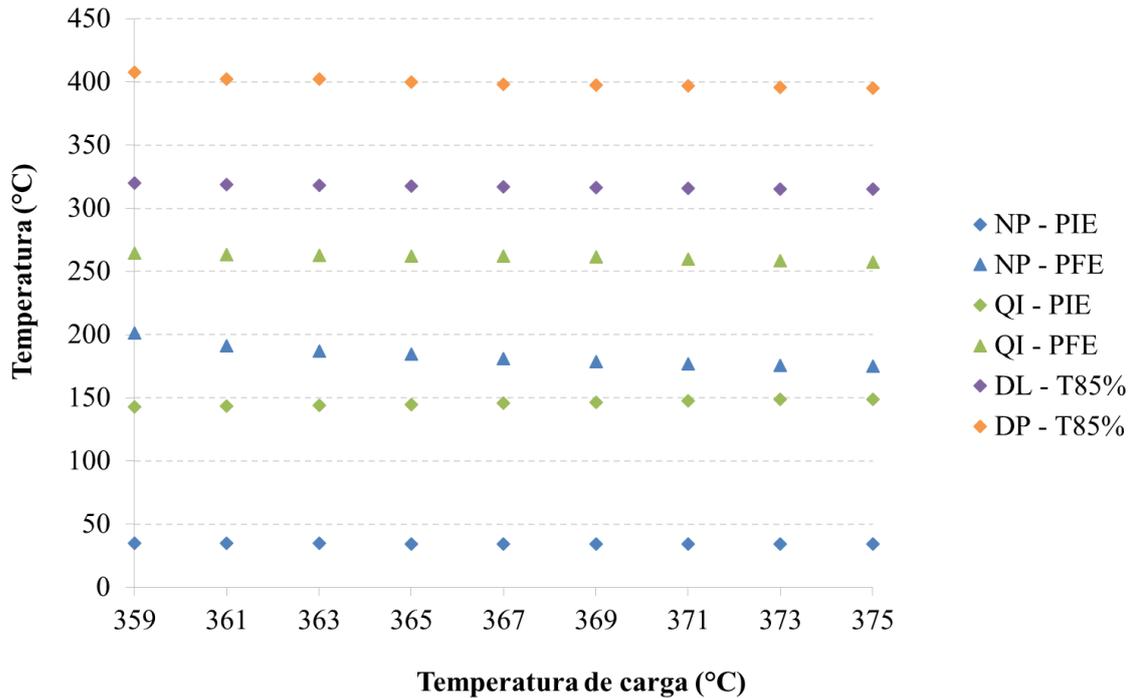


Figura 4.8 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a temperatura da carga – PIE, PFE e T85%.

Através da Figura 4.7, pode-se observar que a elevação na temperatura da carga de 359 °C para 375 °C influencia as curvas de destilação dos produtos. De uma forma geral, pode-se afirmar que a elevação na temperatura de entrada do petróleo ocasionou uma redução na temperatura da maioria dos pontos das curvas de destilação. Esse comportamento pode ser justificado pelo aumento no refluxo de topo da torre, que gera uma maior condensação dos vapores ascendentes e conseqüentemente uma maior incorporação de componentes leves nos produtos. Além disso, analisando-se a Figura 4.8, que apresenta alguns pontos chaves das curvas de destilação, pode-se observar que a alteração da temperatura da carga influencia mais fortemente o PFE da NP.

Influência da vazão de vapor de retificação

Assim como a análise da temperatura de carga, para analisar a vazão de vapor, todas as variáveis foram mantidas constantes. A faixa operacional da vazão de vapor utilizada nesse estudo foi de 280 a 360 ton/d. Esses valores foram informados pela empresa que opera a torre T-01, em função dos limites operacionais dos equipamentos e instrumentos instalados.

A Figura 4.9 ilustra a variação da CT do condensador de topo com a vazão de vapor de retificação.

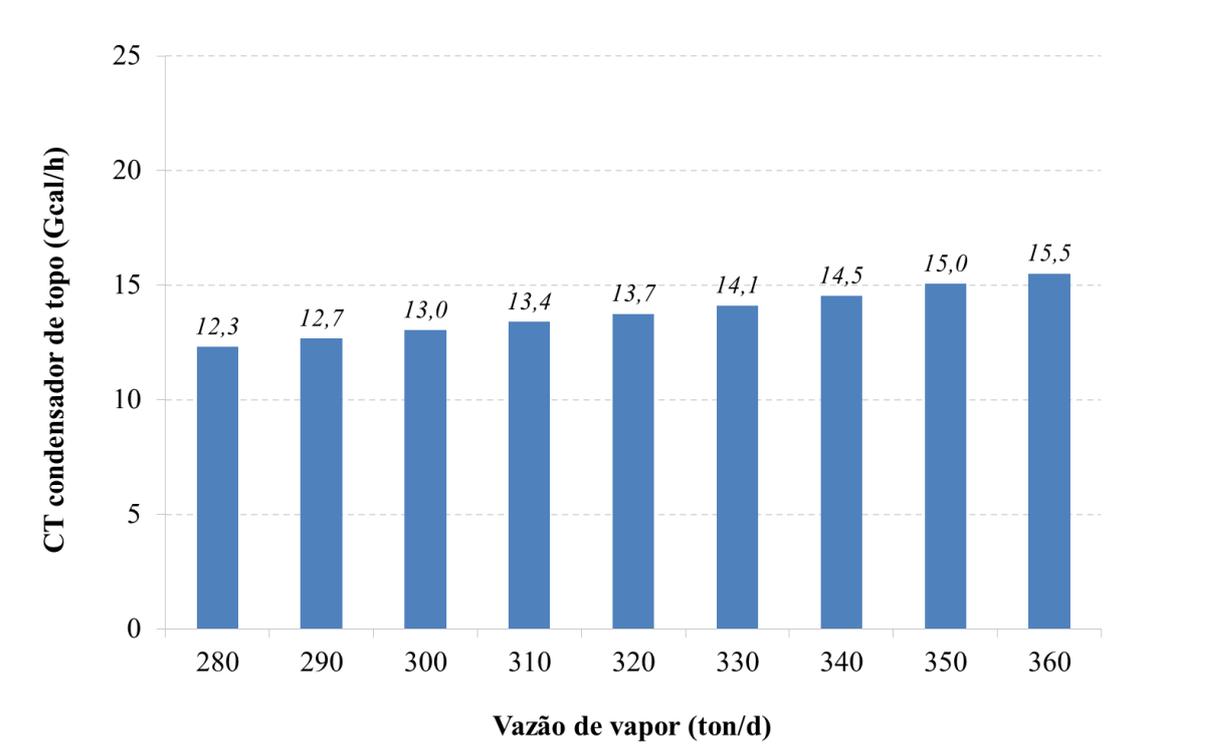


Figura 4.9 – Variação da CT do condensador de topo com a vazão de vapor de retificação.

Analisando-se a Figura 4.9, percebe-se que o aumento da vazão de vapor ocasiona uma elevação na CT do condensador. Assim como a temperatura de carga (Figura 4.6), essa elevação ocorre devido ao aumento na quantidade de vapor no topo da torre. No entanto, no caso da vazão de vapor de retificação, além da influência da vazão de refluxo, tem-se o próprio acréscimo de vapor d'água, que é injetado na torre.

As Figuras 4.10 e 4.11 mostram a variação das curvas de destilação dos produtos com a vazão de vapor.

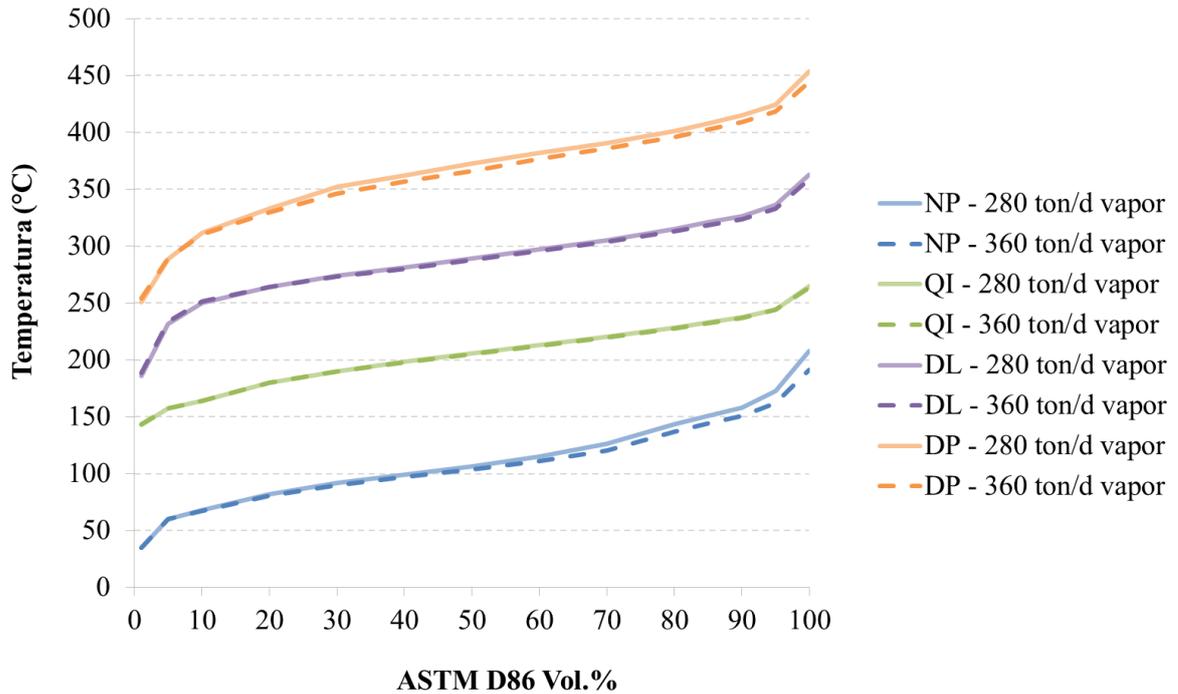


Figura 4.10 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a vazão de vapor de retificação.

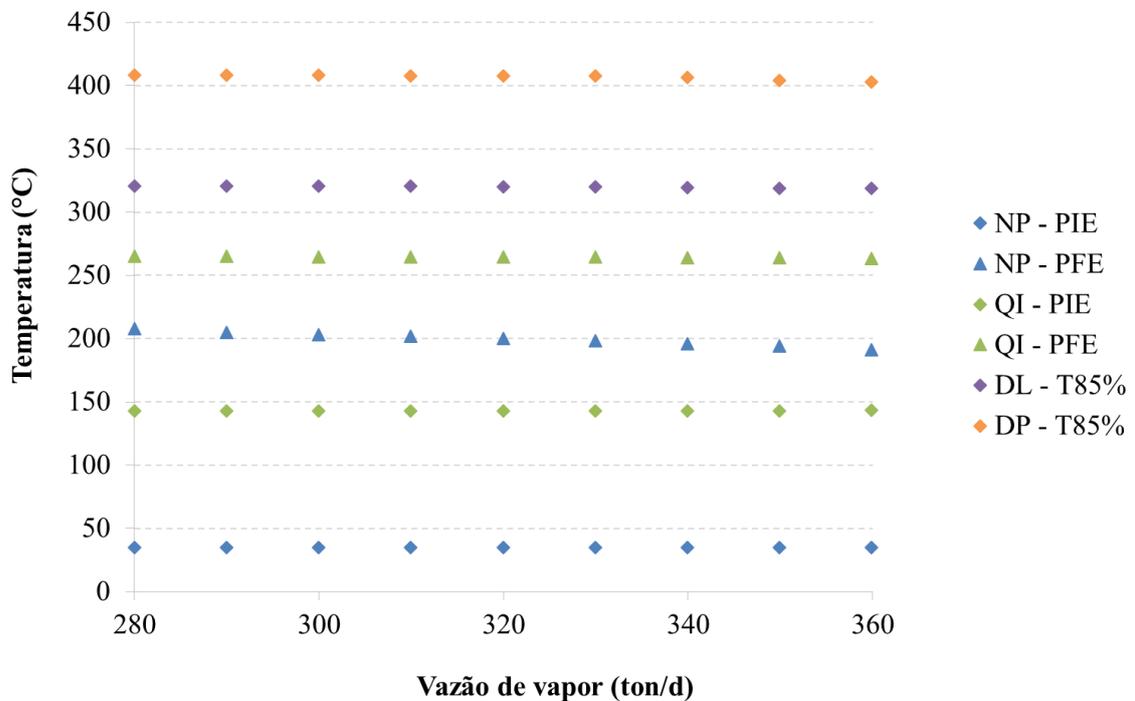


Figura 4.11 – Variação das curvas de destilação dos produtos com a vazão de vapor de retificação – PIE, PFE, T85%.

Pode-se observar através da Figura 4.10 que, assim como a temperatura de carga, a vazão de vapor de retificação também influencia na qualidade dos produtos, reduzindo a temperatura da maioria dos pontos das curvas de destilação. Esse comportamento também pode ser justificado pelo aumento no refluxo de topo, que gera uma maior incorporação de componentes leves nos produtos. Além disso, comparando-se as Figuras 4.8 e 4.11, que apresentam alguns pontos-chaves das curvas de destilação, pode-se observar que a alteração da temperatura da carga influencia mais fortemente o PFE da NP.

Vale ressaltar ainda que, para as faixas de operação analisadas, a temperatura de carga altera mais significativamente a CT do condensador e as curvas de destilação que a vazão de vapor de retificação.

Os resultados apresentados na análise de sensibilidade ratificam a importância da seleção da temperatura de carga e vazão de vapor como variáveis manipuladas, uma vez que as mesmas influenciam a CT do condensador e a qualidade dos produtos. A análise realizada também possibilitou a identificação do PFE da NP como um importante ponto-chave para ser observado nas curvas de destilação. Além disso, essa análise se mostrou extremamente relevante do ponto de vista qualitativo, pois possibilitou a identificação do efeito isolado de cada variável na CT do condensador e na qualidade dos produtos. No entanto, a análise de sensibilidade não mostra o efeito combinado dessas variáveis, sendo necessária a realização do planejamento fatorial para a obtenção de todos os dados necessários para a otimização.

4.2.2 - Planejamento fatorial

De acordo com Ferreira (2015), a escolha do planejamento estatístico deve ser realizada em função da questão estudada e dos resultados de uma avaliação preliminar. Dessa forma, como foram selecionadas duas variáveis para controle, optou-se pela utilização do planejamento fatorial completo de três níveis com dois fatores. A escolha desse planejamento estatístico foi motivada pela sua eficiência na modelagem de superfícies de resposta e também pela sua simplicidade de aplicação, mesmo em processos complexos como a destilação.

A Tabela 4.7 apresenta os níveis das variáveis estabelecidos para o planejamento fatorial.

Tabela 4.7 – Níveis das variáveis utilizadas no planejamento fatorial.

Variável	Nível (-1)	Nível (0)	Nível (+1)
Temperatura de carga (°C)	359	367	375
Vazão de vapor de retificação (ton/d)	280	320	360

Os níveis mínimos e máximo (-1 e +1) representam os limites operacionais das respectivas variáveis. Conforme descrito anteriormente, esses valores foram informados pela empresa que opera a T-01, em função de restrições nos equipamentos e instrumentos. Para o nível intermediário (0) foram escolhidos os valores centrais entre os níveis mínimos e máximos.

A partir dos níveis estabelecidos, a matriz do planejamento fatorial foi definida e as simulações realizadas usando o simulador Petro-SIM. A Tabela 4.8 apresenta a matriz do planejamento das variáveis com as respostas das CT do condensador de topo.

Tabela 4.8 – Matriz do planejamento fatorial 3² - CT do condensador.

Simulações	Variáveis		Resposta
	Temperatura de carga (°C)	Vazão de vapor de retificação (ton/d)	CT do condensador (Gcal/h)
1	359 (-1)	280 (-1)	11,85
2	359 (-1)	320 (0)	13,31
3	359 (-1)	360 (+1)	14,74
4	367 (0)	280 (-1)	14,63
5	367 (0)	320 (0)	16,31
6	367 (0)	360 (+1)	17,95
7	375 (+1)	280 (-1)	18,01
8	375 (+1)	320 (0)	19,67
9	375 (+1)	360 (+1)	21,31

Como o objetivo desse trabalho é minimizar a CT do condensador mantendo-se a qualidade dos produtos, também foi necessário o desenvolvimento de um modelo que representasse a influência das variáveis selecionadas na especificação dos produtos. Dessa forma, inicialmente foi realizada uma análise do impacto das variáveis em alguns pontos chaves das curvas de destilação dos produtos. Com esse propósito, foram selecionados os seguintes pontos chaves: PIE e PFE da nafta pesada, PIE e PFE do querosene iluminante e T85% do

diesel leve e do diesel pesado. Em seguida, foram realizadas simulações, considerando a matriz do planejamento das variáveis da Tabela 4.8 e como respostas os pontos chaves selecionados. A Figura 4.12 apresenta os resultados obtidos e os limites de especificação para cada produto. Esses limites foram discutidos e acordados com a empresa que opera a T-01, uma vez que a refinaria em que está localizada essa torre possui elevada complexidade e os produtos gerados são resultados da mistura de diversas correntes e não somente da unidade de destilação em estudo.

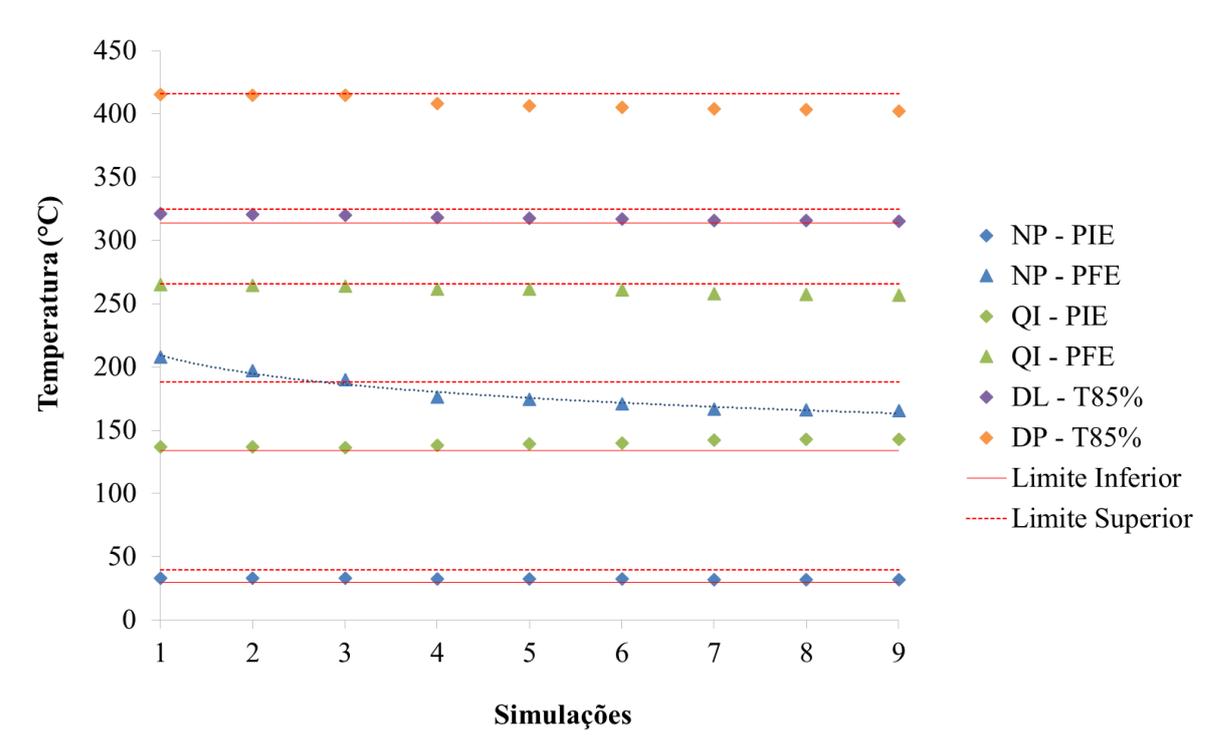


Figura 4.12 – Variações e limites de especificação dos pontos chaves das curvas de destilação dos produtos.

Conforme Figura 4.12, pode-se observar que o PFE da NP apresenta uma variação mais significativa, quando comparado com os demais pontos chaves. Além disso, em geral, observa-se que quando o PFE da NP está dentro do limite de especificação, os demais produtos também estão especificados. Ou seja, o fator limitante para garantir a qualidade dos produtos é o PFE da NP. Portanto, assim como para a CT do condensador, foram realizadas simulações visando à obtenção de dados para a elaboração de um modelo que possa representar o efeito das variáveis selecionadas no PFE da NP. A Tabela 4.9 apresenta a matriz do planejamento das variáveis com as respostas dos PFE da NP.

Tabela 4.9 – Matriz do planejamento fatorial 3² - PFE da NP.

Simulações	Variáveis		Resposta
	Temperatura de carga (°C)	Vazão de vapor de retificação (ton/d)	PFE da NP (°C)
1	359 (-1)	280 (-1)	216,98
2	359 (-1)	320 (0)	206,64
3	359 (-1)	360 (+1)	199,31
4	367 (0)	280 (-1)	185,70
5	367 (0)	320 (0)	183,61
6	367 (0)	360 (+1)	180,24
7	375 (+1)	280 (-1)	176,20
8	375 (+1)	320 (0)	175,46
9	375 (+1)	360 (+1)	174,91

4.2.3 - Identificação dos fatores mais significativos

A identificação dos fatores mais significativas foi realizada através do Diagrama de Pareto, que possibilita uma análise gráfica da importância e magnitude dos efeitos das variáveis na resposta. As Figuras 4.13 e 4.14 apresentam o Diagrama de Pareto para a CT do condensador e PFE da NP, respectivamente. Esses diagramas foram desenvolvidos a partir dos resultados das simulações e usando o *software* STATISTICA.

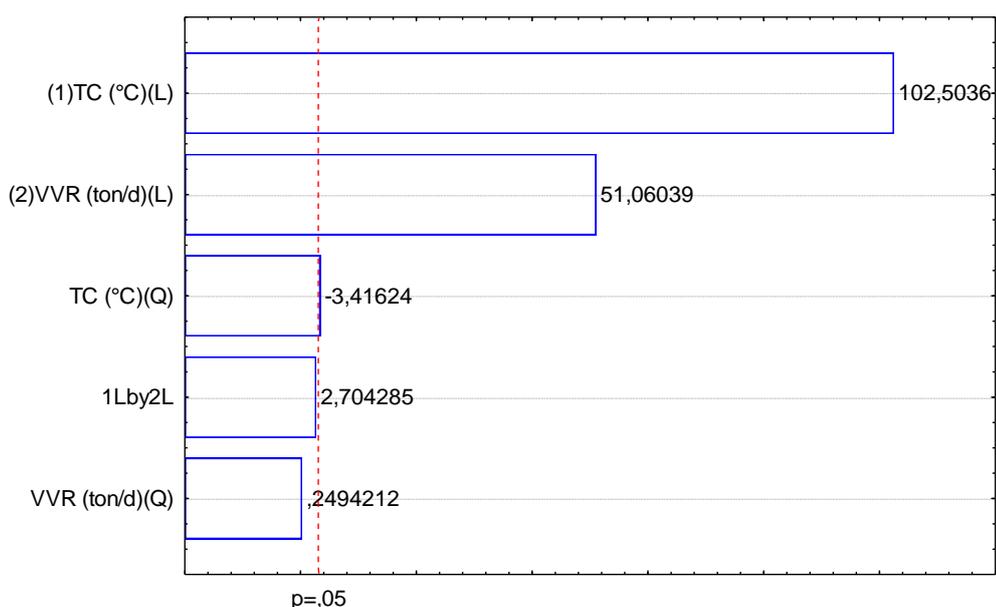


Figura 4.13 – Diagrama de Pareto – CT do condensador.

Os valores apresentados no diagrama correspondem aos efeitos padronizados de todos os fatores e suas interações. Fatores cujos valores ultrapassam a linha tracejada em vermelho, são considerados significativos, pois apresentam nível de confiança maior que 95%. Além disso, os efeitos com sinais positivos aumentam a resposta com o aumento do fator e os efeitos com sinais negativos diminuem a resposta com a diminuição do fator. Dessa forma, a Figura 4.13 evidencia a importância do efeito linear da temperatura de carga e da vazão de vapor. O efeito quadrático da temperatura de carga, apesar de estar no limite da linha tracejada, também foi considerado nesse estudo. É interessante ressaltar ainda que, conforme observado na análise de sensibilidade, a temperatura de carga apresenta uma influência maior na CT do condensador, quando comparada com a vazão de vapor. Ainda com relação ao diagrama da Figura 4.13, pode-se observar que as interações entre as duas variáveis (1Lby2L) e o efeito quadrático das mesmas não são significativas e podem ser desconsideradas do modelo.

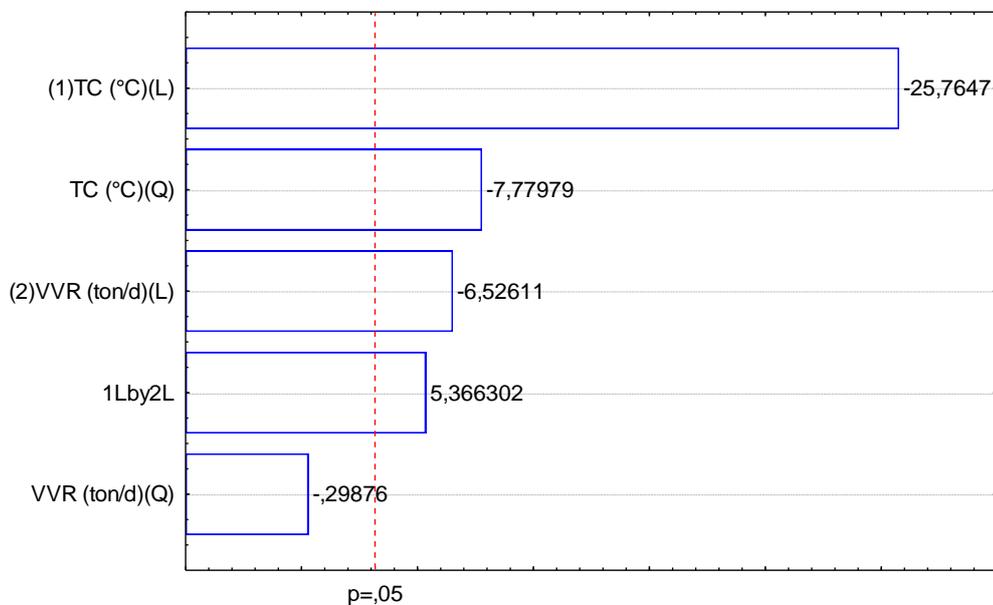


Figura 4.14 – Diagrama de Pareto – PFE da NP.

Com relação à análise dos fatores mais significativos para o modelo do PFE da NP, o Diagrama de Pareto mostra que, com exceção do efeito quadrático da vazão de vapor, todos os fatores e suas interações são significativos. Além disso, assim como para a CT do condensador, o efeito linear da temperatura de carga apresenta maior influência no PFE da NP. Dessa forma, alterações nessa variável ocasionam maiores variações na qualidade dos produtos e na CT do condensador, do que alterações na vazão de vapor.

A Tabela 4.10 apresenta os fatores cujos efeitos são significativos para cada modelo.

Tabela 4.10 – Fatores significativos dos modelos.

Fatores	Significativo?	
	CT do condensador	PFE da NP
Comportamento linear da temperatura de carga	Sim	Sim
Comportamento quadrático da temperatura de carga	Sim	Sim
Comportamento linear da vazão de vapor	Sim	Sim
Comportamento quadrático da vazão de vapor	Não	Não
Interação entre a temperatura de carga e a vazão de vapor	Não	Sim

4.2.4 - Determinação dos modelos matemáticos

Utilizando o *software* STATISTICA e considerando somente os fatores significativos da Tabela 4.10, os modelos matemáticos foram determinados e estão apresentados nas Equações (1) e (2). A Equação (1) representa o modelo para a carga térmica do condensador de topo e a Equação (2) o modelo para o ponto final de ebulição da nafta pesada.

$$CT_{COND} = 244,0990 - 1,7081 * TC + 2,8687 * 10^{-3} * TC^2 + 3,9608 * 10^{-2} * VVR \quad (1)$$

$$PFE_{NP} = 20.124,0809 - 102,4381 * TC + 1,3124 * 10^{-1} * TC^2 - 4,8003 * VVR + 1,2803 * 10^{-2} * TC * VVR \quad (2)$$

A validação desses modelos foi realizada através do método de regressão linear. Inicialmente, foram determinadas as equações lineares geradas a partir dos dados simulados e dos dados obtidos pelos modelos. Em seguida, os modelos foram validados a partir da análise dos intervalos de confiança dos coeficientes angulares e lineares das equações. Os critérios utilizados para a validação de um modelo pelo método de regressão linear são: intervalo de confiança do coeficiente angular abrangendo o número 1 e intervalo de confiança do coeficiente linear abrangendo o número 0. As Equações (3) e (4) representam os dados dos modelos da CT do condensador e da PFE da NP, respectivamente.

$$CT_{COND_MODELO} = (0,9992 \pm 0,0251) * CT_{COND_SIMULADO} + (0,0129 \pm 0,4186) \quad (3)$$

$$PFE_{NP_MODELO} = (0,9961 \pm 0,0555) * PFE_{NP_SIMULADO} + (0,6944 \pm 9,9939) \quad (4)$$

Pode-se observar que as Equações (3) e (4) atendem aos critérios estabelecidos e, portanto, os modelos podem ser utilizados na otimização. Vale ressaltar também que, os coeficientes de determinação (R^2) das Equações (3) e (4) apresentaram valores acima de 0,99, que evidenciam uma boa correlação.

4.2.5 - Elaboração das superfícies de resposta

A partir dos modelos matemáticos e utilizando o *software* STATISTICA, foram elaboradas duas superfícies de resposta, uma para cada modelo. Essas superfícies possibilitam a visualização gráfica do comportamento de uma determinada resposta em função de um conjunto de variáveis selecionadas. Essa metodologia facilita a compreensão e análise do processo e, conseqüentemente, a sua otimização. As Figuras 4.15 e 4.16 mostram as superfícies obtidas.

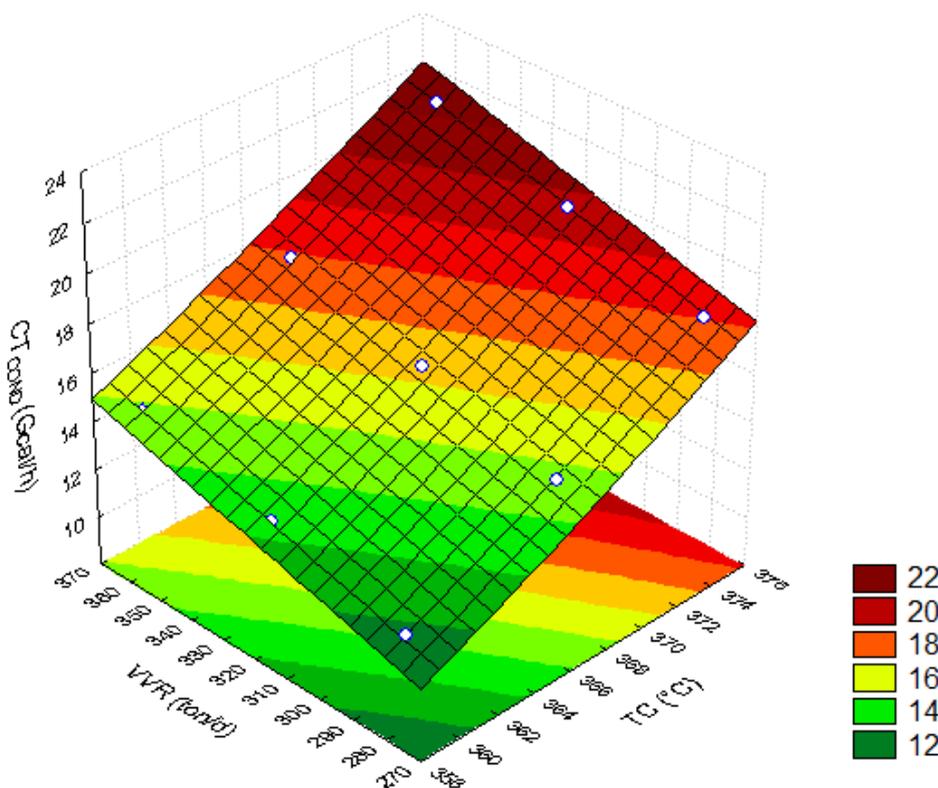


Figura 4.15 – Superfície de resposta – CT do condensador em função da temperatura de carga e vazão de vapor.

A Figura 4.15 mostra o comportamento da CT do condensador em função da temperatura de carga e vazão de vapor. Pode-se observar que a minimização da CT do condensador ocorre com a redução dessas duas variáveis independentes. Esse comportamento também foi observado na análise de sensibilidade, quando cada variável foi avaliada de forma isolada. A justificativa está no aumento da vazão de refluxo, que ocorre quando temos uma maior temperatura de carga e vazão de vapor. O aumento do refluxo gera mais vapor no topo da torre e, considerando as demais variáveis constantes, tem-se o aumento da CT do condensador. Outro aspecto importante sobre a Figura 4.15 é o formato da superfície de resposta, que representa um modelo mais próximo do linear que do quadrático. Isso ocorre devido à baixa contribuição dos fatores quadráticos, conforme apresentado no Diagrama de Pareto da Figura 4.13.

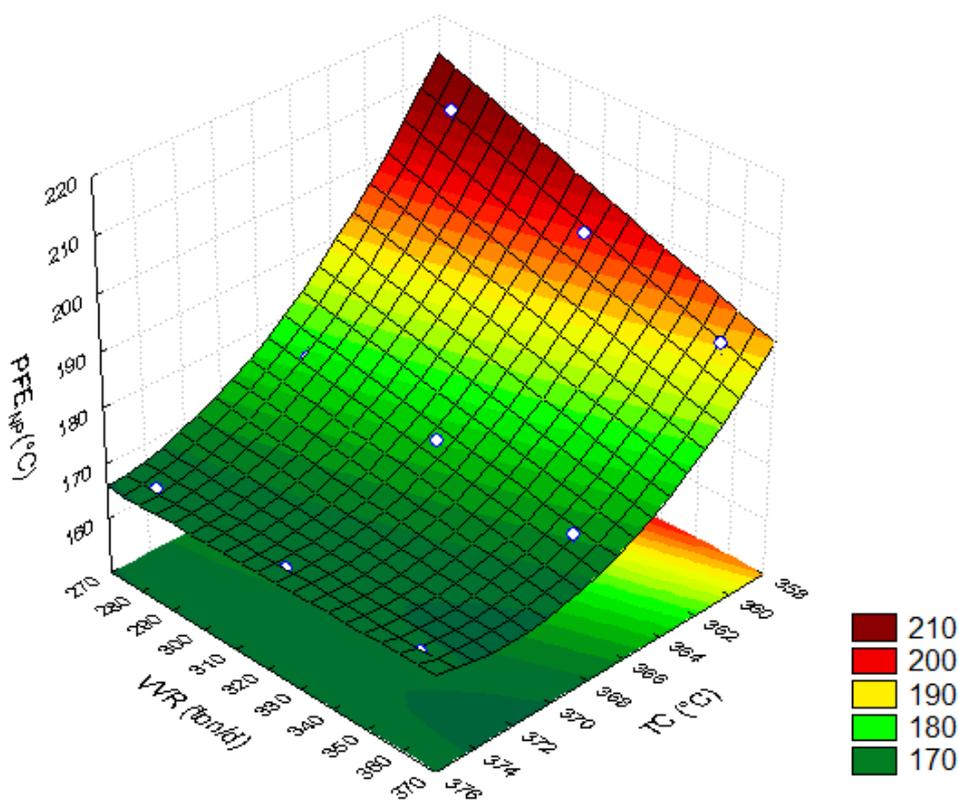


Figura 4.16 – Superfície de resposta – PFE da NP em função da temperatura de carga e vazão de vapor.

Visto que a qualidade dos produtos pode ser avaliada através do PFE da NP, a superfície de resposta dessa propriedade foi desenvolvida, em função da temperatura de carga e vazão de vapor, e está apresentada na Figura 4.16. Ao contrário da superfície da CT do condensador, essa representa um modelo quadrático, em função da contribuição do efeito quadrático da

temperatura de carga, conforme apresentado no Diagrama de Pareto da Figura 4.14. Além disso, pode-se observar que o PFE da NP é reduzido quando aumentamos a temperatura da carga e a vazão de vapor de retificação. Esse comportamento pode ser justificado pelo aumento no refluxo de topo da torre, que gera uma maior condensação dos vapores ascendentes e consequentemente uma maior incorporação de componentes leves nos produtos.

4.2.6 - Determinação das condições operacionais ótimas

De posse dos modelos matemáticos e das superfícies de resposta, foi concluída a otimização do processo, visando à determinação dos valores operacionais para a temperatura de carga e vazão de vapor. Essa etapa foi realizada em três fases. Inicialmente, foi realizada uma análise mais robusta da superfície de resposta da CT. Em seguida, as condições operacionais ótimas foram determinadas utilizando uma planilha de cálculo. Por fim, foi realizada uma análise econômica dos possíveis ganhos relativos à otimização.

Análise da superfície de resposta

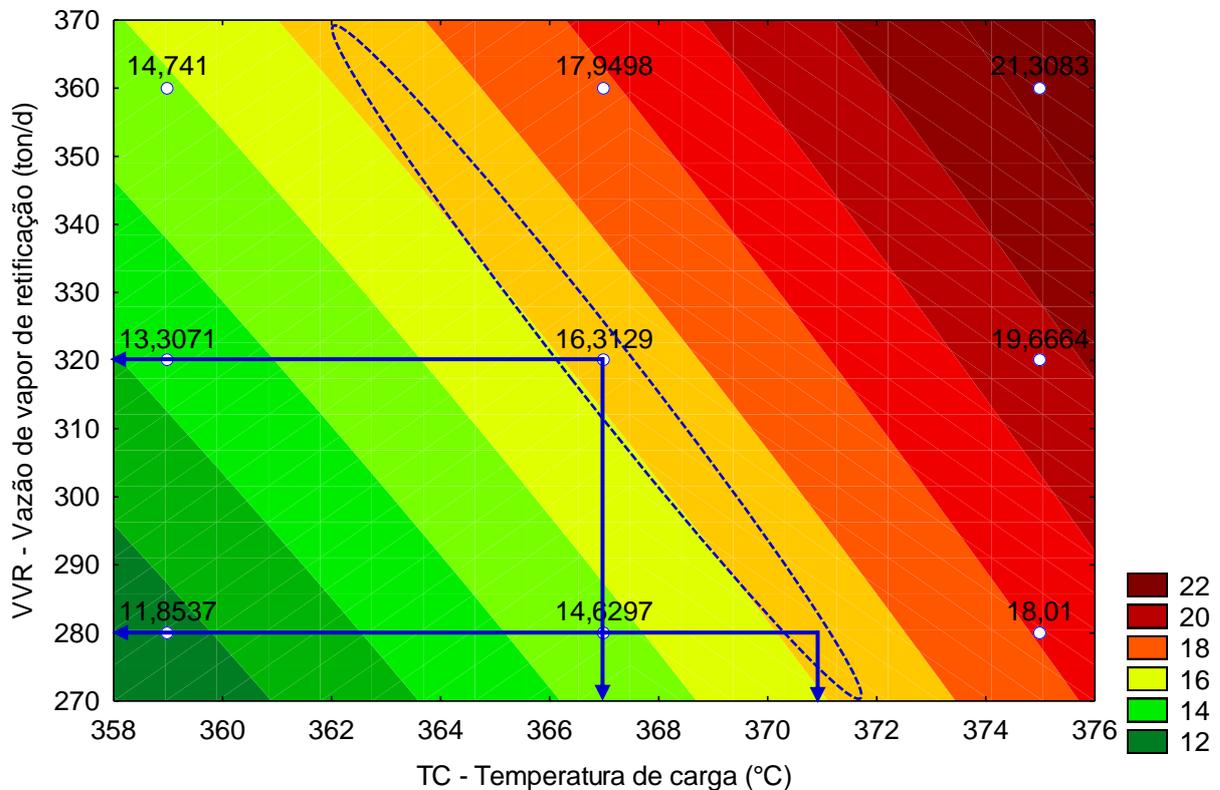


Figura 4.17 – Superfície de resposta – CT do condensador (Gcal /h) em função da temperatura de carga e vazão de vapor – vista plana.

A Figura 4.17 representa a vista plana da Figura 4.15 e, portanto, também ilustra a influência das variáveis estudadas na CT do condensador. Os valores apresentados na área da figura representam os resultados das simulações obtidas, em função das variações na vazão de vapor e na temperatura de carga. As cargas térmicas estão representadas através de faixas, consequentemente, uma determinada CT pode ser obtida através de uma série de combinações entre as variáveis. Como por exemplo, conforme ilustrado na Figura 4.17, pode-se obter a CT normal de operação de 16,3 Gcal/h através do ajuste da vazão de vapor para 320 ton/d e da temperatura de carga para 367 °C ou 280 ton/d para o vapor e 371 °C para a carga. No entanto, é preciso considerar que, cada combinação de variável representa um custo associado à produção de vapor e ao aquecimento da carga. Além disso, problemas relacionados à disponibilidade de água para a produção de vapor ou limitações nos fornos, podem ser fatores decisivos na escolha dos valores operacionais para essas variáveis. Em virtude disso, foram selecionados três cenários para análise e, em seguida, foram determinadas as suas respectivas condições operacionais ótimas.

Determinação das condições operacionais ótimas

As condições operacionais foram determinadas para os seguintes cenários:

C1 – Limitação nos fornos de aquecimento da carga. Problemas operacionais ou mudança na qualidade do petróleo podem ocasionar limitações quanto ao aquecimento da carga nos fornos. Em função disso, considerou-se esse cenário para que sejam determinadas as condições ótimas nos casos em que os fornos deverão operar com a menor temperatura possível na saída, ou seja, com a menor CT nos fornos.

C2 – Baixa disponibilidade de água para produção de vapor. Esse cenário é bastante relevante, pois além das questões ambientais relacionadas à economia de água, existe uma sazonalidade na disponibilidade de água na região em que se encontra instalada a refinaria. Isso ocorre principalmente em função da escassez de chuvas e impacta fortemente no desempenho da produção, pois em alguns períodos são necessárias reduções na carga ou paradas de plantas. Nesse contexto, esse cenário representa a condição de menor vazão de vapor de retificação possível, ou seja, a menor CT nas caldeiras de geração de vapor da planta.

C3 – Sem limitações nos fornos ou na disponibilidade de água. Esse cenário representa a otimização no consumo da CT do condensador de topo, considerando que não existem as limitações apresentadas nos cenários C1 e C2.

Vale ressaltar ainda que, para os cenários C1, C2 e C3, foi mantida a premissa de que os produtos gerados na torre devem estar especificados. Conforme apresentado na Figura 4.12, quando o PFE da NP está especificado, os demais produtos também estão. Dessa forma, foi utilizado o valor de 188 °C como limite superior para o PFE. Ou seja, valores iguais ou abaixo de 188 °C indicam que a NP está especificada. Conforme descrito no item 4.2.2, esse limite foi discutido e acordado com a empresa que opera a T-01.

Com os modelos obtidos no item 4.2.4 e utilizando o método GRG não linear do suplemento *Solver* do *software* Excel®, foram determinadas as condições operacionais ótimas para os cenários. Os resultados estão apresentados na Tabela 4.11, onde a CT total representa a soma das cargas térmicas dos fornos para aquecimento da carga, das caldeiras para geração de vapor e do condensador de topo da torre.

Tabela 4.11 – Resultados da otimização.

Cenários	Padrão	C1	C2	C3
Temperatura de carga (°C)	360,60	359,65	363,64	363,64
Vazão de vapor (ton/d)	351,60	360,00	280,00	280,00
CT fornos (Gcal/h)	85,44	84,62	88,09	88,09
CT caldeiras (Gcal/h)	8,94	9,15	7,12	7,12
CT condensador (Gcal/h)	15,12	15,11	13,41	13,41
CT total (Gcal/h)	109,51	108,88	108,62	108,62

Os resultados apresentados indicam que em todos os cenários analisados ocorreu uma redução na CT do condensador e na CT total do sistema. Portanto, percebe-se que é possível a obtenção de ganhos através da otimização realizada, principalmente nos cenários C2 e C3, que apresentaram os menores valores para a CT total. Ainda sobre esses cenários, pode-se observar que os mesmos apresentaram resultados iguais. Isso significa que alcançamos a menor CT no condensador de topo quando operamos de forma a minimizar a vazão de vapor de retificação. Ao considerar essa perspectiva, pode-se dizer que, quando não existir limitação nos fornos, a condição operacional ótima será 280,00 ton/d de vapor de retificação e 363,64 °C na temperatura de carga. Essas condições proporcionam ganhos, tanto nas cargas térmicas do

condensador e das caldeiras, como no consumo de água na unidade. Em termos mensais, uma mudança do cenário padrão para os cenários C2 ou C3 gera uma economia de 2.148 m³ de água utilizada para a produção de vapor.

As Figuras 4.18 e 4.19 ilustram os resultados obtidos para as cargas térmicas no cenário C1 e nos cenários C2 e C3, respectivamente.

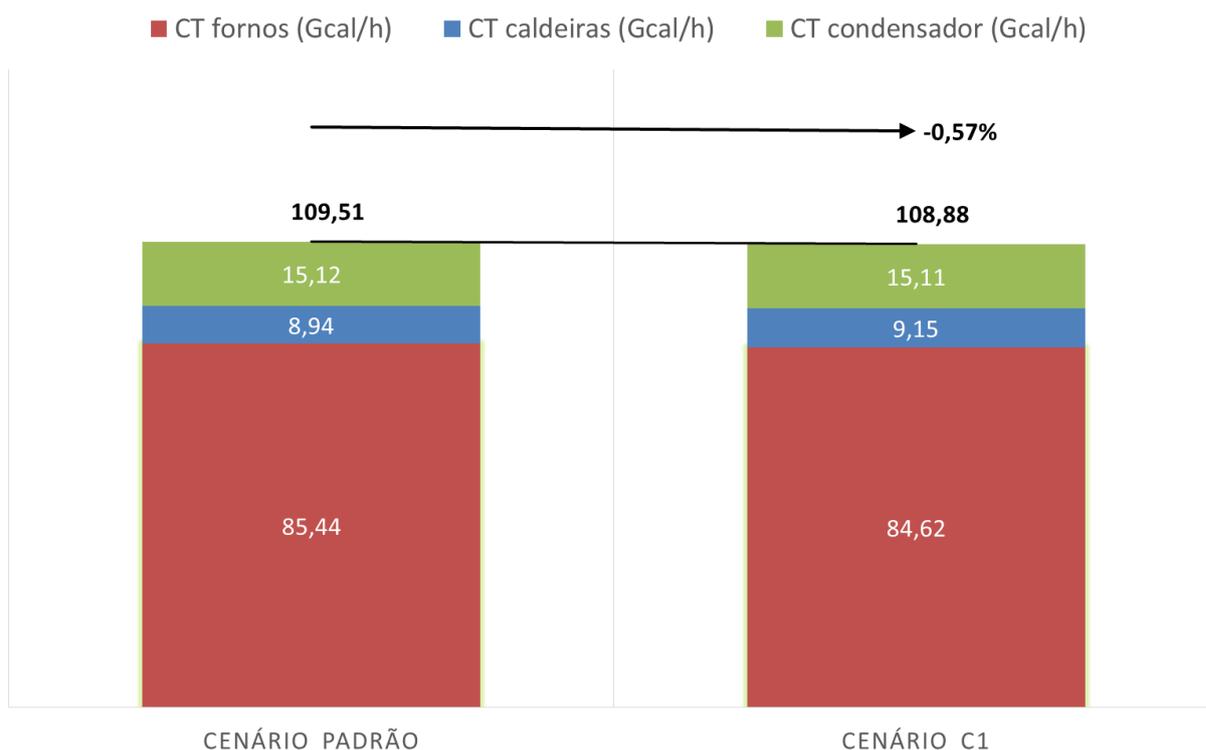


Figura 4.18 – Comparativo entre as cargas térmicas no cenário padrão e C1.

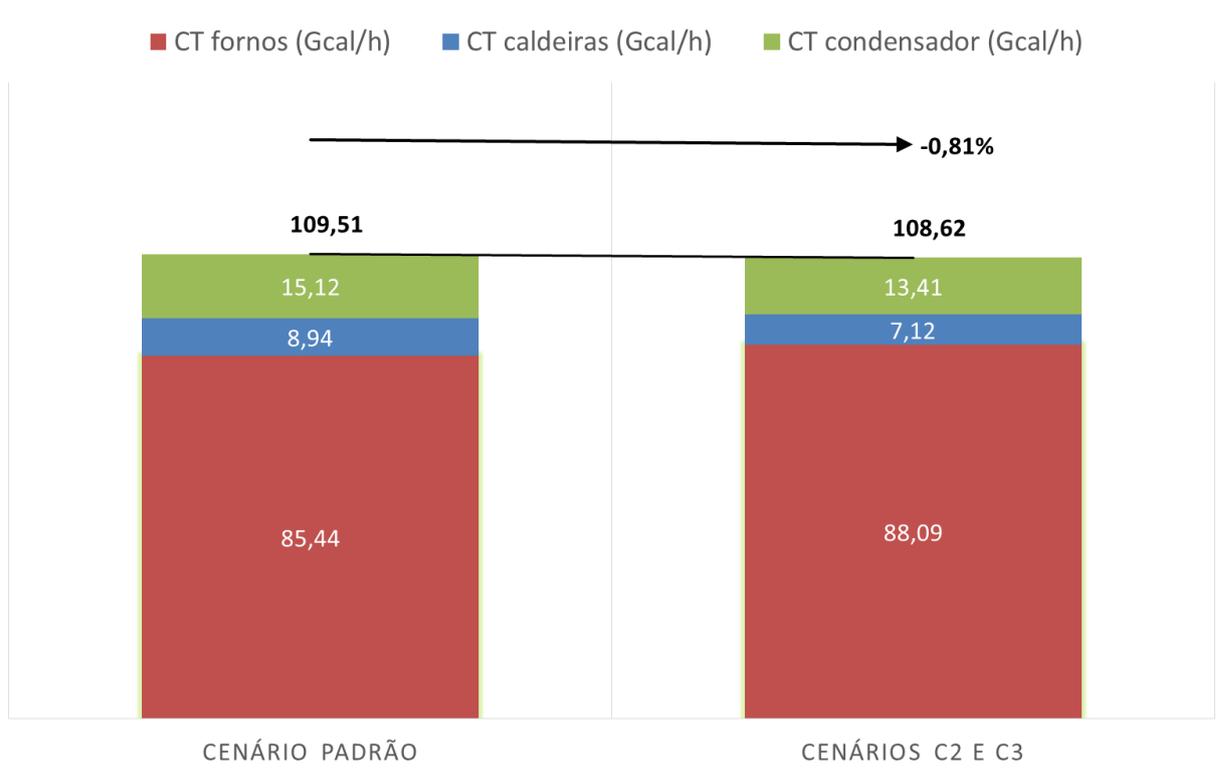


Figura 4.19 – Comparativo entre as cargas térmicas no cenário padrão e C2 e C3.

A Figura 4.18 mostra que a alteração das condições operacionais para os valores estabelecidos no cenário C1 proporcionam uma redução na CT total de 0,57%. Essa redução ocorre principalmente em função da redução da CT dos fornos, que cai de 85,44 para 84,66 Gcal/h. Com relação aos cenários C2 e C3, apresentados na Figura 4.19, tem-se uma redução de 0,81% da CT total, quando comparados com o cenário padrão. Isso ocorre devido às reduções nas cargas térmicas das caldeiras e do condensador.

Com o objetivo de quantificar o impacto dessas reduções, foi realizada uma análise econômica para os cenários estudados.

Análise econômica da redução das cargas térmicas

Conforme visto anteriormente, todos os cenários apresentaram reduções na CT total. Se todas as fontes de energia que abastecem os equipamentos estudados fossem iguais, a análise econômica poderia ser realizada de forma direta, utilizando somente a CT total. No entanto, a energia dos fornos e das caldeiras é provida pela queima do gás natural e o condensador de topo

é abastecido por energia elétrica. Além disso, as cargas térmicas dos equipamentos sofrem aumento ou redução em função do cenário analisado. Deve-se salientar ainda que, o sistema de resfriamento de topo da torre T-01 é constituído por um trocador de calor do tipo *air cooler* e por um trocador de calor do tipo casco-tubo. O primeiro é abastecido por energia elétrica e o segundo utiliza água de resfriamento. Nessa análise econômica, foram considerados somente os custos relativos ao *air cooler*, pois o mesmo representa quase 90% do total de energia consumida no topo e também pela ausência de dados relacionados ao consumo da água de resfriamento na T-01.

Dentro desse contexto, foram levantados os preços do gás natural (R\$/m³) e da energia elétrica (R\$/kWh) utilizados na refinaria. De posse desses valores e com as cargas térmicas calculadas, realizou-se uma análise econômica em termos mensais. As Figuras 4.20 e 4.21 apresentam os resultados dessa análise para o cenário C1 e para os cenários C2 e C3, respectivamente.

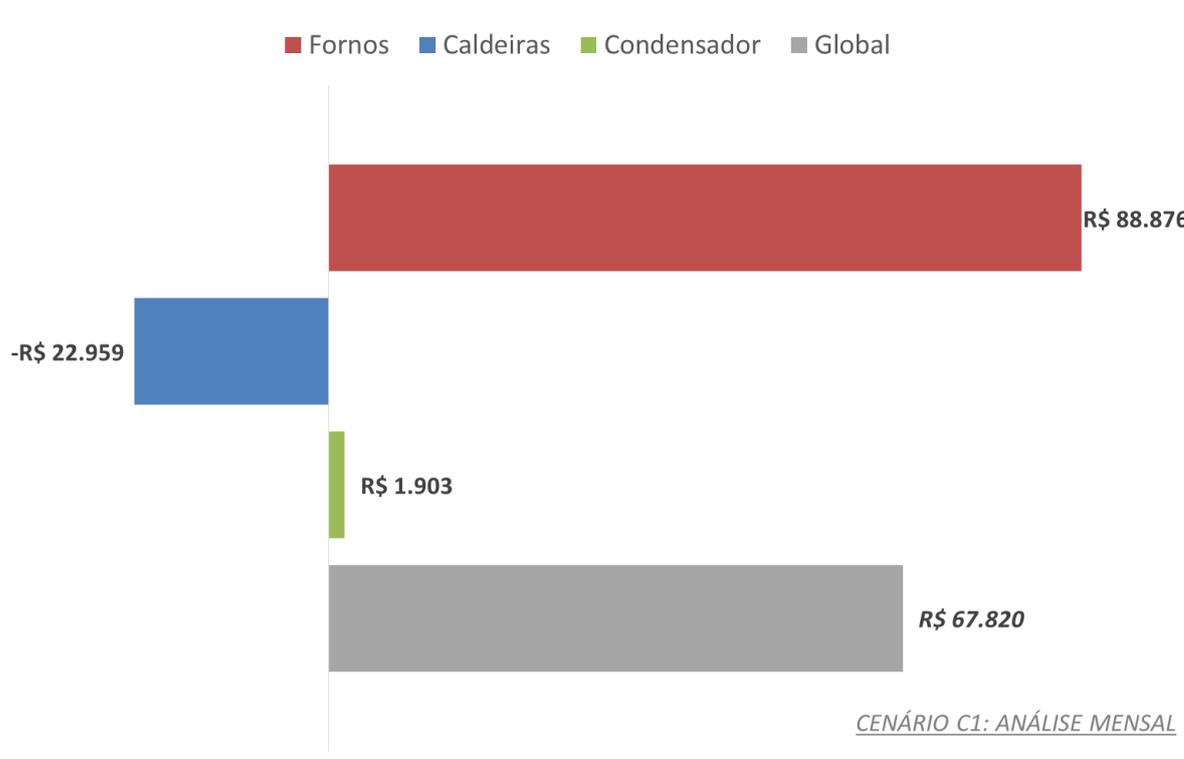


Figura 4.20 – Análise econômica com as condições operacionais do cenário C1.

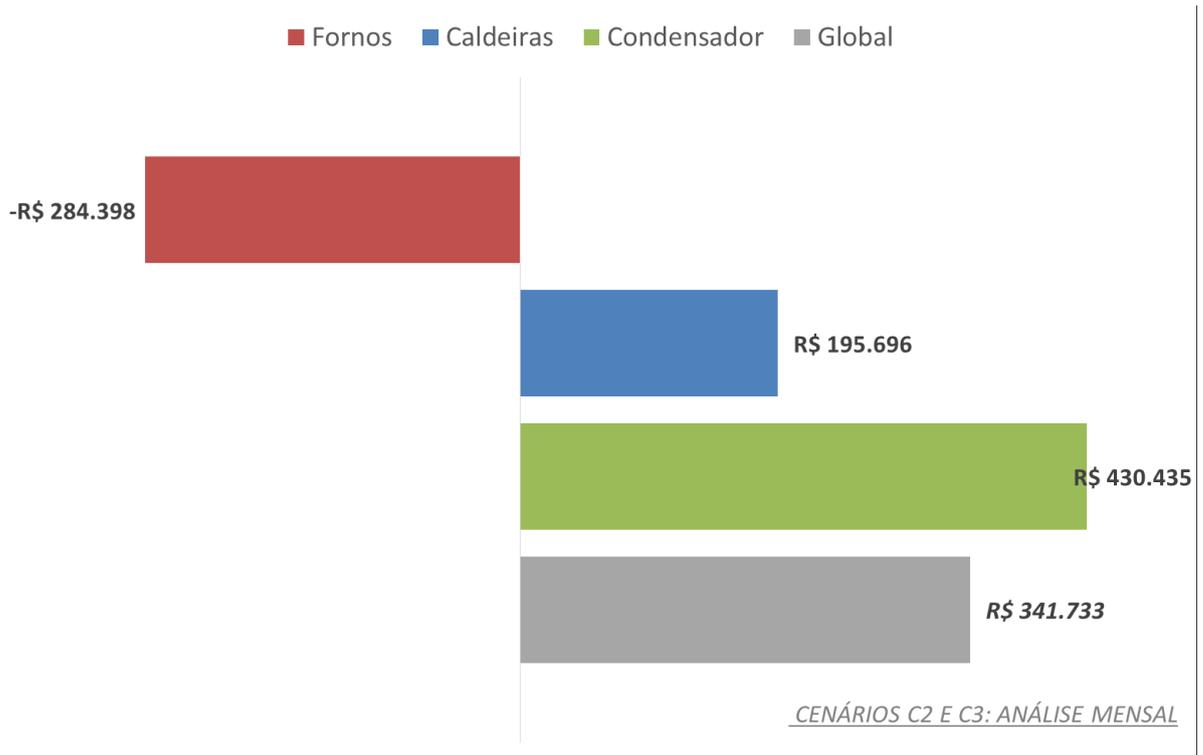


Figura 4.21 – Análise econômica com as condições operacionais dos cenários C2 e C3.

A análise econômica realizada indica que em todos os cenários estudados existe a possibilidade de ganhos. Na Figura 4.20, que representa o cenário onde existe limitação nos fornos, pode-se observar perdas relativas ao aumento no consumo do gás natural nas caldeiras (R\$22.959). Esse resultado é esperado, visto que para compensar a redução na temperatura de carga, é necessário um aumento na vazão de vapor de retificação de 351,6 ton/d para 360 ton/d. Por outro lado, como existem ganhos nos fornos e no condensador, o balanço global é de um ganho de R\$67.820/mês. Com relação aos cenários C2 e C3, observa-se que existe uma perda estimada de R\$284.398/mês nos fornos. Essa perda também é esperada, visto que esses cenários representam a condição de menor vazão de vapor e, conseqüentemente, maior temperatura de carga. No entanto, os ganhos nas caldeiras e no condensador geram um saldo final de R\$341.733/mês. Acrescenta-se, ainda, que a maior contribuição para esse resultado positivo é do condensador, que apresentou um ganho de R\$430.435/mês.

Diante de tais resultados, é seguro afirmar que a otimização proposta nesse estudo pode gerar ganhos financeiros significativos, através somente da alteração nas condições operacionais da temperatura de carga e da vazão de vapor de retificação.

Capítulo 5

Conclusões

Capítulo 5 - Conclusões

A realização desse estudo possibilitou a determinação das condições operacionais de um processo de destilação de petróleo, que aplicadas podem representar reduções no consumo de energia e utilidades, além de ganhos financeiros significativos. E, ao considerar essa perspectiva, é importante enfatizar que, dada a crescente demanda energética mundial e a crise político-econômica nacional, a realização de estudos que aumentem a eficiência energética de processos representam ganhos ainda maiores.

Foi desenvolvida uma metodologia de trabalho, que incluiu as etapas de modelagem, análise de sensibilidade, planejamento fatorial e MSR. A modelagem, realizada com o simulador Petro-SIM, permitiu a representação do comportamento real da torre de destilação. Essa etapa apresentou resultados satisfatórios, comprovados pela proximidade entre as curvas de destilação real e simuladas. Foram obtidos desvios absolutos máximos de 10 °C em praticamente toda a extensão das curvas dos produtos. Além disso, também foram obtidos desvios relativos inferiores à 1,1% para as vazões e densidade dos produtos.

Para esse estudo, foram selecionadas, como variáveis manipuladas, a temperatura de carga e a vazão de vapor de retificação. A análise de sensibilidade indicou que, para as faixas operacionais analisadas, a temperatura de carga altera mais significativamente a CT do condensador e as curvas de destilação que a vazão de vapor de retificação. Um outro ponto a evidenciar foi o PFE da NP como um importante ponto chave para ser observado nas curvas de destilação.

Através do planejamento fatorial foi possível definir as características das simulações a serem realizadas, com o objetivo de obter um modelo matemático capaz de representar o comportamento do consumo de energia e da especificação dos produtos em função das variáveis operacionais selecionadas. Dessa forma, foram estabelecidas duas matrizes de planejamento fatorial 3^2 , uma para a CT do condensador de topo e outra para o PFE da NP. O PFE da NP foi definido como fator limitante para garantir a qualidade dos demais produtos.

Utilizando o *software* STATISTICA, foram obtidos os modelos matemáticos, considerando somente os fatores mais significativos. A identificação dos fatores mais significativos foi realizada através do Diagrama de Pareto. Para o modelo da CT do condensador, observou-se que o efeito linear da temperatura de carga e da vazão de vapor foram

os mais significativos. Já para o modelo do PFE da NP, com exceção do efeito quadrático da vazão de vapor, todos os fatores e suas interações foram significativos. A validação dos modelos foi realizada através do método de regressão linear.

A otimização foi realizada utilizando o *software* Excel® e foram analisados três cenários. O primeiro representa uma condição em que existe limitação nos fornos de aquecimento, o segundo uma baixa disponibilidade de água para produção de vapor e o terceiro sem limitações. Os resultados indicaram que, apesar da refinaria já operar em condições operacionais próximas aos valores ótimos, em todos os cenários ocorreu uma redução na CT do condensador e na CT total do sistema.

As condições operacionais definidas para o cenário 1 foi de 360,00 ton/d de vapor de retificação e 359,65 °C na temperatura de carga. Essas condições proporcionam uma redução de 0,57% na CT total, que representa uma economia de R\$67.820/mês. Com relação aos cenários 2 e 3, foram obtidas as condições operacionais de 280,00 ton/d de vapor de retificação e 363,64 °C de temperatura de carga, que gera uma redução de 0,81% na CT total e uma economia de R\$341.733/mês. Vale ressaltar ainda uma redução mensal de 2.148 m³ de água utilizada para a produção de vapor. Além disso, esses cenários apresentaram resultados iguais, indicando que obtemos a menor CT no condensador de topo quando operamos de forma a minimizar a vazão de vapor de retificação.

No entanto, é importante ressaltar que esse estudo foi realizado a partir da composição do petróleo que mais é utilizada na refinaria e resultados diferentes podem ser obtidos para diferentes tipos de carga. Dessa forma, estudos complementares devem ser realizados para abranger os demais tipos de petróleo.

Por fim, além dos ganhos possíveis de serem obtidos na prática, esse trabalho mostra que a simulação de processos associada à métodos estatísticos é uma importante ferramenta de otimização, podendo ser utilizada para a melhoria da eficiência energética, mesmo em processos complexos como a destilação de petróleo.

Referências

Bibliográficas

Referências Bibliográficas

ARJMAND, M.; MORENO, L.; LIU, L. Energy saving in crude oil atmospheric distillation columns by modifying the vapor feed inlet tray. *Chemical Engineering & Technology*, v.34, n.8, p.1359-1367, 2011.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. 2ed. Campinas, SP: Editora da UNICAMP, 2002.

BATISTA, E.; RODRIGUES, M. I.; MEIRELLES, A. J. Optimization of a Secondary Reflux and Vaporization (SRV) distillation process using surface response analysis. *Computers & Chemical Engineering*, v.22, p.737–740, 1998.

BIEGLER, L. T.; GROSSMAN, I. E.; WESTERBERG, A. W. *Systematic methods of chemical process design*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall PTR, 1999.

CAMÕES, T. G. *Modelação de uma Coluna sob Vácuo da Refinaria de Sines*. 2014. 90f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Instituto Superior Técnico Lisboa, Portugal.

CAMPBELL, J. M. *Gas conditioning and processing*. Volume 2: The equipment modules. 7ed. Norman, OK: Campbell Petroleum Series, 1992.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Relatório síntese do Balanço Energético Nacional – BEN 2016. Disponível em:

<<https://ben.epe.gov.br/BENRelatorio Sintese.aspx?anoColeta=2016&anoFimColeta=2015>>. Acesso em: 10 de novembro de 2016.

ENRÍQUEZ, A. H.; BINNS, M.; KIM, J. Systematic retrofit design with response surface method and process integration techniques: a case study for the retrofit of a hydrocarbon fractionation plant. *Chemical Engineering Research and Design*, v.92, p.2052-2070, 2014.

FERREIRA, S. L. C. *Introdução às técnicas de planejamento de experimentos*. Salvador, BA: Editora Vento Leste, 2015.

GARY, J. H.; HANDWERK, G. E. *Petroleum refining: technology and economics*. 4ed. New York, NY: Marcel Dekker, Inc., 2001.

GU, W; WANG, K.; HUANG, Y.; ZHANG, B.; CHEN, Q.; HUI, C. Energy optimization for a multistage crude oil distillation process. *Chemical Engineering & Technology*, v.38, No.7, p.1243-1253, 2015.

HANDOGO, R. Optimization on the performance of Crude Distillation Unit (CDU). *Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering*, v.7, p.78-87, 2012.

IBRAHIM, D; JOBSON, M.; GUILLÉN-GOSÁLBEZ, G. Optimization-Based Design of Crude Oil Distillation Units Using Rigorous Simulation Models. *Industrial & Engineering Chemical Research*, v.56, p.6728-6740, 2017.

KBC, A. T. Petro-SIM™ Refining and Petrochemicals. Disponível em: <<http://www.kbc.com/process-simulation-software/refinery-simulation>>. Acesso em: 11 de novembro de 2016.

KBC, A. T. Petro-SIM™ Refining and Petrochemicals. Guide: Distop Model. Acesso em: 12 de julho de 2017.

KISTER, H. Z. *Distillation design*. Mc-Graw-Hill, Inc., 1992.

LIÑAN, L. Z.; LIMA, N. M. N.; MANENTI, F.; MACIEL, M. R. W.; MACIEL FILHO, R.; MEDINA, L. C. Experimental campaign, modeling, and sensitivity analysis for the molecular distillation of petroleum residues 673.15 K+. *Chemical Engineering Research and Design*, v.90, p.243-258, 2012.

LONG, N. V. D.; LEE, M. Design and optimization of a dividing wall column by factorial design. *Korean Journal of Chemical Engineering*, v.29, p.567-573, 2012.

MADANI, S.; GHESHLAGHI, R.; MAHDAVI, M. A.; SOBHANI, M.; ELKAMEL, A. Optimization of the performance of a double-chamber microbial fuel cell through factorial design of experiments and response surface methodology. *Fuel*, v.150, p.434-440, 2015.

MAHDI, K., GHESHLAGHI, R., ZAHEDI, G., LOHI, A. Characterization and modeling of a crude oil desalting plant by a statistically designed approach. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v.61, p.116–123, 2008.

MAURICIO-IGLESIAS, M.; BISGAARD, T.; KRISTENSEN, H.; GERNAEY, K. V.; ABILDSKOV, J.; HUUSOM, J. K. Pressure control in distillation columns: a model-based analysis. *Industrial & Engineering Chemical Research*, v.53, p.14776-14787, 2014.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. *Applied statistics and probability for engineers*. 3ed. New York, NY: John Wiley & Sons, Inc., 2003.

OCHOA-ESTOPIER, L. M; JOBSON, M. Optimization of heat-integrated crude oil distillation systems. Part I: The distillation model. *Industrial & Engineering Chemical Research*, v.54, p.4988-5000, 2015.

OCHOA-ESTOPIER, L. M.; JOBSON, M.; SMITH, R. Operational optimization of crude oil distillation systems using artificial neural networks. *Computers and Chemical Engineering*, v.59, p.178-185, 2013.

PERLINGEIRO, C. A. G. *Engenharia de processos: análise, simulação, otimização e síntese de processos químicos*. Editora Blucher, 2005.

PERRY, R. H; GREEN, D. W. *Perry's chemical engineers' handbook*. 7ed. The McGraw-Hill Companies, Inc., 1997.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. *Planejamento de experimentos e otimização de processos*. Campinas, SP: Casa do Pão Editora, 2005.

SANGAL, V. K.; KUMAR, V.; MISHRA, I. M. Optimization of structural and operational variables for the energy efficiency of a divided wall distillation column. *Computers and Chemical Engineering*, v.40, p.33-40, 2012.

SCOPUS (Elsevier). Document Search. Disponível em:

<<https://www-scopus-com.ez18.periodicos.capes.gov.br/>>. Acesso em: 25 de maio de 2017.

SHAHANDEH, H.; IVAKPOUR, J.; KASIRI, N. Feasibility study of heat-integrated distillation columns using rigorous optimization. *Energy*, v.74, p.662-674, 2014.

SOUZA, M. R.; PINHO, S. P.; GUIMARÃES, P. R. B.; VIANNA, R. F. Selection of optimal operating conditions based on minimum energy consumption for an acrylonitrile recovery unit. *Separation Science and Technology*. v.51, no.11, p-1830-1839, 2016.

SPEIGHT, J. G. *The chemistry and technology of petroleum*. 4ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis Group, 2007.

SPEIGHT, J. G. *Handbook of petroleum product analysis*. 2ed. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, Inc., 2015.

SZŐKE-LIS, A.; FARKAS, C. I.; MIZSEY, P. Comprehensive investigation and comparison of refinery distillation technologies. *Industrial & Engineering Chemical Research*, v.53, p.19282-19292, 2014.

TAQVI, S. A.; TUFAA, L. D.; MUHADIZIRA, S. Optimization and dynamics of distillation column using Aspen Plus®. *Procedia Engineering*, v.148, p.978 – 984, 2016.

TALAVERA, R. M. R. *Caracterização de sistemas, simulação e otimização de etapas da planta de processamento de gás natural*. 2002. 172f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

TARIGHALESLAMI, A. H.; OMIDKHAH, M. R.; GHANNADZADEH, A.; HESAS, R. H. Thermodynamic evaluation of distillation columns using exergy loss profiles: a case study on the crude oil atmospheric distillation column. *Clean Technologies and Environmental Policy*, v.14, p.381-387, 2012.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION – EIA. International energy outlook 2016 (IEO2016). Disponível em: <<http://www.eia.gov/forecasts/ieo/>>. Acesso em: 10 de novembro de 2016.

VANDYCK, T.; KERAMIDAS, K.; SAVEYN, B.; KITOUS, A.; VRONTISI, Z. A global stocktake of the Paris pledges: implications for energy systems and economy. *Global Environmental Change*, v.41, p.46-63, 2016.

YAO, H.; CHU, J. Operational optimization of a simulated atmospheric distillation column using support vector regression models and information analysis. *Chemical Engineering Research and Design*, v.90, p.2247-2261, 2012.

WAHEED, M. A.; ONI, A. O.; ADEJUYIGBE, S. B.; ADEWUMI, B. A. Thermoeconomic and environmental assessment of a crude oil distillation unit of a Nigerian refinery. *Applied Thermal Engineering*, v.66, p.191-205, 2014.

ANEXOS

ANEXOS**Anexo A: Resultados das análises de laboratório das correntes**

As Tabelas A.1 e A.2 apresentam os resultados das análises de laboratório das correntes líquidas e gasosa.

Tabela A.1 – Resultado das análises de laboratório – correntes líquidas.

Análise	NP	RCT	QI	DL	DP
Enxofre total	0,0219	0,0732	0,0902	0,2636	0,3924
Dens. 20/4 GC	0,7222	0,7933	0,8052	0,8508	0,8848
D60F calculado	0,7266	0,7973	0,8091	0,8546	0,8885
Tipo de destilação	D-86	D-86	D-86	D-86	D-86
PIE	32,9	117,7	137,0	216,7	253,7
05% Vol. Vaporiz. (°C)	58,9	137,2	156,6	238,3	293,0
10% Vol. Vaporiz. (°C)	68,5	147,3	163,5	249,8	309,8
20% Vol. Vaporiz. (°C)	80,9	156,2	176,4	263,0	330,7
30% Vol. Vaporiz. (°C)	89,9	165,6	186,3	271,9	342,6
40% Vol. Vaporiz. (°C)	97,5	175,1	195,4	280,2	352,6
50% Vol. Vaporiz. (°C)	104,6	184,5	203,1	287,4	364,6
60% Vol. Vaporiz. (°C)	112,2	194,2	210,9	294,9	376,4
70% Vol. Vaporiz. (°C)	120,7	204,8	219,4	303,5	388,5
80% Vol. Vaporiz. (°C)	132,6	216,6	228,9	313,6	402,8
85% Vol. Vaporiz. (°C)	141,1	223,3	229,6	319,1	410,8
90% Vol. Vaporiz. (°C)	153,0	231,5	230,0	326,6	419,2
95% Vol. Vaporiz. (°C)	181,9	243,4	250,1	341,5	426,0
PFE	184,5	255,9	263,1	351,5	426,3

Tabela A.2 – Resultado das análises de laboratório – corrente gasosa.

Análise	Gás Residual	Análise	Gás Residual
Metano	7,51	C-Buteno-2	0,01
Etano	7,95	I-Pentano	4,99
Eteno	3,68	N-Pentano	4,23
Propano	27,78	Nitrogênio	5,53
Propeno	1,06	Oxigênio	2,48
I-Butano	7,85	Hidrogênio	1,44
N-Butano	19,01	CO ₂	0,75
1,3-Butadieno	1,35	CO	0,3
I-Buteno	0,33	H ₂ S	0,42
T-Buteno-2	0,07	C5+	2,89