



EMANUELLE SANTOS DE MENEZES

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DE CALDEIRAS A ÓLEO
(PACKAGE BOILERS), UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE
PROCESSOS**

São Luís

2022

EMANUELLE SANTOS DE MENEZES

**AVALIAÇÃO TÉCNICA DE CALDEIRAS A ÓLEO
(PACKAGE BOILERS), UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE
PROCESSOS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Colegiado de Curso da Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Jaiver Efren Jaimes Figueroa

São Luís

2022

FICHA CATALOGRÁFICA

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Menezes, Emanuelle.

AVALIAÇÃO TÉCNICA DE CALDEIRAS A ÓLEO PACKAGE BOILERS,
UTILIZANDO SIMULAÇÃO DE PROCESSOS / Emanuelle Menezes. -
2022.

51 p.

Orientador(a): Jaiver Figueroa.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2022.

1. BPF. 2. Eficiência energética. 3. Modelagem. 4.
Vapor. I. Figueroa, Jaiver. II. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JAIVER EFREN JAIMES FIGUEROA
Orientador – DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. DOMINGOS SERGIO ARAUJO SILVA
DEEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. VALTER NUNES TRINDADE JUNIOR
DEEQ/CCET/UFMA

26 de julho de 2022

DADOS CURRICULARES**Emanuelle Santos de Menezes**

NASCIMENTO 16/08/1998 – IMPERATRIZ / MA

FILIAÇÃO José Antônio Nunes de Menezes
Zirleide Santos de Menezes

2013/2018 Curso de Graduação
Engenharia Química - Universidade Federal do Maranhão

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, que sempre acreditaram no meu potencial e estiveram me apoiando em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem ele nada disso seria possível.

Aos meus pais que sempre acreditaram em mim e me deixaram livres para seguir o meu próprio caminho.

A minha irmã, Isabelle Santos de Menezes, que é uma pessoa extremamente importante na minha vida e que está ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu orientador, Prof. Jaiver Efren Jaimes Figueroa, por ter confiado no meu trabalho e pela ótima orientação.

Pelo meu namorado, Ivailson Lobo Santos pela parceria de sempre e por estar ao meu lado torcendo e vibrando desde o início.

Aos meus amigos Lailson, Mona Mellissa e Carla que estiveram comigo durante todo o curso me motivando, ensinando e apoiando.

Ao meu gestor do estágio, Luiz Brito que me deu as orientações necessárias e a grande oportunidade de desenvolver esse projeto.

*“Lembre-se que as pessoas podem tirar tudo de
você, menos o seu conhecimento.”*

Albert Einstein

MENEZES, Emanuelle Santos de. **Avaliação Técnica de Caldeiras a Óleo (Package Boilers), Utilizando Simulação de Processos**. 2022. 51 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

RESUMO

Produção de vapor é de grande valia para boa parte das indústrias atualmente, já que ela é necessária em boa parte dos processos industriais. A modelagem de processo também vem sendo uma importante ferramenta utilizada nas indústrias, elas podem ser utilizadas para diversos fins, como melhorar os parâmetros de controle e otimizar os processos. Com isso, o presente trabalho tem a finalidade de realizar a modelagem computacional de caldeiras a óleo de uma empresa Empresa Multinacional de São Luís, utilizando o software ASPEN PLUS. Os estudos de caso apresentados estão relacionados com a diminuição do consumo de óleo BPF. Os resultados obtidos através desse trabalho foi um modelo validado, comprovação da baixa acuracidade dos instrumentos de vazão de óleo, valor calculado pelo modelo bem próximo da realidade de consumo de óleo BPF e eficiências das caldeiras abaixo do esperado. Em relação ao estudo de caso o aconselhável para otimização do processo é que as caldeiras que produzem 55 t/h de vapor operem com uma vazão de óleo de 4 t/h e as que produzem 35 t/h de vapor trabalhem na faixa de consumo de BPF em 2,5 t/h. Como recomendações se sugere a calibração dos instrumentos do sistema e a instalação de um outro medidor de vazão.

Palavras-chave: Eficiência energética. BPF. Vapor. Modelagem.

SANTOS, A. T. **Technical Assessment of Oil Boilers (Package Boilers), Using Process Simulation.** 2022. 51 f. Graduate Work (Graduate in Chemical Engineering) – Curso de Engenharia do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2022.

ABSTRACT

Steam production is of great value to most industries today, as it is required in most industrial processes. Process modeling has also been an important tool used in industries, they can be used for various purposes, such as improving control parameters and optimizing processes. With this, the present work has the purpose of carrying out the computational modeling of oil boilers of a company Multinational Company of São Luís, using the ASPEN PLUS software. The case studies presented are related to the decrease in BPF oil consumption and the behavior of the gases released by combustion. The case studies presented are related to the reduction of BPF oil consumption. The results obtained through this work were a validated model, evidence of the low accuracy of the oil flow instruments, a value calculated by the model very close to the reality of BPF oil consumption and boiler efficiencies below expectations. Regarding the case study, it is advisable to optimize the process for boilers that produce 55 t/h of steam to operate with an oil flow of 4 t/h and those that produce 35 t/h of steam to work in the range of consumption of GMP at 2.5 t/h. As recommendations, it is suggested to calibrate the system instruments and install another flow meter.

Keywords: Energy efficiency. BPF. Stem. Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Caldeira flamotubular.....	04
Figura 2 – Caldeira aquatubular.	05
Figura 3 – Modelo do ASPEN PLUS para cadeiras da fase 1.....	17
Figura 4 – Modelo do ASPEN PLUS para cadeiras da fase 2.....	17
Figura 5 – Ilustração de um dos tanques de óleo do processo.....	18
Figura 6 – Valores da vazão de ar na caldeira A versus produção de vapor, para 3, 3,5 e 4 t/h de vazão de óleo BPF.	26
Figura 7 – Valores da vazão de ar na caldeira B versus produção de vapor, para 2,5, 3 e 3,5 t/h de vazão de óleo BPF.	26
Figura 8 – Valores da vazão de ar na caldeira C versus produção de vapor, para 3, 3,5 e 4 t/h de vazão de óleo BPF.	27
Figura 9 – Valores da vazão de ar na caldeira D versus produção de vapor, para 2,5, 3 e 3,5 t/h de vazão de óleo BPF.	27

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação de resultados de vazão de óleo BPF pelo nível x ASPEN x instrumento da fase 1.....	21
Tabela 2 – Comparação de resultados de vazão de óleo BPF pelo nível x ASPEN x instrumento da fase 2.....	21
Tabela 3 – Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira A.....	22
Tabela 4 – Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira B.....	22
Tabela 5 – Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira C.....	23
Tabela 6 – Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira D.....	24

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPF	Baixo Ponto de Fluidez
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
COCO	CAPE-OPEN to CAPE-OPEN
FORTTRAN	Formula Translation
ABMA	American Boiler Manufactures Association
FSplit	Divisor de Corrente
RYield	Reator de Rendimento
RGibbs	Reator de Gibbs
Heater	Trocador de Calor
BROYDEN	Quasi-Newton method
BOBYQA	Bound Optimization BY Quadratic Approximation

LISTA DE SÍMBOLOS

°C	graus celsius
t	tonelada
h	horas
ppm	partes por milhão
psig	pounds per square inch gauge
nmch	normal metro cúbico por hora
U\$	Dólar
%	Percentual

SUMÁRIO

	FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
	DADOS CURRICULARES.....	iii
	DEDICATÓRIA.....	iv
	AGRADECIMENTOS.....	v
	EPÍGRAFE.....	vi
	RESUMO.....	vii
	ABSTRACT.....	viii
	LISTA DE FIGURAS.....	ix
	LISTA DE TABELAS.....	x
	LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xi
	LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
	SUMÁRIO.....	xiii
1	INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA.....	01
2	OBJETIVOS.....	03
2.1	Objetivos gerais.....	03
2.2	Objetivos específicos.....	03
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	03
3.1	Caldeiras.....	03
3.1.1	O que é uma caldeira.....	03
3.1.2	Tipos de caldeiras.....	04
3.2	Caldeiras aquatubulares.....	05
3.3	Componentes da caldeiras.....	07
3.3.1	Tubulão superior e inferior.....	07
3.3.2	Queimador.....	07
3.3.3	Fornalha.....	07
3.3.4	Superaquecedor.....	08
3.3.5	Pré-aquecedor de ar.....	08
3.3.4	Ventiladores.....	09
3.3.4	Exaustores.....	09
3.3.4	Simulação de processo.....	09
3.3.4	Simuladores.....	10

3.3.4	ASPEN PLUS.....	11
3.7	SIMULAÇÃO BASE.....	12
3.7.1	Definição dos componentes e modelo termodinâmico a ser usado.....	12
3.7.2	Arquitetura da simulação base que represente a caldeira.....	13
4	METODOLOGIA.....	13
4.1	Simulação base.....	14
4.1.1	Coleta de dados experimentais das variáveis de entrada e de saída do processo a ser simulado.....	14
4.1.2	Simulação base e avaliação de resultados.....	14
4.2.	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	18
4.3.	ANÁLISES DE CASOS DE ESTUDO.....	19
4.4.	CÁLCULO DE EFICIÊNCIA.....	19
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	20
5.1.	VALIDAÇÃO DO MODELO.....	20
5.2.	EFICIÊNCIA COMPARADA COM A DO FABRICANTE.....	21
5.3.	CASO DE ESTUDO.....	25
6	CONCLUSÃO.....	27
	REFERÊNCIAS.....	28
	ANEXO A.....	32

1 INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVA

A utilização do calor em diversos setores industriais é essencial nos principais processos de fabricação, para suprir as necessidades de energia. Sem o aporte de energia térmica em quantidades generosas e com alta qualidade não existiria a sociedade moderna, com seu padrão de vida e seus altos níveis de consumo de bens e serviços. De um modo quase absoluto, essa energia provém de sistemas de vapor (NOGUEIRA, 2005).

Na segunda revolução industrial o vapor era a grande fonte de energia, mas, com o passar dos anos, foi trocado por outras fontes de energia mais baratas e de melhores rendimentos. Atualmente, com a extensa busca de novas fontes de energia renovável para a produção de energia, tanto em grandes centros como em lugares remotos, o vapor voltou ter posição de destaque como forma de energia, usando biomassa, resíduos agrícolas, resíduos urbanos ou subprodutos industriais como meios para sua produção. Nesse contexto, as caldeiras que são o princípio das centrais termelétricas a vapor, têm grande destaque, pois elas podem suprir amplamente os mais diversos processos industriais que utilizam vapor como meio de aquecimento e ao mesmo tempo produzir energia elétrica (BAGGIO, 2018).

Uma caldeira aquatubular é um dispositivo utilizado para mudar o estado da água de líquido para vapor, a fim de ser usada em aquecimento, acionamento de máquinas, processos industriais, esterilização e geração de energia elétrica. Naturalmente, a preferência pelo vapor d'água como fluido de trabalho é justificada pelo fato de ser uma substância facilmente disponível, pouco agressiva quimicamente e com grande capacidade de transportar energia. Na geração e na utilização do vapor ocorrem mudanças de fase, tanto na vaporização quanto na condensação, que causam grandes variações de volume, resultando em elevado coeficiente de transferência térmica, que, somado à alta densidade energética (calor latente) do vapor, produz elevadas taxas de transferência de calor por unidade de área (NOGUEIRA, 2005).

O Balanço Energético Nacional, com dados de 2021 estimou que 32,3% da demanda total de energia no Brasil foi usada pela indústria e boa parte dela é associada ao vapor (BEN, 2022). Sob tais condições, gerando o calor em um local apropriado, produzindo vapor de água, transportando esse vapor a outro ponto, e aí então empregando grande parte do calor transportado, operam milhares de sistemas de vapor no Brasil e no mundo, que respondem pelo consumo da maior parte de combustível demandado pelo setor industrial (NOGUEIRA, 2005).

As empresas estão em constante busca de novas tecnologias que aumentem sua produtividade em um menor tempo e com uma qualidade maior, com a finalidade de minimizar os custos e conseqüentemente aumentar seus lucros (SILVERIO, 2012). Com isso, os sistemas

de geração de vapor precisam garantir o bom uso do combustível, de forma a diminuir o desperdício de energia térmica. Uma forma de conhecer o desempenho de uma caldeira é mediante o cálculo do rendimento térmico. Este parâmetro é de suma importância para unidades fabris, o qual leva em consideração a proporção da transformação da energia do combustível em vapor de processo. Assim, quanto mais perdas de calor houver, menor será o rendimento térmico, isso faz com que se queime mais combustível para produzir a mesma quantidade de vapor, tornando todo o processo de geração de vapor mais oneroso (SENGER, 2015).

Medidas de mudanças de padrões e hábitos de consumo podem ser adotadas em curto prazo e sob custos reduzidos, sem exigir grandes investimentos. Deste modo, cada vez mais se torna evidente que usar bem a energia e reduzir desperdícios, além de ser possível, é uma postura inteligente e com vantagens econômicas, sociais e ambientais em vários níveis. É exatamente esse o objetivo do presente estudo, oferecer um conjunto de informações acessíveis, consistentes e de aplicação imediata para os usuários de um sistema a vapor de uma Empresa Multinacional de São Luís, que ao reduzir suas possíveis perdas, pode melhorar, desde o ponto de vista energético e ambiental, seus resultados e sua eficiência.

Para expressar o funcionamento de uma cadeia aquatubular que utiliza óleo BPF (baixo ponto de fluidez) é possível criar um modelo para simular os processos reais da mesma, através disso, eles podem ser usados para auxiliar no ajuste dos melhores parâmetros de controle para obter o melhor desempenho técnico e econômico da planta.

Por falta de um controle mais preciso da vazão de alimentação desse óleo se faz necessário um balanço energético e modelagem em software específico para calcular sua eficiência e o consumo de óleo da caldeira. Esses modelos retratam as principais dinâmicas de gases, vapor e água da caldeira, para posterior aplicação em simuladores e desenvolvimento de futuros testes de estratégias de controle e otimização.

Usando como base simulações realizadas no *software* Aspen Plus e análise do mecanismo das caldeiras, este trabalho propõe um método para simular a produção de vapor e determinar os parâmetros mais recomendados das caldeiras a óleo. O modelo simplificado das caldeiras de processo é construído usando o Aspen Plus por meio de suposições de processos parciais das caldeiras, e verificados por valores experimentais de indústria. O modelo é então aplicado ao estágio real da indústria para analisar os efeitos do estágio de combustão. O modelo de processo das caldeiras delineado neste trabalho descreve os processos-chave das reações físicas e químicas nas caldeiras. Assim, pode ser usado para estudar os principais parâmetros de operação e design que influenciam no consumo de óleo através dos constituintes dos gases

de combustão, de modo a fornecer suporte de dados para otimizar a produção de vapor (ZHANG *et al.*, 2010).

2 OBJETIVO

2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste estudo é avaliar a eficiência térmica de caldeiras alimentadas com óleo BPF para produção de vapor superaquecido em empresa multinacional localizada na cidade de São Luís.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- 1- Desenvolver um modelo para simulação do processo de produção de vapor usando o software ASPEN PLUS;
- 2- Calcular a eficiência térmica das caldeiras;
- 3- Calcular o consumo de óleo BPF nas caldeiras;
- 4- Propor melhorias para o aumento do rendimento térmico com base no diagnóstico realizado.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 CALDEIRAS

3.1.1 O que é uma caldeira

Água e vapor são comumente usados como transportadores de calor em sistemas que envolvem aquecimento. Sob pressão atmosférica, a água ferve e evapora a 100 °C, quando a pressão é maior, a temperatura de evaporação também aumenta. Durante o processo de evaporação, a pressão e temperatura são constantes, mas é necessário fornecer uma quantidade considerável de energia (calor latente) ao processo, obtendo vapor superaquecido. Nestas

condições o vapor contém toda essa energia que pode assim ser utilizada de forma eficaz nos processos que requerem calor (FONSECA, 2009).

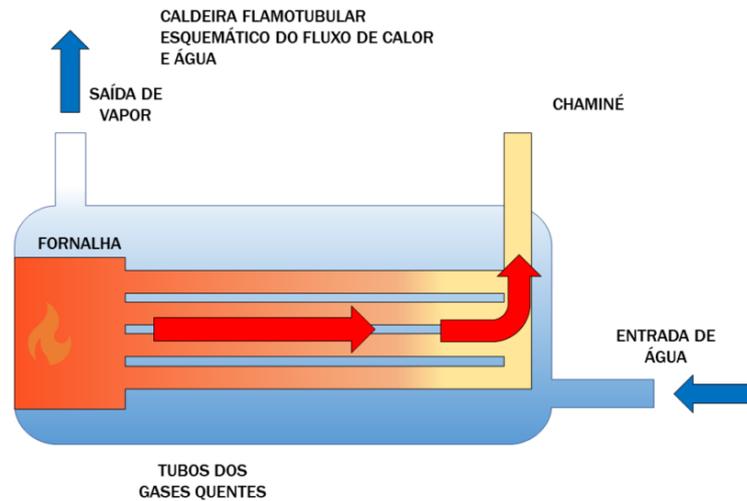
Quando se fala em caldeiras, logo pensa-se em uma panela de pressão gigante. No entanto, a função de uma caldeira, é gerar calor, que aquece água que vem do tubulão (compartimento onde passa toda a água utilizada para gerar vapor), gerando assim o vapor (SILVÉRIO, 2012). Ou seja, uma caldeira a vapor pode ser descrita como um recipiente parcialmente cheio de água líquida, ao qual é fornecido uma quantidade de calor pelo processo de combustão para evaporar a água. A tarefa da caldeira num processo de evaporação é transformar a água de alimentação em vapor nas condições necessárias de utilização para um determinado processo (FONSECA, 2009; MINISTÉRIO DO TRABALHO, 2006).

As caldeiras são compostas por dois sistemas básicos separados: o sistema vapor-água e ar-combustível. No primeiro sistema o elemento principal é a água que recebe o calor através de tubos que compõem o equipamento para então ser convertido em vapor, já no sistema ar-combustível é formado pelos componentes essenciais para a produção de chama, que são misturados e queimados controladamente para converter energia química em energia térmica (BEGA, 2003).

3.1.2 Tipos de caldeiras

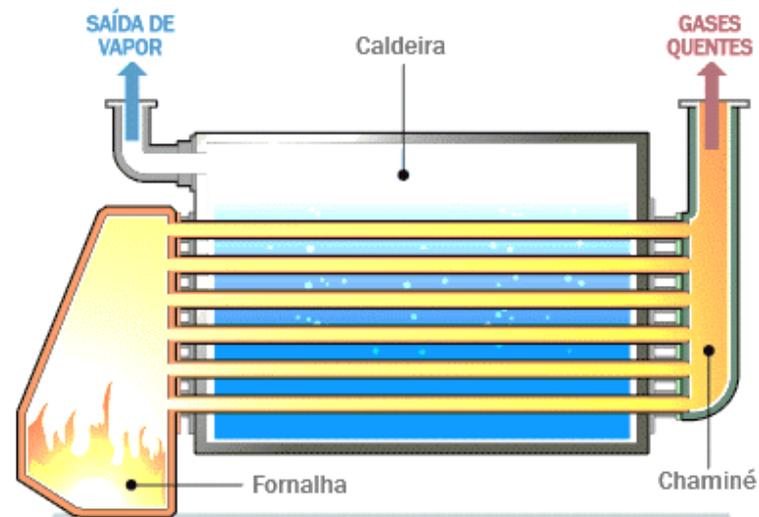
Basicamente, as caldeiras podem ser classificadas em dois tipos: as flamotubulares representada pela FIGURA 1, que costumam ser mais simples, onde os gases de combustão passam por dentro dos tubos internos, transferindo o calor para a água depositada na parte externa dos tubos; e as aquatubulares representada pela FIGURA 2, que podem ser utilizadas para qualquer faixa de pressão de vapor, onde a água passa por dentro dos tubos e os gases da combustão se deslocam externamente as paredes desses tubos. Quanto maior o resfriamento, maior será a quantidade de energia transferida e, conseqüentemente, maior será a eficiência do equipamento. No geral, as caldeiras aquatubulares possuem um processo de geração de vapor mais complexo que as flamotubulares (MELLER, 2014).

FIGURA 1: Caldeira flamotubular.



Fonte: Togawa Engenharia (2020).

FIGURA 2: Caldeira aquatubular.



Fonte: Fábrica do Projeto (2010).

3.2 CALDEIRAS AQUATUBULARES

As caldeiras aquatubulares também podem ser chamadas de tubos de água e é o que há de mais moderno para geração de vapor. Nela, a água e vapor circulam no interior dos tubos vaporizadores, a água absorve o calor proveniente dos gases de combustão, pois a superfície externa dos tubos está em contato com esses gases. Esse tipo de caldeira tem maior potencial de produção de vapor, atinge pressões elevadas e altas temperaturas ao comparar com outros tipos de caldeiras (BAGGIO, 2018).

Por meio do calor gerado na fornalha, a circulação da água nas caldeiras ocorre por diferença de densidade, provocada pelo aquecimento da água e vaporização, ou seja, circulação natural. Quando há aumento na capacidade da caldeira, e seu relativo aumento de tamanho, por consequência, criará maiores perdas de cargas no circuito hidráulico, tornando a circulação natural inviável, e assim, o uso de bombas se faz necessário. Originando as caldeiras de circulação forçada. Nesse tipo de caldeira a capacidade de geração de vapor é muito maior, podendo chegar até a 1000 t/h com pressões extrapolando 200 bar e temperaturas superiores à de 450 °C (BAGGIO, 2018).

Uma das diferenças das caldeiras aquatubulares comparadas com as flamotubulares é que elas são mais complexas e necessitam de equipamentos auxiliares para seu funcionamento (ventiladores, exaustores, bombas, alimentadores). Devido sua estrutura interna ser dividida em coletores e tubos de pequeno diâmetro, possui melhor transmissão de calor. O rendimento térmico é de 80 % a 82 % ou maiores em caldeiras que possuem superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar (TORREIRA, 1995).

As caldeiras aquatubulares são geralmente formadas pelos seguintes componentes: tubulão superior, tubulão inferior, tubos ascendentes, tubos descendentes, fornalha e queimadores. Estes componentes fazem parte da estrutura básica de uma caldeira aquatubular que produz vapor saturado, mas os sistemas de geração de vapor também podem produzir vapor superaquecido, para isso acontecer é necessário que outros equipamentos sejam acrescentados à caldeira equipamentos como os superaquecedores e os pré-aquecedores (MELLER, 2014).

Em caldeiras aquatubulares onde a geração de vapor é complexa e envolve diversas variáveis, é possível considerar duas como sendo as de maior importância para a estratégia de controle: a pressão de vapor na saída do equipamento e o nível de água no tubulão superior (BEGA, 2003). O controle de nível é bastante complexo devido à contração e expansão apresentada no tubulão. Esta movimentação cria zonas que apresentam falsos valores de nível mínimo, que podem induzir atuações de controle fora da realidade e são causadas pela presença de bolhas de vapor abaixo da superfície do líquido, causadas pela dinâmica de entrada e saída de calor e massa (ASTROM; BELL, 2000).

A faixa de controle do nível deve ser pequena para que o equipamento não sofra com os dois extremos de medição. O nível baixo poderia deixar os tubos internos da caldeira sem água, o que causaria a fusão do material devido às altas temperaturas. O nível alto poderia gerar o arraste de água líquida através da corrente de vapor, reduzindo a qualidade do produto final e a eficiência do equipamento. Já a pressão deve ser controlada, pois normalmente o vapor gerado no equipamento é utilizado para acionar turbinas de geração de energia, e sua pressão deve ser

mantida numa faixa de variação restrita para garantir a estabilidade destes equipamentos. O controle de pressão é realizado atuando diretamente no sistema de combustão, que por sua vez é função das vazões de combustível e de ar que são inseridas na caldeira (BEGA, 2003).

3.3 COMPONENTES DA CALDEIRA

Os principais componentes de uma caldeira aquatubular são: tubulão superior, tubulão inferior, queimador, fornalha, superaquecedor, pré-aquecedor de ar, ventiladores e exaustores.

3.3.1 Tubulão superior e inferior

O tubulão superior é um corpo cilíndrico localizado na parte superior da caldeira que recebe a água de alimentação já tratada para ser distribuída para as paredes de água e feixes de tubos. As caldeiras podem ter um ou mais tubulões interligados por feixes de tubos. À medida que a água vai passando pelos feixes de tubos e parede de água ela vai evaporando, retornando ao tubulão superior no estado de vapor saturado, já o tubulão inferior costuma ter apenas água saturada (FILHO, 2014).

3.3.2 Queimador

O combustível é levado através das tubulações até o queimador onde é feita a mistura com o ar de combustão e através da ignição obtêm-se finalmente a chama. A ignição é obtida automaticamente pelo sistema elétrico com ignitor alimentado com algum tipo de óleo tipo o GLP.

3.3.3 Fornalha

As funções principais da fornalha é evaporar as substâncias voláteis do combustível, elevar à temperatura e realizar a combustão (BUECKER, 2002), ou seja, onde a energia química do combustível é convertida em energia térmica. A fornalha é constituída de tijolos refratários para que o calor seja irradiado no interior, sendo que para a fixação desses tijolos também se utiliza argamassa refrataria. Para combustíveis sólidos, as fornalhas são equipadas com grelhas, já para combustíveis líquidos e gasosos utiliza-se queimadores (BAZZO, 1995).

Existem dois tipos de fornalhas: de queima sobre suporte e de queima em suspensão. A primeira delas engloba as fornalhas que queimam combustíveis sólidos (carvão, lenha) a granel, grosseiramente divididos, picados e britados, fazendo uso de grelhas fixas, inclinadas, basculantes ou rotativas (PERA, 1990). As fornalhas de queima em suspensão queimam combustíveis líquidos, gasosos ou sólidos pulverizados, onde se tem um queimador responsável pela combustão homogênea na fornalha. Já os combustíveis sólidos como carvão mineral, são previamente preparados em moinhos, onde são realizados os processos de moagem e de secagem, a fim de obter a granulometria desejada para a queima (LORA e NASCIMENTO, 2004).

3.3.4 Superaquecedor

Os gases resultantes da combustão são forçados a passar sobre os tubos do superaquecedor onde é absorvida uma parte de calor neles contido. Os superaquecedores são trocadores de calor que tem função de aumentar a temperatura do vapor saturado a fim de tornar vapor superaquecido. Existem vários motivos para superaquecer o vapor, sendo um deles o aumento da eficiência térmica (TORREIRA, 1995).

Segundo TORREIRA (1995), os superaquecedores podem ser classificados como de convecção, radiação ou combinados. Os superaquecedores por convecção estão localizados na área de convecção da caldeira, sendo próxima a saída de gases da fornalha. A temperatura do vapor se eleva com aumento da carga da caldeira, isso se deve ao aumento do fluxo de gases de exaustão. Os superaquecedores por radiação estão localizados na fornalha, e sendo assim, recebem calor por radiação direta. A temperatura do vapor diminui com o aumento da carga da caldeira.

3.3.5 Pré-aquecedor de ar

O pré-aquecedor de ar tem a função de aquecer o ar (agente oxidante) de combustão antes de injetá-lo na fornalha. Para o pré-aquecimento utiliza-se um trocador de calor, tendo como fluido a temperatura mais alta os gases de exaustão e o fluido a temperatura mais baixa o ar de alimentação (GILMAN, 2010). Devido que a troca térmica acontecer entre dois compostos gasosos, normalmente são necessárias grandes superfícies de contato, por isso, pré-aquecedores de ar são equipamentos volumosos (BIZZO, 2003). Segundo PERA (1990) a redução de cada

20 °C na temperatura dos gases de exaustão significa um aumento do rendimento da caldeira da ordem de 1%.

3.3.6 Ventiladores

O ar, na temperatura ambiente, é insuflado por ventiladores que são responsáveis pelo fornecimento de ar necessário para a combustão (FILHO, 2014).

3.3.7 Exaustores

Como a maioria das caldeiras possuem pré-aquecedores, é necessário o uso de exaustores para auxiliar no processo de retirada dos gases de exaustão devido à perda de carga que ocorre da passagem dos gases de exaustão pelo pré-aquecedor de ar. De forma mais clara, o exaustor é o local onde acontece a liberação dos gases de combustão para a atmosfera. Este é dimensionado de maneira que a altura e diâmetro sejam apropriados a fim de produzir a tiragem requerida para a boa circulação dos gases de combustão (FILHO, 2014).

3.4 SIMULAÇÃO DE PROCESSO

Desde a antiguidade, os homens procuram descrever matematicamente sistemas reais para buscar a solução de problemas relacionados a eles, entretanto, representar esses sistemas e fenômenos através de modelos matemáticos sempre foi um grande desafio, já que modelos confiáveis muitas vezes são inviáveis devido aos custos computacionais para serem feitas as simulações, mas conforme a tecnologia computacional avança, cada vez mais os modelos realísticos podem ser testados. Mesmo que o modelo completo seja obtido, muitas vezes são limitados pelas informações dos parâmetros, que nem sempre são conhecidos (BAGGIO, 2018).

O recurso de simulação de processos tem sido bastante utilizado pelas indústrias como uma ferramenta importante durante a fase inicial de elaboração do projeto e também durante a operação, com a planta em funcionamento. Conforme Nauman, Petersen e Wohlin (2014) é possível listar alguns benefícios da realização de simulações na indústria: redução de custos do empreendimento; melhora na confiabilidade das condições de contorno; avaliações de riscos mais assertivas; possibilidade de realização de avaliações de baixo custo de diferentes

tecnologias; propicia as ferramentas para a realização de treinamento antes mesmo da planta entrar em operação.

A modelagem matemática tem a função de representar a realidade física dos fenômenos. A obtenção de uma solução numérica para um problema físico está ligada à capacidade de criar um modelo matemático que represente este problema. Os modelos podem ser de ordem fenomenológica quando buscam descrever os fenômenos principais envolvidos no processo, ou de ordem empírica quando o processo é tratado como uma caixa preta e são desconsiderados os mecanismos de causa e efeito entre suas variáveis dependentes e independentes (ISHIDA, 2017).

A construção de um modelo de processo engloba as seguintes etapas: definição do fluxograma; especificação dos componentes químicos do sistema e as condições de funcionamento (MONTEIRO, 2013). Alterações físicas, químicas, ou bioquímicas possibilitadas por operações são responsáveis por transformar um produto em outro, esse grupo de operações é denominado processo (BERTUCCO, 2004; ELISIARIO, 2013).

Ogata (2010) fala que um modelo matemático de um sistema dinâmico é um conjunto de equações que representa a dinâmica do sistema com precisão ou razoavelmente bem. Também diz que um modelo matemático não é único para determinado sistema, pois cada sistema tem suas particularidades. Cita que um modelo de funções de transferência representaria de forma mais funcional um sistema de resposta transitória, resposta em frequência de um sistema linear, invariante no tempo, de entrada e saídas unitárias. Informa ainda, que se deve estabelecer uma conciliação entre a simplicidade do modelo e sua respectiva precisão dos resultados. Então conclui que se deve balancear entre obter um modelo com boa aproximação com um modelo mais realístico ou obter um modelo mais simplificado com sistema não tão representativo (BAGGIO, 2018).

3.5 SIMULADORES

A utilização de um software de simulação no apoio à decisão tem sido cada vez mais importante na implementação de sistemas e sua otimização na indústria. A obtenção de resultados viáveis na simulação de processos industriais (permutas de calor, reações químicas etc.) implica a utilização de um software de simulação confiável e reconhecido pela indústria química. Os simuladores podem ser estacionários, isto é, onde suas variáveis não dependem do tempo. Seus modelos geralmente são aplicados em balanços de massa e energia e processos em equilíbrio. Já os simuladores no estado dinâmico encontram-se mais perto da realidade, seus

modelos levam em conta as características dinâmicas e aspectos de controle. Sendo assim, com esses simuladores também é possível simular a partida e parada de uma planta industrial (ELISIARIO, 2013).

Atualmente existem várias marcas comerciais de simuladores de processo, como: ASPEN HYSYS, COCO, WINSIM DESIGN II, UNISIM entre outros. As características mais importantes de um simulador segundo Cox, Smith e Dimitratos (2006) são: acesso a dados termodinâmicos; biblioteca de operações unitárias; ser extensível; ter um bom processamento de grandes plantas e ser rápido e ter uma boa interface. O engenheiro tem o papel importante de identificar se a simulação está próxima da realidade ou se tornou uma ficção (AGARWAL *et al.*, 2001). Dessa forma, alguns passos podem ser seguidos para executar a simulação da melhor maneira possível, são elas: fazer a análise conceitual do processo levando em conta as limitações físicas e termodinâmicas; utilizar e analisar modelos simplificados para uma primeira simulação e, realizar uma simulação rigorosa nas condições próximas das condições ótimas de operação (BERTUCCO, 2004).

3.6 ASPEN PLUS

O software comercial ASPEN PLUS da ASPENTECH proporciona a realização de estudos de processo através de simulação computacional em estado estacionário e transiente (ASPENTECH, 2008). O software permite modelar uma variedade de processos industriais, incluindo: química, petroquímica e refinação. O programa é composto por uma biblioteca de dados contendo propriedades físicas de um grande número de componentes puros e também de blocos padrão de operação (bombas, permutadores de calor, reatores, compressores, separadores, etc.) que representam equipamentos utilizados na indústria química. Com esses dados diversos ele consegue realizar cálculos de diversas operações que modelam equipamentos constituintes de uma unidade química real e que permitem dimensionar o processo de acordo com o que se pretende (MONTEIRO, 2013).

A simulação de um processo de instalação é realizada mediante a especificação de configuração de operações unitárias, correntes, fluxos de calor e trabalho. As simulações são realizadas pela convergência de algoritmos, permite prever propriedades termodinâmicas e de transporte a partir da escolha de um método de propriedades termodinâmicas e consegue balanços de matéria e energéticos, bem como equações de equilíbrio. Além da unidade de operação de blocos, o ASPEN PLUS utiliza dois mecanismos para simular os processos, os blocos FORTRAN e as especificações de projeto (MONTEIRO, 2013).

Para poder construir um modelo de processo no programa ASPEN PLUS é necessário contemplar os seguintes passos: definição do flowsheet: todas as correntes de entrada do processo têm de estar completamente definidas, assim como as unidades de operação; todos os componentes químicos do processo: reagentes, intermediários e produtos devem ser especificados; condições de operação: tais como temperatura, pressão, etc., têm de ser especificadas para cada unidade de operação (FONSECA, 2009).

3.7 SIMULAÇÃO BASE

3.7.1 Definição dos componentes e modelo termodinâmico a ser usado

Como já foi comentado, um dos objetivos deste projeto consiste na modelagem e simulação das caldeiras de uma Empresa Multinacional de São Luís. Para isso, o software usado foi o simulador de processos químicos ASPEN PLUS. O ASPEN PLUS é um programa de simulação que permite construir o modelo do processo, neste caso o modelo de um sistema de produção de vapor com 4 caldeiras a óleo. Para a construção do modelo das caldeiras se faz necessário entender todos os componentes do processo, um desses componentes é a água que precisa passar por tratamentos adequados antes de entrar na caldeira para evitar uma série de problemas, como: corrosão interna da caldeira, arraste de sólidos da água da caldeira com vapor e formação de depósitos internos.

Para uma operação mais prolongada e sem dificuldades a água precisa passar por desmineralizadores, tratamentos químicos e pode até passar pelos processos de filtração, clarificação e evaporação. Na maioria dos casos, o tratamento da água para a caldeira é usado para eliminar matérias que formam depósitos e ou transformá-las em substâncias inofensivas (STEAM MASTER, 2019).

A água fica armazenada no tubulão superior, seu nível deve ser mantido em torno de 50%. O nível alto provoca o que denominamos “Priming”, isto é, o arrastamento de partículas d’água para o superaquecedor. É natural, entretanto, que o nível d’água sofra variações em função das flutuações da carga. Um componente do tunulão é o distribuidor de água, sua função é fazer com que a água de alimentação entre na caldeira de forma a não causar choques térmicos (STEAM MASTER, 2019).

A outra metade do tubulão é compost por vapor saturado, isso só é possível devido a separadores de vapor que ficam dentro do equipamento, sua função é separar as gotículas de

água que são arrastadas pelo vapor. Na parte inferior existem tubos de drenagem da água que foi separada do vapor que descarregam abaixo do nível de água da caldeira.

Outro componente bastante importante para a geração de vapor em caldeiras industriais é o ar, este é obtido através de um ventilador, que proporciona a quantidade de ar suficiente insuflando-o e levando por intermédio dos dutos de ar até o pré-aquecedor de ar a gás e depois até a fornalha para alimentar a combustão. Como esse tipo de caldeira é de fornalha pressurizada, o ventilador além de fornecer ar para combustão ele leva o produto da combustão que são os gases até a chaminé (STEAM MASTER, 2019).

Combustível é todo e qualquer material, natural ou artificial capaz de reagir com o oxigênio do ar, liberando calor e luz. Nas caldeiras desse estudo o combustível é óleo BPF que é levado através das tubulações até o queimador onde é feita a mistura com o ar de combustão. Para a ignição acontecer é necessário também a utilização de óleo diesel e ar de atomização. A queima de combustível ocorre na fornalha, onde o calor é transferido por meio de irradiação para as paredes que são resfriadas com água, exceto a parede do queimador, que é revestida com refratário (STEAM MASTER, 2019).

Após a mistura do combustível com o ar, o queimador lançará essa mistura na fornalha. Na parte traseira da fornalha, os gases de combustão entram na passagem da seção de convecção onde, por transferência de calor de convecção, os gases são esfriados. Os tubos da caldeira situados na zona mais aquecida da passagem de convecção geram vapor enquanto os tubos situados nas proximidades da saída dos gases atuam como vertedores (downcomers), suprimindo água para todos os tubos geradores, inclusive aqueles que formam a fornalha (STEAM MASTER, 2019).

3.7.2 Arquitetura da simulação base que represente a caldeira

As 4 caldeiras a óleo da Empresa Multinacional de São Luís são divididas em 2 fases com 2 caldeiras cada uma. A primeira fase é constituída pela caldeira A que tem capacidade de produzir até 55 t/h de vapor superaquecido e a caldeira B com produção máxima de 35 t/h. Na fase 2 a distribuição é bem parecida, funciona a caldeira C com produção de até 55 t/h e a caldeira D com produção máxima de 35 t/h. No geral, essas caldeiras conseguem suprir uma boa parte da produção de vapor da refinaria quando em funcionamento.

4 METODOLOGIA

4.1 SIMULAÇÃO BASE

4.1.1 Coleta de dados experimentais das variáveis de entrada e de saída do processo a ser simulado

Os passos seguidos para a coleta dos dados foram:

- Contato com os responsáveis pela área, os quais, disponibilizaram toda a informação possível (manuais, curvas do fabricante e dados historizados);
- Construção de um fluxograma que simule o processo de geração de vapor;
- Visitas no local da instalação para melhor compreensão das variáveis que eram consideradas confiáveis e aquelas que necessitavam de um estudo mais aprofundado para serem estimadas;
- Validação do modelo através de medição do nível dos tanques;

4.1.2 Simulação base e avaliação de resultados.

Usando os dados coletados no item anterior foi possível observar que o histórico de dados da vazão de óleo BPF não é considerado verdadeiro, essa conclusão foi tirada com base em testes nos tanques de armazenamento de óleo na área de utilidades da empresa. Com esse teste inicial foi possível a coleta de dados da área para posterior validação dos dados pelo programa de simulação escolhido.

Para construir um modelo de processo no programa ASPEN PLUS é necessário definir todas as correntes de entrada e suas unidades de operação, todos os componentes químicos, desde reagentes, intermediários e produtos e por último todas as condições de operação, como a temperatura, pressão etc. O uso do simulador comercial ASPEN PLUS foi usado devido à parceria do Laboratório de Engenharia de Processos Químicos e Biotecnológicos-LEPQBio do DEEQ/UFMA com o Laboratório de Otimização, Projeto e Controle Avançada-LOPCA da FEQ/UNICAMP.

O software utilizado não apresenta um modelo pré-definido para uma caldeira, com isso foi necessário criá-lo (FIGURA 3 e 4) através dos modelos já existentes. Com este objetivo usaram-se os seguintes blocos: FSplit, RYield, RGibbs e Heater.

De maneira geral, os fluxogramas representam o esquema de funcionamento das caldeiras aquatubulares que possuem uma pressão de vapor de aproximadamente 10 kgf/cm², onde o óleo BPF que entra na alimentação da caldeira é queimado entrando em combustão para

o aquecimento da água que passa pelos tubos da fornalha e posteriormente é transformado em vapor superaquecido e gases de combustão.

A primeira sessão simulada foi realizada no SPLIT e SPLIT1, neles são feitas as divisões de correntes do óleo BPF que sai dos tanques representados pelas correntes de BPF E BPF-2, esse cálculo é feito através do valor de fração mássica que vai pra cada caldeira (valor coletado *in situ*).

A sessão seguinte foi a decomposição do óleo BFP (componente não convencional), isso foi feito porque essa substância não se encontra no banco de dados do ASPEN, essa decomposição foi realizada adicionando a composição elementar do óleo (hidrogênio, carbono, enxofre, oxigênio e nitrogênio, que são componentes convencionais), já que sua estrutura molecular não é conhecida. O reator RYield foi utilizado para esse fim, já que ele é um reator de rendimento e tem como entrada os componentes para os vários produtos da decomposição do óleo (estes valores são calculados no DECOM-A e DECOM-B). As composições médias de cada elemento variaram durante os meses segundo as análises do fornecedor, os valores aproximados foram de: carbono (85-87%), hidrogênio (9,5-10,5%), nitrogênio (0,2-0,3%), enxofre (1,7-2,2%) e oxigênio (0,5-0,8%).

Para a simulação da reação de combustão foi utilizado o reator RGibbs pelo fato de que não é necessário especificar sua estequiometria, mas sim sua pressão e temperatura, tem como correntes de entrada a saída do reator RYield, ou seja, é representado nas Figuras 3 e 4 pelo BURN-A e BURN-B o óleo já decomposto e também a vazão de ar que é de extrema importância para a ocorrência da combustão. A quantidade de ar introduzido foi calculada através das equações que se seguem:

$$\dot{m}_C = X_C * \dot{m}_{BPF} \quad (1)$$

$$\dot{m}_{O_2} = \frac{\dot{m}_C * MM_{O_2}}{MM_C} \quad (2)$$

$$\dot{m}_{O_2 \text{ para comb. completa}} = \frac{\dot{m}_C * MM_{O_2}}{MM_C} + \frac{\dot{m}_{H_2} * MM_{O_2}}{MM_{H_2}} + \frac{\dot{m}_{N_2} * MM_{O_2}}{MM_{N_2}} + \frac{\dot{m}_S * MM_{O_2}}{MM_S} - \dot{m}_{O_2} \quad (3)$$

$$N_{O_2} = \frac{\dot{m}_{O_2 \text{ para comb. completa}}}{MM_{O_2}} \quad (4)$$

$$N_{ar} = \frac{N_{O_2} * 100\%}{21\%} \quad (5)$$

$$m_{ar} = N_{ar} * MM_{ar} \quad (6)$$

$$N_{ar} = \frac{m_{ar}}{MM_{ar}} \quad (7)$$

$$V_{ar} = \frac{m_{ar}}{\rho_{ar}} \quad (8)$$

Onde:

\dot{m}_C = vazão mássica de carbono no óleo BPF

X_C = fração mássica de carbono no óleo BPF

\dot{m}_{BPF} = vazão mássica de óleo BPF

$\dot{m}_{O_2}, \dot{m}_{H_2}, \dot{m}_{N_2}, \dot{m}_S$ = vazão mássica de oxigênio, hidrogênio, nitrogênio e enxofre no óleo BPF

MM_{O_2} = massa molar o oxigênio

MM_C = massa molar do carbono

\dot{m}_{O_2} *para comb. completa* = vazão mássica de oxigênio para uma vazão completa

N_{O_2} = número de mols de oxigênio para combustão completa

N_{ar} = número de mols do ar

m_{ar} = *massa de ar para combustão completa*

MM_{ar} = massa molar do ar

V_{ar} = vazão volumétrica de ar

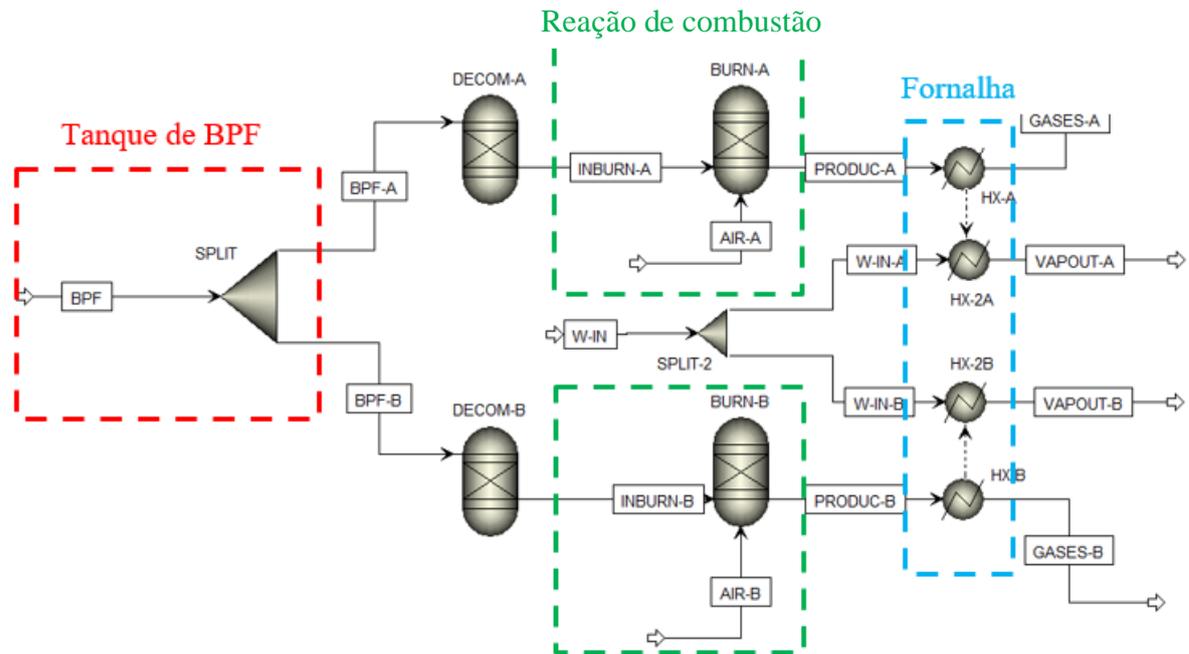
ρ_{ar} = densidade do ar

Para simular todo o processo de troca térmica foram utilizados dois trocadores de calor para cada caldeira, são eles: HX-A, HX-2A, HX-B, HX-2B, HX-C, HX-2C, HX-D, HX-2D, onde o calor que é perdido pelos gases de combustão é cedido para o outro trocador que irá aquecer a água que entra líquida e sai na forma de vapor superaquecido. Os modelos matemáticos utilizados para resolução e convergência dos modelos matemáticos, nas duas fases representadas na Figura 3 e Figura 4, foram o de BROYDEN e BOBYQA.

A função do software utilizada foi a de otimização que foi possível fixar duas variáveis confiáveis, fração de vapor da corrente de vapor superaquecido e temperatura dessa mesma corrente, para calcular a temperatura de saída dos gases e a vazão de óleo BPF (variável essa de maior dúvida neste processo). Essa otimização foi feita através da minimização das variáveis

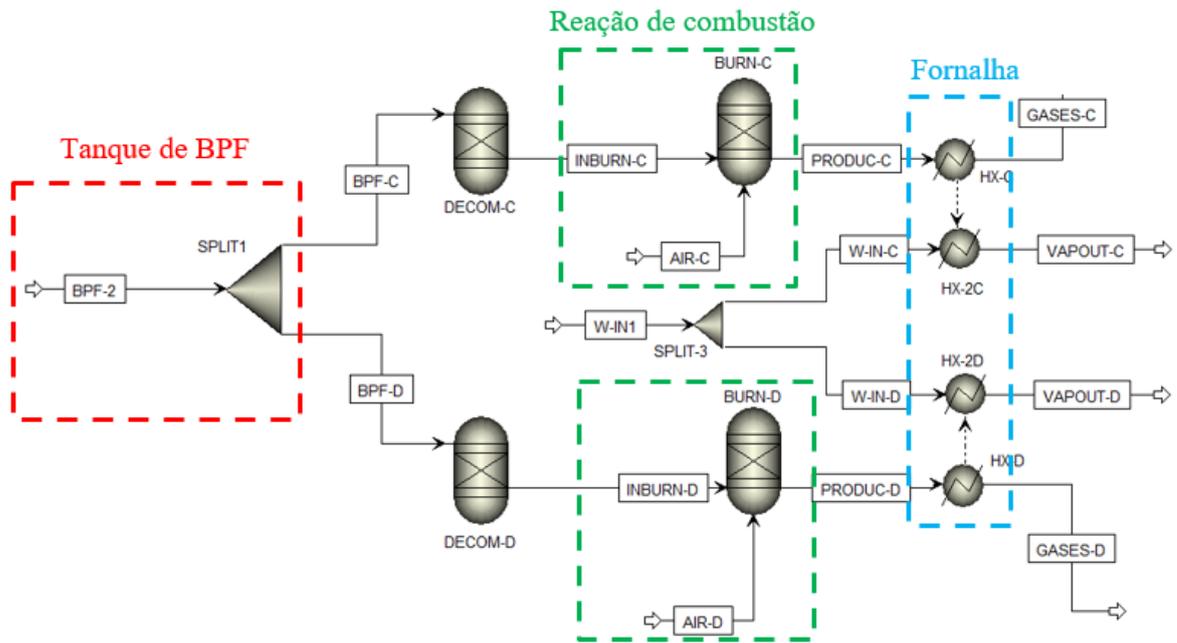
fixadas. Mesmo que não aconteça uma otimização no sentido estrito da palavra, o simulador apresenta como otimização a avaliação de um caso de sensibilidade onde determina a condição que cumpra com as condições definidas.

FIGURA 3: Modelo do ASPEN PLUS para cadeiras da fase 1.



Fonte: Próprio Autor (2021).

FIGURA 4: Modelo do ASPEN PLUS para cadeiras da fase 2.

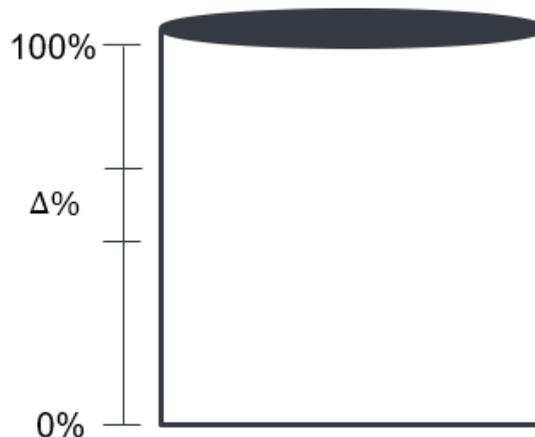


Fonte: Próprio Autor (2022).

4.2 VALIDAÇÃO DO MODELO

Para a realização da validação do modelo se fez necessário uma medição real da vazão de óleo que estava sendo utilizada nas caldeiras para posteriormente comparar com o valor calculado pelo modelo no ASPEN, essa medição só foi possível através da observação da queda do nível dos tanques quando em modo manual, isso só foi possível porque o volume dos tanques são conhecidos, os valores coletados tiveram a duração de 1 hora, abaixo seguem a ilustração de um dos tanques com o nível de 0-100% na Figura 5 e a Equação

FIGURA 5: Ilustração de um dos tanques de óleo do processo.



Fonte: Próprio Autor (2021).

$$Vazão\ de\ óleo = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{\Delta\% * V_{TANQUE} * \rho_{ÓLEO\ BPF}}{\Delta t}$$

Onde:

ΔV = variação de volume

Δt = variação do tempo

$\Delta\%$ = variação percentual de queda do nível do tanque

V_{TANQUE} = volume total do tanque

$\rho_{ÓLEO\ BPF}$ = densidade do óleo BPF

4.3 ANÁLISES DE CASOS DE ESTUDO

O caso de estudo consistiu em estudar como a vazão de ar pode variar de acordo com a vazão de óleo, essa análise será feita fixando a fração de vapor na saída dos gases que tem que ser igual a 1, e será avaliado qual a menor vazão de óleo para uma produção máxima de vapor. Esse estudo de caso tem a função de sugerir uma maneira de economizar combustível.

4.4 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA

Um balanço energético consiste basicamente na obtenção de índices que representam a eficiência de uma caldeira, esse parâmetro indica a perfeição com que o sistema térmico opera. Entretanto, a caldeira depende de uma série de dispositivos, que consomem uma parcela da energia que entra (SEGUNDO, 2014). O método direto tem a vantagem de permitir um cálculo mais rápido da eficiência, pode ser calculada pela equação (9), onde o calor útil é aquele que realmente é utilizado para vaporizar a água e formar o vapor saturado, ou vapor superaquecido, com a vazão desejada. Já o calor disponível, é todo aquele oriundo da combustão, neste caso específico, da queima do óleo.

Segundo Senger (2015), o cálculo do rendimento pelo método direto corresponde ao produto da vazão mássica de vapor e mudança de entalpia entre o estado inicial e final da água, dividida pela energia térmica liberada com o consumo do combustível, nesse método é desconsiderado perdas de calor do processo. Por balanço de energia, ignorando as perdas com o meio ambiente, temos que:

$$Q_{entra} = Q_{sai} \quad (9)$$

Ou seja,

$$\eta_{MD} = \frac{Q_{útil}}{Q_{disponível}} \quad (10)$$

Logo,

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v \cdot (h_v - h_a)}{\dot{m}_c \cdot PC} \quad (11)$$

Onde,

η_{MD} = Eficiência pelo método direto

\dot{m}_v = vazão mássica de vapor, [kg/s];

h_v = entalpia do vapor produzido, [kJ/kg];

h_a = entalpia da água de entrada, [kJ/kg];

\dot{m}_c = vazão mássica de combustível, [kg/s];

PC = poder calorífico do combustível, [kJ/kg].

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 VALIDAÇÃO DO MODELO

Neste tópico são apresentados os resultados obtidos através da modelagem no software ASPEN PLUS. Para as diferentes correntes de vapor do processo são calculadas vazão de ar de combustão, vazão de gases para determinação das vazões de óleo BPF. Dessa forma foi possível observar o comportamento do sistema mediante a mudança das variáveis envolvidas.

As respostas do presente modelo foram comparadas com os dados de instrumentação da planta, medida pelo instrumento de vazão de óleo e a medição real de óleo através da medição física da queda do nível dos tanques. Analisando as tabelas 1 e 2, para as duas fases as diferenças percentuais da vazão de óleo comparando o valor calculado pelo modelo e o instrumento de vazão do processo são muito grandes, quando comparado o resultado do modelo com a vazão calculada através do nível a diferença é bem menor, em torno de 2%. Com o modelo calibrado e comparado com uma vazão mais próxima da realidade é possível validar o cálculo através do ASPEN.

Tabela 1: Comparação de resultados de vazão de óleo BPF pelo nível x ASPEN x instrumento da fase 1.

FASE 1: Caldeiras 11A e 11B						
Data	Hora	Nível ASPEN		Instrumento (t/h)	Diferença	Diferença
		(t/h)	(t/h)		(nível x ASPEN)	(nível x instrumento)
					(%)	(%)
06/11/2021	18:51 - 19:51	3,82	3,87	2,78	1,29	28
22/04/2021	10:33 - 11:33	5,74	5,66	4,98	1,41	12
10/05/2021	14:29 - 15:29	5,84	5,81	4,74	0,51	18
11/05/2021	12:59 - 13:59	5,82	5,53	5,06	4,98	8

Fonte: Próprio Autor (2022).

Tabela 2: Comparação de resultados de vazão de óleo BPF pelo nível x ASPEN x instrumento da fase 2.

FASE 2: Caldeiras 11C e 11D						
Data	Hora	Nível ASPEN		Instrumento (t/h)	Diferença	Diferença
		(t/h)	(t/h)		(nível x ASPEN)	(nível x instrumento)
					(%)	(%)
19/01/2022	23:52 - 00:52	5,53	5,65	4,87	2,12	13
25/01/2022	10:00 - 11:00	5,47	5,59	3,92	2,15	29
25/01/2022	15:59 - 16:59	5,69	5,87	4,07	3,07	30
25/01/2022	17:00 - 18:00	5,48	5,49	3,92	0,18	28

Fonte: Próprio Autor (2022).

5.2 EFICIÊNCIA COMPARADA COM A DO FABRICANTE

Após essa etapa de validação outras análises foram efetuadas para avaliar as caldeiras em estudo, um deles foi o cálculo da eficiência para cada caldeira através da Equação 10. Foram levantados os dados necessários e posteriormente foi feita uma comparação entre as eficiências através do modelo do ASPEN, do flowmeter e de projeto (de acordo com as tabelas 3, 4, 5 e 6). Para calcular a eficiência através do modelo foram utilizadas a média da pressão do vapor, temperatura do vapor e vazão de vapor de cada mês, a vazão de óleo calculada pelo modelo e o valor de PCS de cada mês. A eficiência através do flowmeter foi calculado da mesma forma

mutando apenas o de vazão de óleo BPF que foi utilizado a média do que passou pelo medidor de vazão do processo. Para o cálculo da eficiência de projeto utilizou-se a pressão e temperatura do vapor, vazão de vapor e vazão de óleo da curva do fabricante (localizado no Anexo A) e PCS de cada mês.

Tabela 3: Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira A.

	ASPEN	Flowmeter	Projeto	US\$/h
jan/21	60,8%	84,0%	86%	656,50
fev/21	68,5%	75,9%	85%	188,50
	Não	Não	Não	Não
mar/21	operou	operou	operou	operou
abr/21	75,4%	115,1%	88%	448,50
mai/21	79,0%	108,9%	89%	624,00
jun/21	69,4%	79,0%	87%	253,50
jul/21	60,3%	89,4%	88%	806,00
ago/21	57,1%	96,0%	85%	949,00
set/21	74,2%	101,5%	86%	507,00
out/21	70,9%	86,5%	86%	383,50
nov/21	78,4%	85,4%	86%	156,00
dez/21	60,6%	92,1%	85%	799,50

Fonte: Próprio Autor (2022).

Tabela 4: Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira B.

	ASPEN	Flowmeter	Projeto	US\$/h
jan/21	Não	Não	Informação	Não
	operou	operou	inconsistente	operou
fev/21	68,5%	91,5%	Informação inconsistente	351
mar/21	Não	Não	Informação	Não
	operou	operou	inconsistente	operou

abr/21	57,3%	88,5%	Informação inconsistente	390
mai/21	70,0%	110,8%	Informação inconsistente	598
jun/21	66,4%	112,8%	Informação inconsistente	695,5
jul/21	76,2%	104,9%	Informação inconsistente	383,5
ago/21	71,8%	134,3%	Informação inconsistente	695,5
set/21	71,3%	131,6%	Informação inconsistente	715
out/21	65,6%	117,2%	Informação inconsistente	734,5
nov/21	72,1%	114,8%	Informação inconsistente	435,5
dez/21	74,7%	118,7%	Informação inconsistente	409,5

Fonte: Próprio Autor (2022).

Tabela 5: Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira C.

	ASPEN	Flowmeter	Projeto	US\$/h
jan/21	67,5%	107,8%	86%	767
fev/21	65,1%	106,3%	85%	923
mar/21	Não operou	Não operou	Não operou	Não operou
abr/21	80,4%	98,4%	88%	214,5
mai/21	75,8%	104,4%	89%	624
jun/21	81,4%	110,0%	87%	507
jul/21	57,8%	105,9%	88%	1150,5
ago/21	74,9%	117,3%	85%	611

set/21	72,3%	109,7%	86%	656,5
	Medição	Medição	Medição	Medição
out/21	erro Temp.	erro Temp.	erro Temp.	erro Temp.
	Medição	Medição	Medição	Medição
nov/21	erro Temp.	erro Temp.	erro Temp.	erro Temp.
dez/21	73,3%	96,3%	85%	325

Fonte: Próprio Autor (2022).

Tabela 6: Valores de eficiências calculadas com dados do ASPEN, instrumento e projeto para caldeira D.

	ASPEN	Flowmeter	Projeto	US\$/h
jan/21	Não operou	Não operou	Informação inconsistente	Não operou
fev/21	69,4%	114,3%	Informação inconsistente	598
mar/21	Não operou	Não operou	Informação inconsistente	Não operou
abr/21	Não operou	Não operou	Informação inconsistente	Não operou
mai/21	73,7%	86,5%	Informação inconsistente	221
jun/21	71,1%	102,1%	Informação inconsistente	494
jul/21	85,9%	103,7%	Informação inconsistente	234
ago/21	Não operou	Não operou	Informação inconsistente	Não operou
set/21	Medição erro Pressão	Medição erro pressão	Informação inconsistente	Medição erro pressão

out/21	Medição	Medição	Informação inconsistente	Medição erro pressão
	erro	erro		
	Pressão	pressão		
nov/21	Medição	Medição	Informação inconsistente	Medição erro pressão
	erro	erro		
	Pressão	pressão		
dez/21	Medição	Medição	Informação inconsistente	Medição erro pressão
	erro	erro		
	Pressão	pressão		

Fonte: Próprio Autor (2022).

Com as eficiências calculadas foi possível comprovar a análise que foi feita durante a validação do modelo que a informação de vazão de óleo medida pelo flowmeter em campo é inválida, já que não existem eficiências maiores que 100%. Na caldeira D as informações da curva do fabricante também são inconsistentes, com valores de eficiência maiores que 100% o que não pode ser levado como parâmetro já que não existe eficiência com esses valores. As eficiências baixas calculadas com os valores do modelo do ASPEN se devem a incrustações que podem ocorrer nos tubos, apesar de ser utilizado o dispersante TI1000 ainda é comum ter tubo obstruído devido a água de alimentação da caldeira que não é tratada da forma correta.

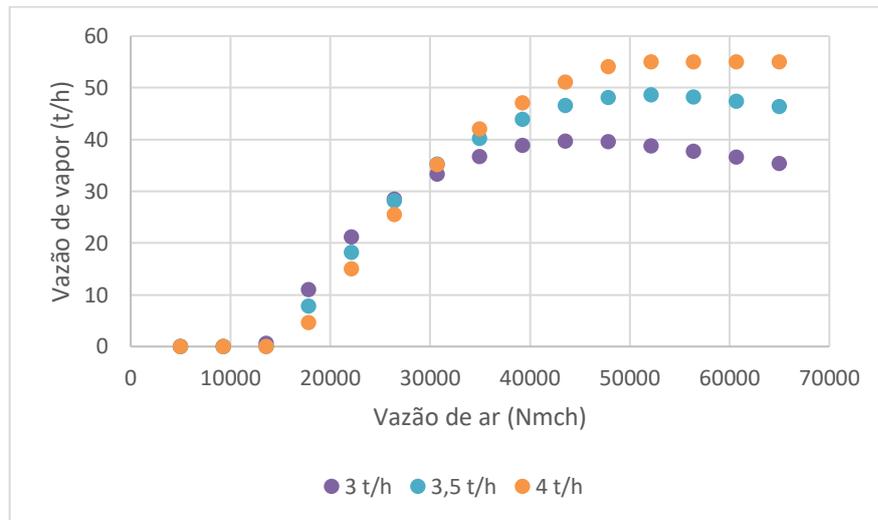
Nas tabelas acima também possuem o quanto em dólar (US\$) a Empresa está gastando a mais com óleo BPF todo mês, considerando o valor de vazão de óleo calculada através do modelo no ASPEN PLUS, número esse bastante impactante quando somado para todas as caldeiras ao ano.

5.3 CASO DE ESTUDO

A caldeira A representada pela Figura 6 e caldeira C representada na Figura 8 são as caldeiras que produzem no máximo 55 t/h de vapor. A partir desses gráficos é possível inferir que apenas para uma vazão de 4 t/h de óleo BPF terá uma produção máxima, com uma vazão de ar de aproximadamente 50000 nmch que indica o valor que uma matéria de massa constante ocupa num determinado espaço em condições padrões.. Já para as caldeiras que produzem até 35 t/h de vapor, representadas na Figura 7 e Figura 9, terão sua produção máxima com todas as vazões de óleo estudadas, e com uma vazão de ar ao redor de 28000 nmch. Logo o desejável é que seja utilizada a menor vazão de óleo para diminuir os custos do processo.

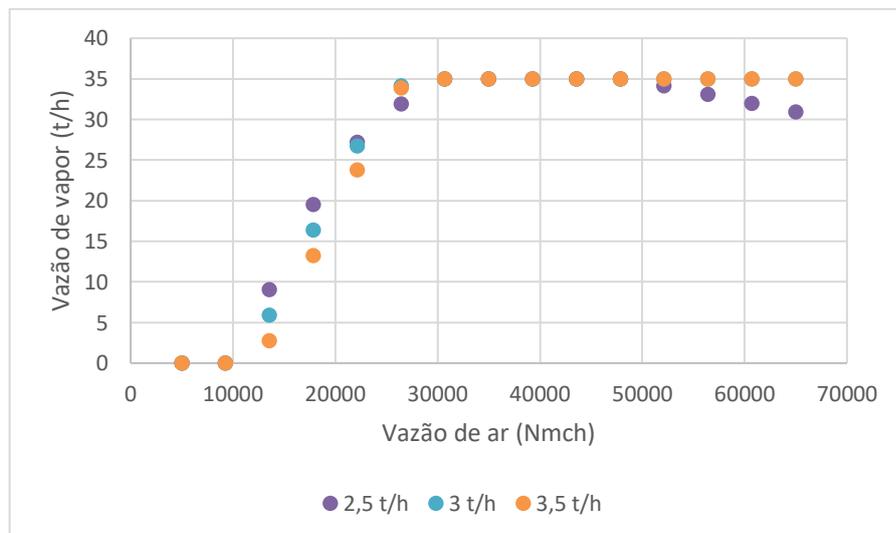
Em todas os estudos de casos abaixo é notório o decaimento da vazão de vapor quando utilizado valores maiores de vazão de ar, isso confirma que para cada caldeira existe um máximo ideal de excesso de ar, pois com valores acima do desejável o ar que é inerte ficará em excesso dentro da caldeira e impactará na temperatura e eficiência dessas caldeiras e consequentemente na produção de vapor.

Figura 6 – Valores da vazão de ar na caldeira A versus produção de vapor, para 3, 3,5 e 4 t/h de vazão de óleo BPF.



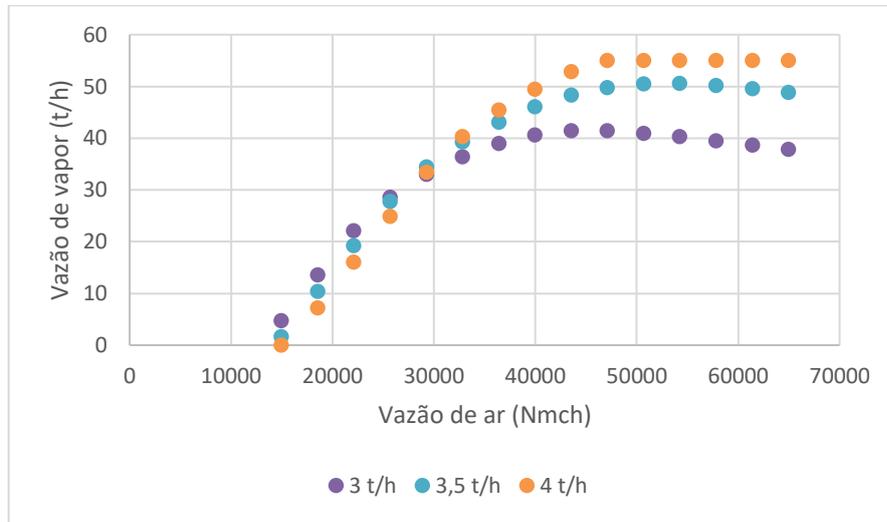
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 7 – Valores da vazão de ar na caldeira B versus produção de vapor, para 2,5, 3 e 3,5 t/h de vazão de óleo BPF.



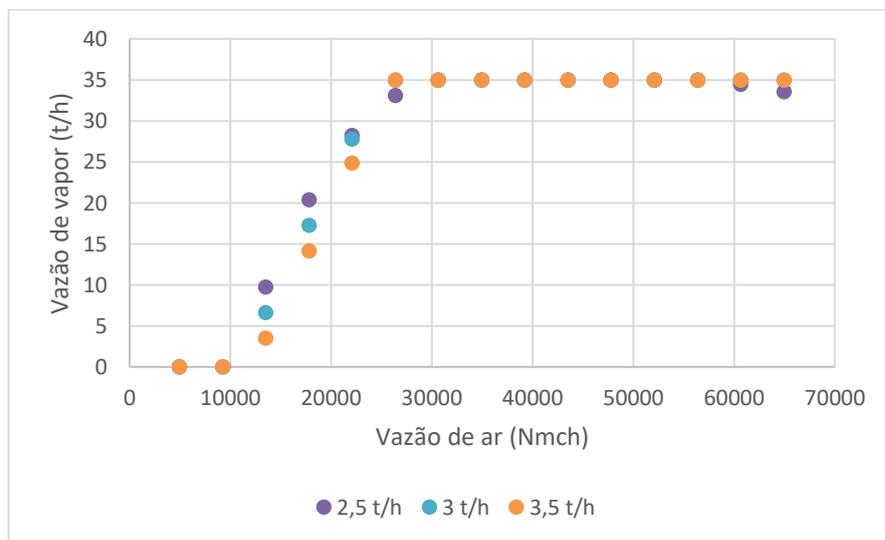
Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 8 – Valores da vazão de ar na caldeira C versus produção de vapor, para 3, 3,5 e 4 t/h de vazão de óleo BPF.



Fonte: Próprio Autor (2022).

Figura 9 – Valores da vazão de ar na caldeira C versus produção de vapor, para 2,5, 3 e 3,5 t/h de vazão de óleo BPF.



Fonte: Próprio Autor (2022).

6 CONCLUSÃO

A conclusão do presente trabalho permite dizer que os objetivos foram alcançados com êxito, foi possível criar e validar o modelo no ASPEN PLUS para as caldeiras estudadas, confirmar a baixa acuracidade dos instrumentos de medição de fluxo de óleo das caldeiras e viabilizar o cálculo da eficiência real da caldeira.

Pode-se concluir também do ponto de vista energético, que as caldeiras da Empresa Multinacional de São Luís operam com uma eficiência abaixo do que aquela sugerida pelo projeto.

De acordo com o estudo realizado é possível concluir que para as caldeiras que produzem mais vapor é desejável utilizar uma vazão de óleo igual a 4 t/h, já que é a única estudada que conseguiu atingir a produção máxima de vapor supersaturado. Já para as caldeiras com menor produção, o aconselhável é a utilização de 2,5 t/h de óleo BPF e 28000 nmch de vazão de ar, com esse cenário pode-se produzir a vazão máxima de vapor supersaturado suportado por essas caldeiras.

No que diz respeito aos próximos passos desse trabalho, sugere-se a calibração dos instrumentos de vazão de óleo ou até mesmo a compra de um medidor novo chamado micromotion e posteriormente um planejamento de testes de otimização baseado no estudo de caso para maximizar a produção e minimizar o consumo de óleo BPF pelas caldeiras.

REFERÊNCIAS

AGARWAL, Rajeev et al. **Uncovering the realities of simulation**. Chemical engineering progress, v. 97, n. 5, p. 42-52, 2001.

ASPEN TECH 2008. **Aspen Plus – Process modeling tool for conceptual design, optimization, and performance monitoring of chemical processes**, (descarregado em 13 de Abril de 2009).

ASTROM, K.; BELL, R. **Drum-boiler dynamics**. Automatica, ISSN 0005-1098, v. 36, n. 3, p. 363 –378, 2000.

BEGA, Egídio A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.

BAGGIO, R. W. O. **Modelagem de uma caldeira flamotubular com fornalha aquatubular**. Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Blumenau, 2018.

BEN. **Relatório síntese 2022 ano base 2021**. BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, Ministério de Minas e Energia, 2022.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. 2ª edição. UFSC, 216p, 1995.

BERTUCCO, A. **The Role of Process Simulation in Sustainable Industrial Development**. In: Expert Group Meeting on: “Process Simulation and Sustainable Industrial Development: Present State-of-the-Air”. November 29-December 1st. San Marino, Italy, 2004.

BIZZO, W. A. **Geração, distribuição e utilização de vapor**. Campinas: FEM/Unicamp, 2003.

BUECKER, B. **Basics of Boiler and HRSG Design**. Oklahoma: Penn Well Corporation, 2002

COX, Robert K.; SMITH, Julie F.; DIMITRATOS, Yiannis. **Can simulation technology enable a paradigm shift in process control: Modeling for the rest of us**. *Computers & Chemical Engineering*. [S.l.], v. 30, n. 10-12, p. 1542-1552, set. 2006.

ELISIARIO, A. C. M. **Simulação computacional e análise paramétrica de uma unidade industrial de descarga e estocagem de amônia líquida pressurizada**. 2013. 115 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2013.

FÁBRICA DO PROJETO. **Manual de Caldeiras – Disposições Gerais**. PASCOAL GOMES, abril, 2010.

FILHO, R. R. A. **Metodologia para análise energética e exergética de uma caldeira aquatubular com queima de bagaço de cana**. Faculdade de Engenharia, UNESP, Bauru, 2014.

FONSECA, A. R. **Eficiência energética e a queima de combustíveis limpos**. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, 2009.

GILMAN, G.; GILMAN, J. **Boiler control systems engineering**. [S.l.]: Isa, 2010.

ISHIDA, S. P. **Análise da eficiência de um reator tubular (PFR) submetido a diferentes modos de alimentação**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Ponta Grossa, 2017.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. v. 1. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2004.

MELLER, G. T. **Desenvolvimento de um simulador de operação de caldeira para treinamento de operadores**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFPR, Curitiba, 2014.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. NR-13: **Manual Técnico de Caldeiras e Vasos de Pressão**. Brasília, 2006.

MONTEIRO, A. L. O. **Simulação da central de cogeração da refinaria de Matosinhos (Petrogal)**. Instituto Superior de Engenharia do Porto, ISEP, 2013.

NAUMAN, Bin Ali; PETERSEN, Kai; WOHLIN, Claes. **A systematic literature review on the industrial use of software process simulation**. The Journal of Systems and Softwares. Article in Press. 2014.

NOGUEIRA, L. A. H. **Eficiência Energética no Uso de Vapor**. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. Prentice Hall, 2010. (Instrumentation and controls series). ISBN 9780136156734. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=Wu5GpNAelzkC>>.

PERA, H. **Geradores de vapor**. 2 ed. São Paulo: Editora Fama, 1990.

SEGUNDO, V. B. S. **Princípio de balanços termoenergéticos em caldeiras geradoras de vapor nas indústrias sucroalcooleiras**. Universidade Federal da Paraíba, UFPB, Centro de Ciência e Desenvolvimento Regional, Paraíba, 2014.

SILVÉRIO, J. T. **Simulador de controle automatizado de geração de vapor**. Fundação Educacional do Município de Assis – FEMA – Assis, 2012.

SENGER, R. **Análise do rendimento térmico de uma caldeira alimentada com lenha em toras**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, UTFP, Ponta Grossa, Paraná, 2015.

TOGAWA ENGENHARIA. **Caldeiras, principais tipos construtivos**. Equipamentos industriais, Vitor Togawa, 2010.

TORREIRA, R. P. **Geradores de vapor**. São Paulo: Companhia Melhoramentos, 1995.

ZHANG, Y. CAO, S.X. SHAO, S. CHEN, Y. LIU, S. L. ZHANG, S. S. **Aspen Plus-based simulation of a cement calciner and optimization analysis of air pollutants emission**. Springer-Verlag, School of Environmental Science and Technology, Dalian University of Technology, Dalian, 2010.

STEAM MASTER. **Manual R4 de operação e equipamentos JPO da Steam Master Equipamentos Térmicos Ltda**. 2019.

ANEXO A – CURVAS DE COMBUSTÃO DO FABRICANTE

Curva Combustão Caldeira Babcock 11-A

Numeros de pontos	Nº	Analisador Portátil de Gases Combustão										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
PT-Vapor Tubulão	kgf/cm ²	10,6	10,8	11,1	11,7	12,3	13,5	14,8	15,3	16	17	
PT-Vapor Super	kgf/cm ²	9,3	9,6	10,1	10,6	11,1	12,5	13,1	13,8	14,2	15	
FT-Vazão Ar	%	5	8,0	15	21	33	48	57	71	84	96	
FT-Vazão de Óleo	kg/h	800	1080	1360	1637	1942	2357	2600	2800	3060	3260	
FT-Vazão de Vapor	T/h	17,4	22	28	33	39,3	44	46	50	52	56	
LT-Nível Água	%	45	46	46	48	45	46	48	45	45	45	
Vapor Atomização	kgf/cm ²	7	7	7,3	7,6	7,7	8,2	8,2	8,3	8,3	8,5	
Óleo Ent. Queimador	kgf/cm ²	3,1	3,8	4,2	4,8	5,2	6,0	6,3	6,6	7,2	7,6	
Pressão Caixa de Ar	mmca	18	30	60	90	120	170	220	290	315	387	
Pressão Saída gases	mmca	4	8	10	14	22	30	36	47	54	60	
Temp. Saída Gases	°C	198	212	235	250	269	296	311	323	347	375	
Temperatura Óleo	°C	100	105	113	111	106	101	99	100	100	100	
Óleo Entrada Rack	kgf/cm ²	11,6	11	10,8	11	11,2	11	11	11,1	11,1	11	
Temp. Vapor Super	°C	202	205	209	212	213,5	215	218	222	226	231	
Analisador Portátil de Gases Combustão												
O ₂	Medição	%	8,0	5,5	5,5	4,8	5,5	4,8	4,0	4,1	3,3	3,0
CO ₂	Medição	%	9,9	11,45	11,61	11,91	11,57	12,2	12,8	12,84	13,26	13,6
CO	Medição	PPM	2	10	16	20	20	21	25	21	40	38
Nox	Medição	PPM	188	154	165	177	182	186	190	196	203	210

Curva Combustão Caldeira CBC 11-B

Numeros de pontos	Nº	Analisador Portátil de Gases Combustão									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PT-Vapor Tubulão	kgf/cm ²	16,2	15,1	11,7	11,5	12,2	12,6	13,2	13,8	14,5	15,4
PT-Vapor Super	kgf/cm ²	15,9	14,4	11,4	11,1	11,4	11,9	12,4	12,9	13,4	14,1
FT-Vazão Ar	%	6,5	11	12,5	16	23	28	36	56	72	91
FT-Vazão de Óleo	kg/h	510	630	710	810	970	1120	1228	1415	1600	1800
FT-Vazão de Vapor	T/h	8,2	11,7	17	18,8	21,6	23,7	26,3	30	33,2	36
LT-Nível Água	%	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48
Vapor Atomização	kgf/cm ²	7	8	8	8	8	8	8,2	8,5	8,5	8,5
Óleo Ent. Queimador	kgf/cm ²	2	2,4	2,65	2,95	3,4	3,8	4,1	4,6	5,2	6,2
Pressão Caixa de Ar	mmca	26	32	38	50	70	92	120	168	215	270
Pressão Saída gases	mmca	-2	-1	-3	0	-2	-1	2	2	3	2
Temp.Saída Gases	°C	258	272	278	291	320	345	262	395	410	428
Temperatura Óleo	°C	120	120	120	120	114	110	112	110	110	110
Óleo Entrada Rack	kgf/cm ²	10,8	11,8	11,7	11,7	11,5	11,4	11,1	10,8	10,6	10,3
Temp. Vapor Super	°C	301	278	279	280	282	283	284	286	286	286,5
Analisador Portátil de Gases Combustão											
O2	Medição %	4	3,8	3,7	3,4	2,9	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8
CO2	Medição %	12,87	13,02	13,1	13,4	13,7	14	13,97	13,86	13,8	13,82
CO	Medição PPM	2	5	5	5	5	7	8	10	12	18
Nox	Medição PPM	352	349	352	367	392	406	411	415	418	420
Exc. Ar	Medição %	10,3	10,8	10,7	11	12,2	12,4	12,6	13,2	13,5	14

Curva Combustão Caldeira Babcock 11-C

Números de pontos	Nº	Analisador de Gases Combustão Portátil										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
PT Vapor Tubulão	kgf/cm ²	10,9	11	11,2	11,4	11,6	11,8	12	12,2	12,3	12,5	
PT Vapor Super	kgf/cm ²	8,8	9,0	9,2	9,3	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	10	
PT Varão Ar	%	6,0	7,0	12	18	30	43	53	63	70	84	
PT Varão de Óleo	kg/h	850	1150	1350	1630	1950	2350	2620	2820	3090	3300	
PT Varão de Vapor	T/h	27	32	39,7	47	52	54	58	60	60	60	
PT Nível Água	%	51	50	52	50	52	52	52	50	52	50	
Vapor Atomização	kgf/cm ²	6,0	6,2	6,4	6,6	6,8	6,9	7,1	7,2	7,3	7,4	
Óleo Ent. Queimador	kgf/cm ²	1,8	2,1	2,9	3,1	3,9	4,6	5,2	5,9	6,3	6,6	
Pressão Caixa de Ar	mmca	19	22,5	41	58	101	142,5	175	208	230	274	
Pressão Saída gases	mmca	2	2	3	5	6	8	10	12	15	20	
Temp Saída Gases	°C	268	282	298	328	345	352	366	370	376	380	
Temperatura Óleo	°C	112	108	114	115	120	122	116	116	114	112	
Óleo Entrada Rack	kgf/cm ²	11,8	11,6	11,7	11,8	11,8	11,5	11,7	11,6	11,6	11,5	
Temp. Vapor Super	°C	204	208	210	214	116	218	220	223	224	226	
Analisador de Gases Combustão Portátil												
O ₂	Medição	%	8,4	5,2	4,9	4,9	5,0	4,9	4,8	4,5	4,1	3,7
CO ₂	Medição	%	9,40	11,82	12	12,04	11,90	11,89	12,10	12,4	12,72	12,78
CO	Medição	PPM	4	23	26	22	34	32	31	33	30	29
Nox	Medição	PPM	202	189	195	194	207	219	230	235	240	241
Exc. Ar	Medição	%	14	13,9	13,8	13,4	13	12,4	12,3	12,2	12	11,2

Curva Combustão Caldeira Steammasters 11-D

Numeros de pontos	Nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
PT-Vapor Tubulão	kgf/cm ²	10,8	13,2	15	16	16,6	17,1	17,8	18,8	20,5	21,5	
PT-Vapor Super	kgf/cm ²	8,7	9	9,1	9,4	9,5	9,6	9,7	9,8	10,1	10,2	
FT-Vazão Ar	%	7,0	10	13	15	18	21	24	28	30	34	
FT-Vazão de Óleo	kg/h	525	1275	1390	1530	1660	1728	1850	1950	2130	2230	
FT-Vazão de Vapor	T/h	17,8	26	28	30,9	32	37	37,8	39,5	43	45,5	
LT-Nível Água	%	60	50	50	50	52	54	52	56	52	50	
Vapor Atomização	kgf/cm ²	6	6,6	6,3	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	6,2	
Óleo Ent. Queimador	kgf/cm ²	3	3,4	3,6	3,8	4	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5	
Pressão Caixa de Ar	mmca	20,4	30	39	45	54	63	72	84	90	102	
Pressão Saída gases	mmca	3	3,5	3,8	4,2	5,1	5,2	5,2	6,1	6,1	8,2	
Temp. Saída Gases	°C	205	220	228	236	241	244	250	255	266	270	
Temperatura Óleo	°C	114	114	112	108	110	106	114	112	110	104	
Óleo Entrada Rack	kgf/cm ²	11,2	10,8	10,8	10,8	10,6	10,6	10,5	10,5	10,4	10,4	
Temp. Vapor Super	°C	260	280	290	302	304	299	293	268	280	263	
Analisador Portátel de Gases Combustão												
O2	Medição	%	6,3	3,4	2,8	2,7	2,6	2,5	2,4	2,3	2,2	2,2
CO2	Medição	%	10,98	12,98	13,8	13,9	13,9	14	14	14,2	14,2	14,2
CO	Medição	PPM	8	6	5	5	5	5	5	4	4	4
Nox	Medição	PPM	485	560	530	531	529	514	516	512	510	498