



RENATA AVELAR CUNHA

**OTIMIZAÇÃO DO AQUECIMENTO DE AR DE COMBUSTÃO
EM CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE DE
UMA REFINARIA DE ALUMINA**

RENATA AVELAR CUNHA

**OTIMIZAÇÃO DO AQUECIMENTO DE AR DE COMBUSTÃO
EM CALDEIRAS DE LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE DE
UMA REFINARIA DE ALUMINA**

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

Orientador: Profa. Dra. Audirene Amorim Santana.

São Luís – MA
2020

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

Cunha, Renata Avelar.

Otimização do aquecimento de ar de combustão em caldeiras de leito fluidizado circulante de uma refinaria de alumina / Renata Avelar Cunha. - 2020.

86 f.

Orientador(a): Audirene Amorim Santana.

Curso de Engenharia Química, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA, 2020.

1. Aquecimento de ar. 2. Ar de combustão. 3. Caldeira de leito fluidizado circulante. 4. Otimização. 5. Refinaria de alumina. I. Santana, Audirene Amorim. II. Título.

BANCA EXAMINADORA:

Prof.^a Dr.^a AUDIRENE AMORIM SANTANA
Orientadora – COEQ/CCET/UFMA

Prof. Dr. LOURYVAL COELHO PAIXÃO
DEALI/UFF

Eng. YURI DA SILVA PEREIRA
ALUMAR/MA

13 de janeiro de 2020

Dedico este trabalho a Deus porque Dele, por meio Dele e para Ele são todas as coisas.

Aos meus pais, Socorro Avelar e Raimundo Cunha, pelo apoio incondicional ao longo de toda a minha vida.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, pelo dom da vida, por me dar forças todos os dias para continuar vivendo e enfrentando novos desafios.

As minhas queridas avós Maria Zite Pinheiro Avelar (*In Memoriam*) e Isabel Rodrigues Cunha (*In Memoriam*) por todo amor, cuidado e carinho que dedicaram a mim, vocês são minhas maiores referências de coragem, força, e fé.

Aos meus pais, Maria do Socorro Avelar e José Raimundo Cunha, que se esforçaram ao máximo para me proporcionar uma boa educação. Agradeço pelos conselhos, orações e apoio nos momentos de dificuldade. Vocês são meus maiores exemplos de força, coragem, persistência, e dignidade, e sevem de inspiração e motivação para mim diariamente.

A minha irmã Marília Avelar, pelo apoio, conselhos e cuidados.

Aos meus tios Maria do Carmo e Luís Carlos por todo apoio, cuidado, carinho e disponibilidade. A todos os meus familiares que estiveram torcendo por mim de algum modo, até mesmo aqueles mais distantes.

Aos meus melhores amigos, Thayara Kellen e Davi Nascimento, muito obrigada pelo apoio, opiniões, conselhos, conversas. Obrigada pela lealdade e disponibilidade, mesmo em meio a rotinas de estudos e trabalho, disporem de tamanha amizade.

Aos meus amigos de universidade Gracellene de Souza, Ana Paula Calvet, Renan Azevedo e Sergio Domingos por compartilharem momentos valiosos e de grande aprendizagem nos anos de graduação e iniciação científica.

As minhas amigas da Engenharia Química Talita Santos, Valkerline Pires, Larissa Machado e Nariela Villela, deixo o meu agradecimento pelos momentos compartilhados na graduação, obrigada pelo apoio nos momentos felizes e difíceis vivenciados durante este curso.

Ao Prof. Dr. Roberto Batista de Lima pelo incentivo na realização de pesquisas científicas e pelos anos de pesquisa desenvolvidos laboratório de eletroquímica da UFMA.

Ao meu amigo e gestor Yuri Pereira pelo apoio e incentivo, por ter compartilhado, da melhor maneira possível, de seu conhecimento técnico durante os anos de estágio. Obrigada, pelas orientações e conselhos que contribuíram para que esse trabalho fosse desenvolvido.

A minha orientadora Audirene Amorim Santana pelo incentivo, disponibilidade e auxílio ao longo da graduação e do desenvolvimento deste trabalho. Obrigada pela orientação, ensinamentos e esforços para que esta monografia fosse concluída.

Á todos aqueles que, direta ou indiretamente, fizeram parte desta etapa minha vida deixo o meu muito obrigada.

“Se algum de vocês tem falta de sabedoria, peça-a a Deus, que a todos dá livremente de boa vontade, e lhe será concedida.”

Tiago, 1:5

CUNHA, Renata Avelar. **Otimização do aquecimento de ar de combustão em caldeiras de leito fluidizado circulante de uma refinaria de alumina.** 2020. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

RESUMO

Este trabalho teve por objetivo otimizar o sistema de aquecimento de ar em duas caldeiras de leito fluidizado circulante de uma refinaria de alumina. Para isso foram realizadas mudanças no controle de processo do sistema de retorno de condensado e nas unidades de pré-aquecimento de ar das duas caldeiras. Para implementação da otimização foram definidas as oportunidades referentes ao sistema de retorno de condensado de flash e às unidades de pré-aquecimento de ar, determinados o critério de desempenho, as variáveis de decisão e restrições dos respectivos processos que ocorriam em cada sistema. Em seguida, foram desenvolvidas estratégias de controle e um novo modo de controle de processo otimizado foi implementado em ambos os sistemas. A avaliação da otimização foi realizada através da análise das médias e desvio padrão das principais variáveis de processo. Para o sistema de retorno de condensado se observou variações na pressão da linha de retorno e temperatura média do condensado. Enquanto para os sistemas de pré-aquecimento a otimização foi evidenciada pelo tempo que o sistema foi controlado automaticamente. O estudo dos impactos da otimização do sistema de aquecimento foi realizado através das principais mudanças nas variáveis de operação e sobre a eficiência das caldeiras. A otimização do sistema de pré-aquecimento de ar foi constatada pelo aumento de temperatura do ar pré-aquecido, temperatura do ar aquecido, temperatura dos gases e pelo aumento de eficiência das caldeiras. Apesar das perdas de energia relacionadas a temperatura dos gases, os impactos da otimização se mostraram positivos, uma vez que se obteve aumento da eficiência das duas caldeiras.

Palavras-Chave: Otimização. aquecimento de ar. ar de combustão. caldeiras de leito fluidizado circulante. refinaria de alumina.

CUNHA, Renata Avelar. **Optimization of combustion air heating in circulating fluidized bed boilers of an alumina refinery.** 2020. 86 f. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Química do Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2020.

ABSTRACT

This work aimed to optimize the air heating system in two circulating fluidized bed boilers of an alumina refinery. For this, changes were made in the process control of the flash condensate return system and in the air preheating units of two boilers. The opportunities for the flash condensate return system and air preheating units, given the performance criterion, decision-making variables and restrictions of the respective processes that occurred in each system. Then, control strategies were developed, and a new optimized process control mode was implemented on both systems. The evaluation of optimization was performed based on the analysis of the means and standard deviation of the main process variables. For the condensate return system, variations in the pressure of the return line and average condensate temperature were observed. While for preheating systems the optimization was evidenced by the time the system was automatically controlled. The study of the impacts of the optimization of the heating system was carried out through the main changes in the operating variables and on the efficiency of boilers. The optimization of the air preheating system was verified by the increase in preheated air temperature, heated air temperature, gas temperature and increased boiler efficiency. Despite energy losses related to gas temperature, the impacts of optimization were positive, since the efficiency of the two boilers was increased.

Keywords: Optimization. air heating. combustion air. circulating fluidized bed boilers. alumina refinery.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Níveis de otimização em um processo.....	8
Figura 2 – Eolípila de Heron	11
Figura 3 – Caldeira de Haycock	11
Figura 4 – Motor de Thomas Savery.....	12
Figura 5 – Caldeira de Trevithick.....	13
Figura 6 – Diagrama T - v da água pura.....	14
Figura 7 – Esquema de um sistema de produção e distribuição de vapor.	15
Figura 8 – Fluxograma do Processo Bayer.....	17
Figura 9 – Componentes de uma caldeira: A) Moega de Cinza; B) Fornalha; C) câmara de combustão; D) Tubos Evaporadores; E) Superaquecedores; F) Economizadores; G - Pre aquecedores de ar; H) canais de gases; I) - Chaminé	21
Figura 10 – Esquema de uma caldeira flamotubular	24
Figura 11 – Esquema de uma caldeira aquatubular	25
Figura 12 – Diagrama esquemático de uma caldeira de leito fluidizado circulante - CFB.....	26
Figura 13 – Aumento na eficiência de uma caldeira devido à redução de temperatura dos gases pelo economizador e aquecedor.	27
Figura 14 – Localização do economizador e aquecedores de ar em uma caldeira a carvão. ...	28
Figura 15 – Aquecedor de ar tubular vertical.....	29
Figura 16 – Aquecedor de placas com passe duplo para ar e passe único para gás	30
Figura 17 – Aquecedores de ar com serpentinas de ar/água, (A) Aquecedor com serpentina vertical, (B) Aquecedor com serpentina horizontal.....	31
Figura 18 – Aquecedores recuperativos de placa rotativa ou Ljungström®	33
Figura 19 – Aquecedores recuperativos de placas estacionárias ou Rothemühle®.	33
Figura 20 – Curva de Eficiência em função da Temperatura dos Gases para Butano, Propano, Etano, Gás Natural e Metano.....	37
Figura 21 – Curva de eficiência em função do excesso de oxigênio.....	39
Figura 22 – Curva de eficiência vs. temperatura do ar.....	39
Figura 23 – Fluxograma do sistema de aquecimento de ar das caldeiras CFBs.....	42
Figura 24 – Vista Lateral das Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante.....	44
Figura 25 – Fluxograma do circuito de condensado que aquece o ar da caldeira 01(CA01) e caldeira 02 (CA02).	45
Figura 26 – Malha de controle de condensado para pré-aquecimento de ar.	46

Figura 27 – Esquema do controle otimizados do sistema de retorno de condensado.	52
Figura 28 – Pressão na linha de retorno condensado para caldeira 01.	53
Figura 29 – Pressão na linha de retorno de condensado na caldeira 02.	53
Figura 30 – Temperatura do condensado na caldeira 01.	54
Figura 31 – Temperatura do condensado na caldeira 02.	54
Figura 32 – Esquema do controle otimizado do pré-aquecimento de ar das caldeiras CFBs...57	
Figura 33 – Percentual de tempo em controle automático do sistema de pré-aquecimento de ar da caldeira 01.....	57
Figura 34 – Tempo em que o sistema de pré-aquecimento de ar da caldeira 02 esteve em controle automático.	58
Figura 35 – Média e desvio padrão da temperatura do ar primário pré-aquecido na caldeira 01.	59
Figura 36 – Média e desvio padrão da temperatura do ar secundário pré-aquecido na caldeira 01.	60
Figura 37 – Médias e desvio padrão da temperatura de ar primário pré-aquecido na caldeira 02.	60
Figura 38 – Média e desvio padrão da temperatura de ar secundário pré-aquecido na caldeira 02.	61
Figura 39 – Temperatura dos gases da caldeira 01.....	62
Figura 40 – Temperatura dos gases da caldeira 02.....	62
Figura 41 – Eficiência estimada da caldeira 01.....	63
Figura 42 – Eficiência estimada da caldeira 02.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Principais oportunidades encontradas no sistema de retorno de condensado.....	50
Tabela 2 – Variáveis de otimização do sistema de retorno de condensado.....	51
Tabela 3 – Principais oportunidades encontradas nos sistemas de pré-aquecimento de ar.....	55
Tabela 4 – Variáveis de otimização dos pré-aquecedores de ar das caldeiras.	56

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- CFB Circulating Fluidized Bed
- CA01 Caldeira de leito fluidizado circulante 01
- CA02 Caldeira de Leito fluidizado circulante 02
- SP *Set Point* ou variável alvo para a variável de processo
- PV *Process Variable* ou variável de processo
- OP *Output Process* ou variável de saída

LISTA DE SÍMBOLOS

T_{SA}	Temperatura do ar que deixa o pré-aquecedor
T_{SPA}	Temperatura do ar que sai do aquecedor
T_{SG}	Temperatura dos gases
EF	Eficiência de uma caldeira
Q_S	Energia que deixa uma caldeira
Q_L	fluxo de energia que é liberada/perdida pela caldeira
M_c	vazão de combustível na caldeira
PSC	Poder Calorífico Superior
PSI	Poder Calorífico Inferior
Q_A	Energia adicional que entra em uma caldeira

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO.....	ii
AGRADECIMENTOS	iv
EPÍGRAFE	v
RESUMO.....	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	xi
LISTA DE SÍMBOLOS	xii
SUMÁRIO.....	xiii
1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo geral	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3 REFERENCIAL TEÓRICO	5
3.1 Contexto.....	5
3.2 Otimização.....	6
3.2.1 CONCEITOS E APLICAÇÕES.....	6
3.2.2 VARIÁVEIS DE OTIMIZAÇÃO	8
3.2.2.1 Critério de desempenho ou função objetivo	8
3.2.2.2 Variáveis de decisão	8
3.2.2.3 Restrições.....	9
3.2.3 TIPOS DE OTIMIZAÇÃO	9
3.2.3.1 Otimização Topológica.....	9
3.2.3.2 Otimização Paramétrica.....	9
3.2.4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO	10
3.3 Vapor	10
3.3.1. HISTÓRICO	10
3.3.2 CONCEITOS.....	14
3.3.3 APLICAÇÕES.....	15
3.3.4 VAPOR EM REFINARIA DE ALUMINA	16
3.4 Combustão	17
3.4.1 ALIMENTAÇÃO DE AR EM ESTÁGIOS.....	18

3.4.2 CONTROLE DO EXCESSO DE AR	19
3.5 Geradores de Vapor	19
3.5.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS	19
3.5.2 FUNCIONAMENTO	20
3.5.3 COMPONENTES BÁSICOS DAS CALDEIRAS	20
3.5.3.1 Moega de cinza.....	21
3.5.3.2 Fornalha.....	21
3.5.3.3 Câmara de combustão.....	22
3.5.3.4 Vaso e Tubos evaporadores	22
3.5.3.5 Superaquecedores	22
3.5.3.6 Economizadores.....	22
3.5.3.7 Aquecedores de ar	23
3.5.3.8 Gaiola de convecção ou canal de gases	23
3.5.3.9 Chaminé.....	23
3.5.4 CLASSIFICAÇÕES	23
3.5.4.1 Caldeiras Flamotubulares	23
3.5.4.2 Caldeiras Aquatubulares.....	24
3.5.4.3 Cadeiras de leito fluidizado circulante - CFB	24
3.6 Aquecedores de ar	27
3.6.1 CLASSIFICAÇÃO	27
3.6.1.1 Aquecedores recuperativos.....	28
3.6.1.1.1 Aquecedores recuperativos de tubos	29
3.6.1.1.2 Aquecedores recuperativos de placas	30
3.6.1.1.3 Aquecedores de ar com serpentinas de ar ou água	31
3.6.1.2 Aquecedores de ar regenerativos	32
3.6.1.2.1 Aquecedores recuperativos de placa rotativa ou Ljungström®.....	32
3.6.1.2.2 Aquecedores recuperativos de placas estacionárias ou Rothemühle®.....	32
3.5.1.3 Condições operacionais	34
3.7 Eficiência de caldeiras	34
3.7.1 MÉTODO ENTRADA-SAÍDA OU DIRETO	35
3.7.2 MÉTODO POR BALANÇO DE ENERGIA OU INDIRETO.	36
3.7.3 FATORES QUE IMPACTAM NA EFICIÊNCIA DE UMA CALDEIRA.....	36
3.7.3.1 Temperatura dos gases de combustão	36
3.7.3.2 Poder calorífico e especificações do combustível	37

3.7.3.3 Excesso de ar	38
3.7.3.4 Temperatura do ar.....	38
3.7.3.5 Perdas por convecção e radiação	40
4 METODOLOGIA.....	41
4.1 Descrição do local	41
4.2 Descrição do processo	41
4.2.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE AR DE COMBUSTÃO DAS CALDEIRAS	41
4.2.2 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE CONDENSADO	44
4.3.3 CONTROLE DO PRÉ-AQUECIMENTO DE AR	45
4.2. Equipamentos	46
4.3 Instrumentos	46
4.4 <i>Softwares</i>	47
4.5 Procedimento	47
4.5.1 OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMA RETORNO DE CONDENSADO E DE PRÉ- AQUECIMENTO DE AR	47
4.6 Análise de dados.....	48
4.6.1 EFEITOS DA OTIMIZAÇÃO NO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE AR.....	48
4.6.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS CFBS	49
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
5.1 Otimização do sistema de pré-aquecimento de ar de combustão das caldeiras.....	50
5.1.1 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE RETORNO DE CONDENSADO.....	50
5.1.2 OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PRÉ-AQUECIMENTO DE AR	55
5.2. Efeitos da otimização do sistema de pré-aquecimento de ar das caldeiras	59
5.2.1 TEMPERATURA DE AR PRÉ-AQUECIDO	59
.....	61
5.2.2 TEMPERATURA DOS GASES	61
5.3 Análise da variação de eficiência das caldeiras CFBs.....	63
6 CONCLUSÃO.....	65
7 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS	66
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

A energia é um insumo essencial para o desenvolvimento econômico e social de um país. O crescimento econômico, a melhoria do padrão de vida da sociedade e o desenvolvimento tecnológico sempre estão acompanhados do aumento na demanda energética. Para atender essa demanda, grande parte da energia utilizada vem de fontes como o petróleo, gás natural, carvão, e outros combustíveis de origem fóssil (SIMABUKULO et al., 2017).

A demanda crescente de energia tornou os preços desses combustíveis mais elevados e levou ao esgotamento de reservas devido ao alto consumo dos países industrializados. Como resultado desse consumo, estudos científicos indicam que, além destas fontes não serem renováveis, seus processamentos resultam na emissão de partículas poluentes e gases do efeito estufa, causando danos ao meio ambiente (FRAGMAQ, 2013). Entre as ações internacionais, destacam-se a diversificação das fontes de importação de combustíveis, a busca por fontes alternativas de energia e a racionalização do uso de energia (POMPERMAYER; FURTADO, 1998).

Para indústria em geral, a energia representa um fator de custo e não de resultado. Todavia, para grandes indústrias, a energia tem peso significativo no custo final dos produtos, podendo atingir, em alguns setores, até 60% do custo total da produção. Tanto o custo quanto o consumo específico de energia funcionam como fator de competitividade nos mercados econômicos. Por conseguinte, as indústrias devem trabalhar em bons níveis de eficiência energética para se tornarem competitivas no mercado internacional (BRASIL, 2010).

Pesquisas realizadas em 2013 pela Companhia Nacional da Indústrias – CNI, em 217 projetos de eficiência energética industrial, distribuído em 13 setores, mostraram que 6% das oportunidades de economia de energia em industriais estavam associadas a otimização de processo térmicos, sendo que 82% se correlacionaram com consumo de combustíveis, principalmente em fornos e caldeiras (BRASIL, 2010).

Deste modo, racionalizar e otimizar o uso da energia no setor industrial representa uma alternativa de baixo custo com curto período de implementação, sendo que em algumas situações é possível obter economias significativas apenas com mudanças em procedimentos e processos (NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005). Nesse contexto a otimização de processos torna-se uma alternativa considerável para minimizar consumos de matéria prima e energia.

Otimizar significa criar condições favoráveis para o ótimo desenvolvimento de uma grandeza. Assim sendo, a otimização é a aplicação de métodos específicos capazes de

selecionar qual a solução mais eficiente de um problema. Com a otimização de processo é possível se obter uma série de melhorias, econômicas e operacionais, como a maximização de um determinado processo ou capacidade operacional instalada, minimização do uso de matérias primas e combustíveis, redução da diferença entre o valor desejado e o valor alcançado. A otimização pode ocorrer em vários âmbitos de uma empresa, variando de uma combinação complexa de plantas e instalações até plantas pequenas, combinações de unidades, equipamentos individuais, subsistemas em um equipamento ou entidades menores (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

Os sistemas de vapor estão presentes em todos os processos industriais, nos Estados Unidos, por exemplo, cerca de 37% do combustível fóssil queimado é destinado para combustão a fim de produzir vapor. O vapor encontra uma gama de aplicações em diferentes processos industriais e em diversas operações. Na indústria de alimentos costuma ser utilizado na secagem e concentração. No craqueamento é usado para produzir combustíveis mais leves. Na destilação é aplicado na separação de produtos químicos específicos. Além do aquecimento, o vapor pode ser utilizado para movimentação de turbinas a fim de gerar eletricidade. (ROBERTS et al., 2017).

O alto poder calorífico do vapor d'água e a grande disponibilidade de água nas indústrias fazem do vapor o fluido de trabalho mais utilizado em plantas industriais. Para produção de vapor é necessário que água no estado líquido absorva energia de modo a alterar o estado de agregação das moléculas resultando na fase gasosa. A energia necessária para mudança de fase costuma ser obtida através de uma fonte de calor, sendo a mais comum uma reação de combustão (BAZZO, 1995; RUSSEL, 1994).

Plantas de refino de alumina costumam utilizar o processo Bayer para extrair da alumina a partir da bauxita, consistindo em quatro etapas principais: digestão, clarificação, precipitação e calcinação. No processo Bayer, o vapor é o insumo que produz as condições necessárias de temperatura e pressão para a ocorrência da reação de extração da bauxita em aluminato de sódio; deste modo caldeiras costumam produzir o vapor necessário para o processo (JUNIOR, 2015).

Reações de combustão são reações químicas entre um combustível e um comburente que costumam ocorrer rapidamente liberando energia (exotérmicas). Os principais elementos químicos que compõem a maioria dos combustíveis são o carbono, o hidrogênio, e em alguns casos o enxofre, que quando oxidados liberam grandes quantidade de calor. Desse jeito, um gerador de vapor, é responsável por captar a energia liberadas na combustão numa secção central e distribuir aos pontos consumidores, que aquecem a água, transformando-a em vapor. Caldeiras são os geradores de vapor mais utilizados nas indústrias. Estes equipamentos

consistem basicamente em grandes trocadores de calor que operam em pressões superiores a pressão atmosférica (BIZZO, 2003).

Caldeiras de Leito Fluidizados Circulantes - CFB são aquelas em que a combustão ocorre num regime de leito de fluidização circulante, isto é, os sólidos presentes no leito são transportados a uma velocidade maior que a velocidade média das partículas, sendo direcionados até um separador gás-sólido. Assim as partículas grossas são recirculadas até o leito da caldeira, enquanto as partículas finas e gases deixam o separador e segue para um filtro de mangas, que retém os sólidos e libera os gases para chaminé (BASU, 2015).

De modo geral, caldeiras são projetadas de modo que aproveitem da melhor forma possível energia de um determinado combustível. Devido à variedade de combustíveis existentes, suas estruturas podem ser bastante diversificadas, entretanto possuem componentes básicos na sua estrutura. Estes elementos constituintes são a fornalha, câmara de combustão, tubos evaporadores, economizadores, aquecedores de ar, gaiola de convecção e chaminé (B&W, 2015; NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

Os aquecedores de ar são trocadores de calor responsáveis por elevar a temperatura do ar que é aplicado na combustão e reduzir a temperatura final dos gases de exaustão para valores mínimos, evitando perdas de energia. Estes elementos costumam se localizar no final da gaiola de convecção, contudo, o tipo de aquecedor e localização depende da configuração da refinaria, podendo existir até pré-aquecedores de ar com água para um estágio adicional de aquecimento. O aumento da temperatura do ar pode aumentar a velocidade da combustão, proporcionar uma queima estável e uniforme; e aumentar a eficiência da caldeira, reduzindo o consumo de combustível e de emissões (BAZZO, 1995).

A partir dos aspectos apresentados e diante da necessidade de tecnologias voltadas para maximizar a eficiência energética de geradores de vapor, mais pesquisas são necessárias na área de otimização de processo de sistemas aquecedores de ar, conforme a configuração e necessidade de refinarias ou indústrias, uma vez isso pode afetar condições de processo, combustão e a eficiência de caldeiras instaladas e da operação de plantas industriais, levando a melhorias operacionais e econômicas.

Deste modo, o presente trabalho teve por intuito otimizar o sistema de aquecimento de ar em caldeiras de leito fluidizado de uma refinaria de alumina e avaliar os principais efeitos da otimização na operação eficiência das caldeiras.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem por finalidade a otimizar sistemas aquecimento de ar em caldeiras de leito fluidizado circulante de uma refinaria de alumina.

2.2 Objetivos específicos

- Otimizar sistema de aquecimento de ar das caldeiras CFBs através de modificações no controle de processo.
- Apresentar através de gráficos os efeitos da otimização sobre o sistema de aquecimento de ar de caldeiras de leito fluidizado circulante
- Estudar os impactos da otimização do aquecimento de ar sobre das caldeiras de leito fluidizado circulante.
- Demonstrar os impactos da otimização de aquecimento de ar sobre o processo de combustão e sobre a eficiência das caldeiras de leito fluidizado circulante.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Contexto

O homem está em constante evolução, assim como suas necessidades energéticas. Desde a pré-história, a fim de satisfazer as suas necessidades mais básicas, como alimentação, fonte de luz artificial e aquecimento, o homem passou a utilizar o fogo, desenvolveu a agricultura e a pecuária e armazenou energia de animais e plantas (FARIAS, SELLITTO, 2011).

Já na idade média, com as principais descobertas científicas, ocorreram grandes transformações no uso da energia. O desenvolvimento de leis e teorias na matemática, geometria e engenharia permitiram a transformação de energias disponíveis na natureza. Desde as sociedades antigas, por exemplo, se utilizavam os moinhos de vento para moer grãos e irrigar plantações. A energia que já estava disponível através da utilização de ventos, foi ampliada com o aproveitamento do vapor. Todavia, durante a idade média, para aplicar o vapor na produção de energia, se fazia necessário ainda a construção e o desenvolvimento de máquinas complexas, o que só foi possível após a colaboração de diversos cientistas (DUTRA, 2001).

Com o início da revolução industrial, se iniciou a era dos combustíveis fósseis. O primeiro combustível fóssil a ser utilizado em ampla escala foi o carvão mineral, que era aplicado na combustão direta das máquinas de Watt. Até meados de 1961, o carvão mineral era fonte primária de energia no mundo todo, até que foi sendo substituído pelo petróleo e seus derivados (FARIAS, SELLITTO, 2011).

Em 1859, com a descoberta de petróleo em regiões profundas dos Estados Unidos, tinha início uma nova era na industrialização. Antes deste período, o petróleo utilizado era aquele que surgia na superfície do solo, não sendo possível utilizá-lo em grande escala. Assim como o carvão mineral, o petróleo é um combustível de origem fóssil, formado a partir de restos de animais e plantas acumulados nas profundezas dos mares primitivos, sob sedimentos (DUTRA, 2001).

Com o crescimento do mercado automotivo, em 1908, a demanda por combustíveis originados do petróleo cresceu. Com o desenvolvimento das indústrias petroquímicas, vieram vários outros subprodutos do petróleo, entre estes a gasolina, gás liquefeito, óleos, lubrificantes, solventes, asfaltos, coque de petróleo e outros, que serviriam como combustível e matérias prima para diversas aplicações (FARIAS; SELLITTO, 2011).

Ainda que os combustíveis fósseis consigam atender à crescente demanda de energia atual, além dessas fontes de energia não serem renováveis, na maioria dos casos o uso e

processamento destes tipos de combustíveis resultam-na emissão de partículas poluentes e gases do efeito estufa, causando uma série de danos ao meio ambiente. Desta maneira, tornou-se extremamente necessário buscar novas fontes de energia renováveis e racionalizar o uso da energia através de processos mais eficientes e com baixas emissões (POMPERMAYER; FURTADO, 1998).

Deste modo, a utilização de equipamentos mais eficientes, capazes de oferecer grandes quantidades de energia, com menor quantidade de combustível e emissões reduzidas representam uma das opções para reduzir os impactos causados. Portanto, medidas gerenciais e operacionais para melhorar a eficiência no uso de vapor são relevantes para reduzir perdas e desperdícios de energia. Assim, estas medidas podem ser adotadas havendo mudança de padrões e hábitos de consumo e otimização sem a exigência de grandes investimentos.

3.2 Otimização

3.2.1 CONCEITOS E APLICAÇÕES

A otimização é definida como a aplicação de metodologias específicas que resultam em uma solução mais econômica e eficiente na resolução de um problema ou processo, ou seja, é o uso de métodos que determinam a melhor solução dentre um conjunto de possibilidades, conforme um critério previamente estabelecido (EDGAR, HIMMELBLAU; LASDON, 2001; KALID, 2013).

A otimização pode ser vista como uma ciência que estabelece as melhores soluções para problemas reais descritos através de modelos matemáticos. Na matemática é descrita como a área que tem por finalidade desenvolver metodologias eficientes que determinem o máximo e o mínimo de funções de uma ou mais variáveis (KALID, 2013). Segundo Phelps (2015), a otimização consiste basicamente na melhoria de uma situação, dispositivo, equipamento, sistema ou processo já existentes.

Portanto, comparando as definições dos autores acima, otimizar significa criar condições favoráveis para o ótimo desenvolvimento de uma grandeza. Assim sendo, a otimização é a aplicação de métodos específicos capazes de decidir qual a solução mais eficiente, diante de uma situação ou condição, para o funcionamento ótimo de um equipamento, sistema ou processo químico.

A otimização está entre as técnicas mais comumente utilizadas na tomada de decisões industriais. Uma diversidade de problemas industriais em projetos, construções, operações e

análises de plantas químicas podem ser resolvidos através da otimização de processos (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

Problemas típicos no projeto de processos de engenharia química ou na operação da planta têm infinitas soluções. A otimização se preocupa em selecionar o melhor dentre todo o conjunto por métodos quantitativos eficientes., assim surge a necessidade do uso de computadores e softwares associados que tornam os cálculos viáveis e econômicos. Para obter informações úteis usando computadores, no entanto, são necessárias três ações: (I) análise crítica do processo ou design, (II) percepção sobre quais são os objetivos de desempenho apropriados (ou seja, o que deve ser alcançado); (III) uso de experiências anteriores (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

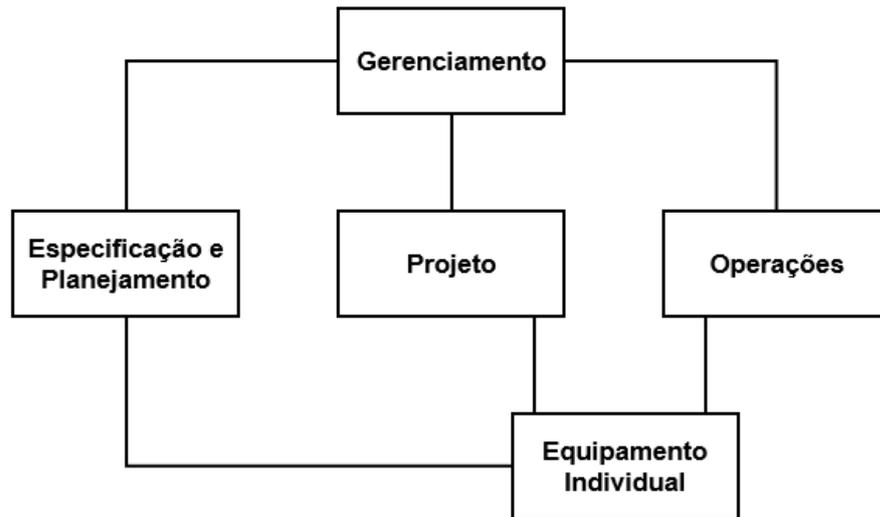
Durante a operação de uma indústria, os benefícios da aplicação da otimização surgem do desempenho aprimorado da planta, como rendimentos de produtos específicos, consumo reduzido de energia, taxas de processamento mais altas e tempos mais longos entre as paradas. A otimização também pode levar a custos de manutenção reduzidos, menor desgaste do equipamento e melhor utilização da equipe (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

A otimização pode ocorrer diferentes áreas de uma empresa, variando de uma combinação complexa de plantas e instalações de distribuição até plantas individuais, combinações de unidades, equipamentos individuais, subsistemas em um equipamento ou até mesmo entidades menores. Logo, problemas de otimização podem ser encontrados em todos esses níveis (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

A complexidade da análise pode envolver apenas recursos gerais ou examinar minuciosamente os detalhes, dependendo do uso a que os resultados serão aplicados, da disponibilidade de dados precisos e do tempo disponível para realizar a otimização. Em uma empresa industrial típica, a otimização pode ser usada em três áreas (níveis): (1) gerenciamento, (2) projeto de processo e especificação de equipamentos e (3) operações da planta conforme pode ser observado na figura 1 (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

No nível de planejamento e especificações profissionais se preocupam com a escolha de um processo e suas condições, tipos de equipamentos e materiais de construção. Assim, o design do projeto otimizado costuma ocorrer antes mesmo da execução do processo. No nível de operações, a preocupação está voltada para o controle operacional de condições do processo, como temperatura, pressão, vazões para que estas sejam as melhores possíveis (EDGAR; HIMMELBLAU; LASDON, 2001).

Figura 1 – Níveis de otimização em um processo.



Fonte: Adaptado de Edgar; Himmelblau; Lasdon (2001).

3.2.2 VARIÁVEIS DE OTIMIZAÇÃO

3.2.2.1 Critério de desempenho ou função objetivo

A função objetivo ou critério de desempenho corresponde a grandeza ou variável alvo que deve ser alcançada com a otimização. Em geral, costuma ser representada por uma função matemática que pode alcançar valores máximos ou mínimos. Os valores do critério de desempenho costumam indicar a eficiência da otimização. Podem existir mais de uma função objetivos em um mesmo problema de otimização (PHELPS, 2015; KALID, 2013).

3.2.2.2 Variáveis de decisão

As variáveis de decisão ou de projeto consistem em variáveis independentes relacionadas ao projeto do processo ou as condições operacionais de um processo que tem impacto sobre a função objetivo ou critério de desempenho. Estas variáveis podem ser contínuas, como por exemplo a temperatura, ou discretas como por exemplo o número de pratos de uma coluna de destilação (PHELPS, 2015) e (TURTON et al., 2009).

3.2.2.3 Restrições

As restrições são delimitações das variáveis de decisão que pode estar associada tanto a condições de projetos, as limitações físicas dos equipamentos ou condições de segurança. As restrições podem ser de igualdade ou de desigualdade. A primeira ocorre quando uma restrição envolve uma igualdade, por exemplo, em uma reação química pode exigir uma determinada concentração de oxigênio para acontecer. A segunda ocorre quando a restrição envolve uma desigualdade, por exemplo, um determinado catalisador só pode operar abaixo de 400 °C (PHELPS, 2015; TURTON et al., 2009).

3.2.3 TIPOS DE OTIMIZAÇÃO

Existem basicamente dois tipos de otimização que podem ser realizadas. A primeira delas é a otimização topológica, que lida com o arranjo de um processo químico ou de um dispositivo de um equipamento do processo. A segunda é a otimização paramétrica que lida com a otimização de variáveis operacionais com pressão, vazão e temperatura (TURTON et al., 2009).

3.2.3.1 Otimização Topológica

A otimização topológica consiste em otimizar a topologia ou arranjo dos equipamentos de processo, isto é, lida com a parte física do projeto do processo químico, aprimorando um projeto novo ou atualizando um sistema ou unidade já existentes. Este tipo de otimização depende do estágio do projeto do processo, pois se o projeto ainda estiver na fase de desenvolvimento seu arranjo pode ser facilmente alterado, todavia se a planta de processo já existe, alterações na topologia implicam em custos adicionais (PHELPS, 2015; TURTON et al., 2009).

3.2.3.2 Otimização Paramétrica

A otimização paramétrica é aquela que otimiza variáveis operacionais de determinado processo ou de uma peça específica de um equipamento de processo. De modo geral, a otimização paramétrica costuma ser mais eficiente se a topológica foi corrigida. Na otimização

paramétrica se determina o objetivo geral e as variáveis de decisão que podem sofrer algum tipo de alteração ou otimização adicional (PHELPS, 2015; TURTON et al., 2009).

3.2.4 MÉTODOS DE OTIMIZAÇÃO

Segundo Phelps (2015) o processo de otimização pode ser resumido nas seguintes etapas:

- a) Definição do problema de otimização;
- b) Medição do valor de otimização assumindo um processo ideal
- c) Identificar as variáveis de decisão, a função objetivo, as restrições;
- d) Criar estratégias para implementar alterações no projeto
- e) Avaliar os resultados da otimização

3.3 Vapor

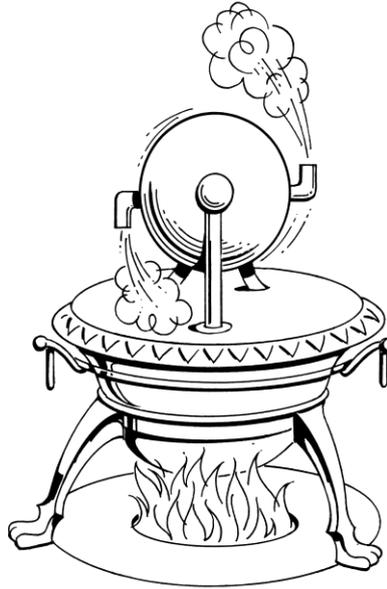
3.3.1. HISTÓRICO

Desde os primórdios da história, a utilização das diversas formas de energia tem representado um desafio que impulsionou o progresso, a imaginação e inovação em toda a humanidade. Dos fogos acessos utilizados pelos primeiros homens até a divisão de átomos para iluminar os grandes centros urbanos, a energia guiou a evolução social e cultural das sociedades. Um dos modos mais frequentes de se aproveitar a energia é transformá-la em trabalho produtivo através da utilização do vapor (B&W, 2015).

Segundo historiadores, a primeira aplicação do vapor ocorreu no primeiro século d. C, quando o matemático Heron revelou a sua “Máquina Térmica”, mais conhecida como Eolípila. Este dispositivo era bem simples, composto de uma esfera oca montado sobre um eixo, que é abastecida com água, que quando aquecida produz movimentos. A figura 2 mostra a configuração deste dispositivo (B&W, 2015).

O mecanismo da Heron mostrou os fundamentos da conversão de água em vapor e a capacidade de aplicação desse vapor para executar uma tarefa, isto é, gerar calor, transferir o calor para a água, elevando sua temperatura acima do ponto de ebulição para produzir vapor. Nos séculos posteriores, se descobriu que, canalizando de modo apropriado, o vapor poderia acionar motores simples, impulsionar a roda de pás em um barco ou girar as rodas de uma locomotiva (B&W, 2015).

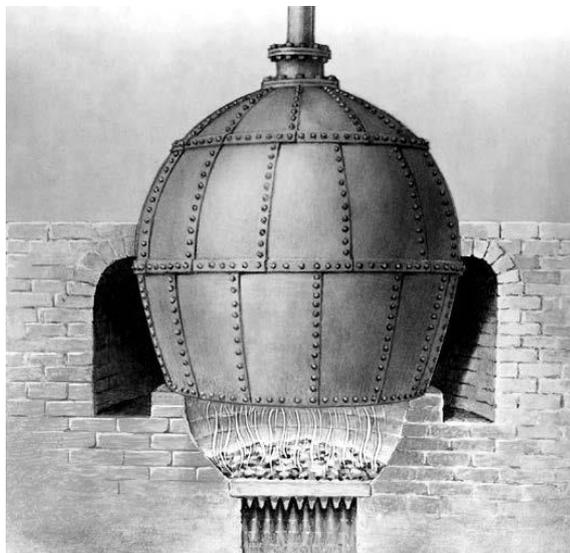
Figura 2 – Eolípila de Heron



Fonte: B&W (2015).

A evolução do conhecimento humano aliado a descoberta novas fontes de energia, como o carvão, levou uma demanda crescente por métodos de produção industrial mais eficientes, assim o vapor começou a desempenhar um papel notável na indústria. Como consequência, surgiram os primeiros esforços tanto para projetar quanto para construir caldeiras industriais. Um modelo de Haycock pode ser observado na figura 3 (BIZZO, 2003; B&W, 2015).

Figura 3 – Caldeira de Haycock

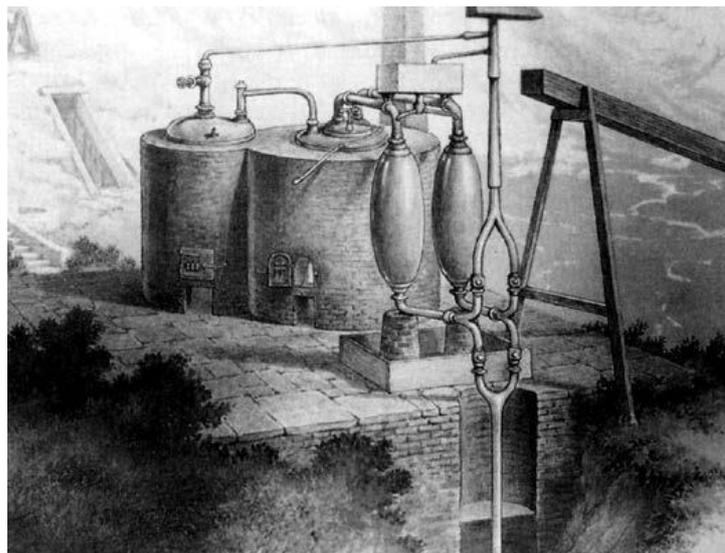


Fonte: B&W (2015).

Por volta de 1680 o inventor francês, Denis Papin, acrescentou um dispositivo para liberar a pressão de um digestor a vapor, denominada válvula de segurança de Papin. Ele também é creditado com a invenção da fornalha interna da caldeira (B&W, 2015).

Em 1698, Thomas Savery, utilizando a ideia de que motores a vapor poderiam ser usados para executar tarefas que exigiam trabalho animal ou humano, inventou e patenteou a primeira máquina a vapor do mundo e foi baseada no design do digestor a vapor de Papin (ver figura 4 (B&W, 2015)).

Figura 4 – Motor de Thomas Savery.



Fonte: B&W (2015).

Em 1799, Trevithick projetou uma caldeira de alta pressão e um motor a vapor com uma carcaça cilíndrica de ferro fundido e uma extremidade côncava. Conforme pode ser observado na figura 4. O modelo de Trevithick eliminou a necessidade de um condensador, permitindo o uso de um cilindro menor. Sua caldeira e motor também eram menores e mais leves, o que acabaria possibilitando usá-los para puxar o peso de uma carruagem (B&W, 2015).

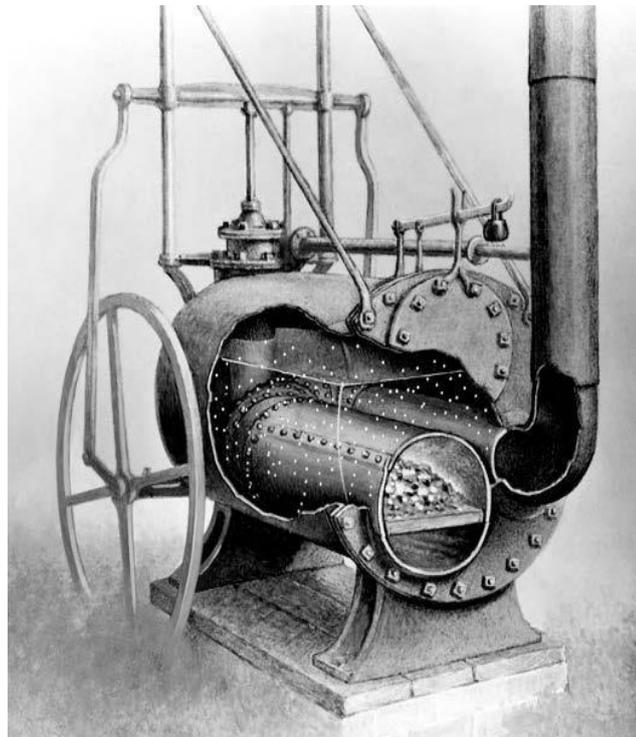
À medida que a demanda de cresceu, tornou-se necessário construir caldeiras maiores com mais capacidade. Os engenheiros sabiam que quanto mais tempo os gases quentes estivessem em contato com a carcaça e quanto maior a área de superfície exposta, maior a capacidade e a eficiência da caldeira.

Observando que quase metade do calor de combustão era perdida devido ao curto tempo de contato entre os gases quentes e a superfície de aquecimento da caldeira. Em 1730, John Allen pode ter realizado o primeiro cálculo de eficiência da caldeira. Para reduzir a perda de

calor, Allen desenvolveu um forno interno com uma chaminé de fumaça serpenteando pela água. Para evitar uma deficiência de ar de combustão, ele sugeriu o uso de foles para forçar os gases através da chaminé.

Em 1822, Jacob Perkins, de Massachusetts, construiu uma caldeira de tubulação de água que é a antecessora do gerador de vapor mais atuais. Várias barras de ferro fundido com orifícios longitudinais foram dispostas sobre o fogo em três níveis, conectando as extremidades do lado de fora do forno com uma série de tubos dobrados. A água foi fornecida ao nível superior por uma bomba de alimentação e o vapor superaquecido foi descarregado do nível inferior para uma câmara de coleta.

Figura 5 – Caldeira de Trevithick.



Fonte: B&W (2015).

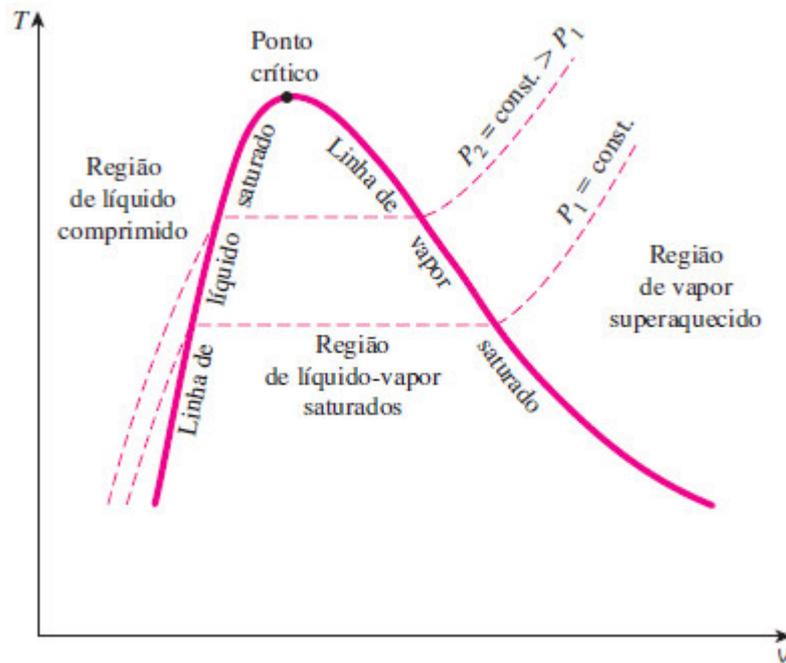
Em 1884, Sir Charles Person, combinando os conceitos de aplicação do vapor para movimentar um dispositivo mecânico com princípios de eletromagnetismo, inventou uma turbina a vapor capaz de gerar eletricidade. Essa turbina foi licenciada George Westinghouse e seu uso foi ampliado para escala industrial, o abriu espaço para sistemas de geração de vapor a altas temperaturas e pressões, bastante semelhantes ao que é utilizado nas indústrias atuais (B&W, 2015).

3.3.2 CONCEITOS

O vapor d'água consiste em um gás formado quando certa quantidade de água ainda no estado líquido recebe energia alterando o estado de agregação das moléculas, resultando na fase gasoso. Dependendo da pressão, a água vai evaporar a uma determinada temperatura formando vapor saturado, em que líquido e vapor coexistem em equilíbrio. Quanto maior for a pressão, maior a temperatura de vaporização. À medida que o vapor recebe calor, sua temperatura aumenta, e este passa a ser vapor superaquecido. Grande parte do calor recebido pelo vapor é transportado e transferido até um determinado ponto de uso, levando condensação do vapor. (RUSSEL; 1994; ÇENGEL; BOLES, 2013).

Conforme observado na figura 6, o vapor saturado se mantém em temperatura constante durante o processo de condensação quando a pressão é constante. Se o processo for sensível à variação de temperatura, o vapor é a opção mais adequada, já que em seu processo de condensação não existe gradiente de temperatura. Deste modo, a pressão controla de forma indireta a temperatura dos processos. Por esse motivo, em alguns casos é necessário reduzir a pressão do vapor no ponto de aplicação.

Figura 6 – Diagrama $T - v$ da água pura

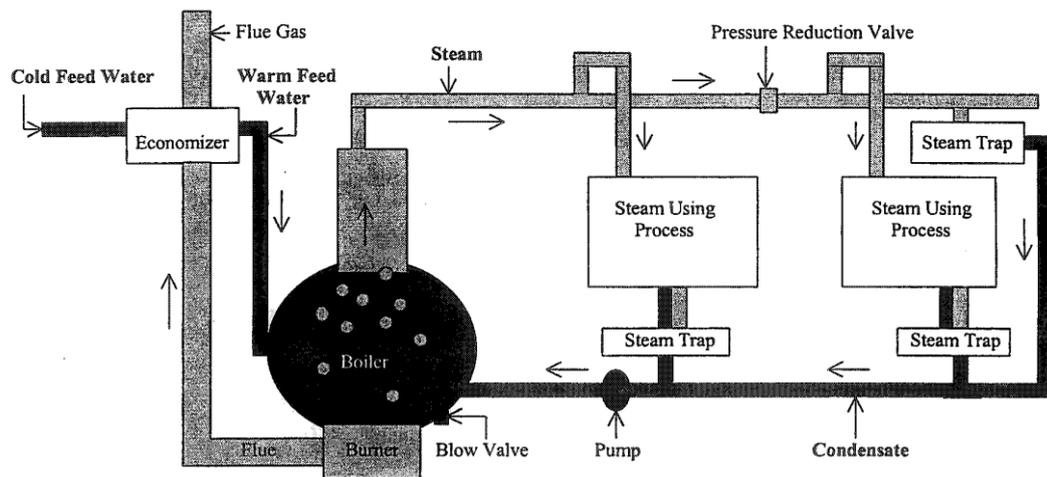


Fonte: Çengel; Boles (2013)

3.3.3 APLICAÇÕES

A utilização do vapor como fonte de calor e energia possui uma longa história que vai desde as aplicações domésticas de aquecimento pelos romanos até as grandes aplicações nos grandes ambientes industriais modernos. De modo geral, os sistemas de produção e distribuição de vapor seguem um padrão, como apresentado na figura 7, variando apenas em tamanho, capacidade e uso (EINSTEIN et al., 2001)

Figura 7 – Esquema de um sistema de produção e distribuição de vapor.



Fonte: EINSTEIN et al., (2001).

O setor industrial usa vapor para diversas finalidades, entre os mais importantes estão aquecimento, secagem, concentração, craqueamento a vapor e destilação. (EINSTEIN et al., 2001). O vapor pode ser aplicado nos processos para aquecimento direto, entrando em contato físico com a matéria a ser aquecida; ou ainda por aquecimento indireto, através do uso de trocadores de calor, podendo ser utilizado ainda para movimentação, limpeza e esterilização.

Os sistemas de vapor estão presentes em todos os processos industriais, nos Estados Unidos, por exemplo, cerca de 37% do combustível fóssil queimado é destinado para combustão a fim de produzir vapor.

Além do aquecimento, o vapor pode ser utilizado para movimentação de turbinas a fim de gerar eletricidade. Nesse tipo de equipamento, o calor é capaz de realizar trabalho e movimentar turbinas, convertendo a energia mecânica em elétrica. Para aplicação de vapor nesse tipo de sistema é necessário utilizar vapor superaquecido a fim de evitar danos as aletas das turbinas devido a formação de condensado (ROBERTS et al., 2017).

O vapor está entre os fluidos de trabalho mais utilizado na indústria, sendo o principal vetor de transporte de energia térmica para processos. Essa gama de aplicações se justifica pelas suas propriedades termo físicas que se alteram segundo a mudança de estado e pela facilidade em gerar vapor sobre diferentes condições. Durante o uso de vapor é comum ocorrer mudança de fase (vaporização e condensação) que originam variações de volume, resultando em um alto coeficiente de transferência térmica, que aliado a alta densidade térmica (calor latente), leva à altas taxas de transferência de calor (ROBERTS et al., 2017; NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

Além das propriedades físico-químicas já mencionadas, o vapor pode ser facilmente distribuído e controlado, não é tóxico nem inflamável. A água, que é o principal insumo para produção de vapor, costuma ser mais barata que outras matérias-primas e costuma ser disponível nos setores industriais. Além do mais, em muitos processos e indiretos o condensado consegue ser totalmente reutilizado, de modo a recuperar a água com alto percentual de pureza e teor de calor residual. Portanto, a produção de vapor costuma ter um custo baixo, tornando viável sua utilização (ROBERTS et al., 2017; (NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

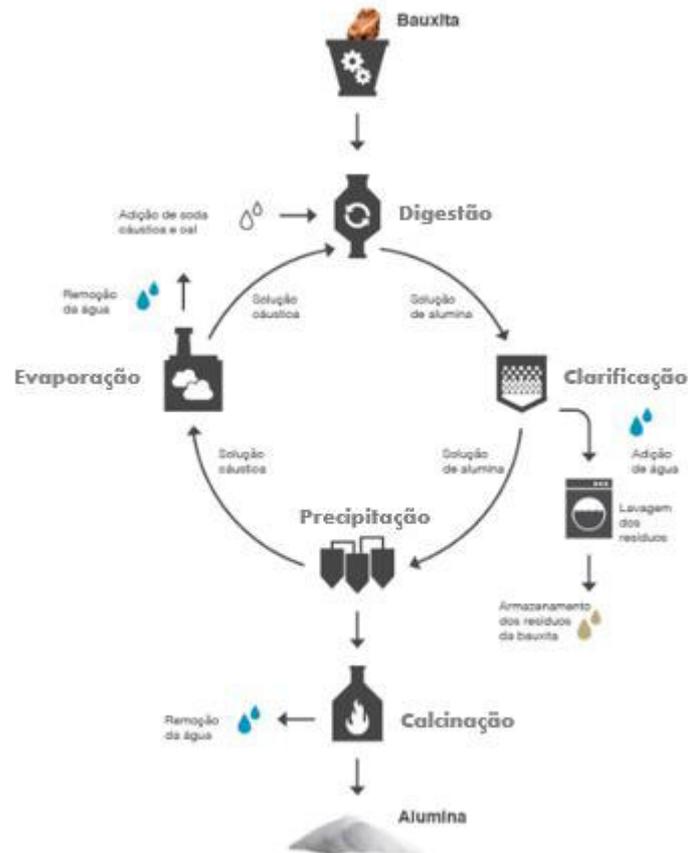
3.3.4 VAPOR EM REFINARIA DE ALUMINA

O principal objetivo de uma refinaria de alumina é extrair alumina da bauxita através do processo Bayer, que é o processo mais utilizado no mundo para produção de alumina. O processo Bayer consiste em um conjunto de operações com o objetivo de purificar a bauxita, de modo que se obtenha o hidróxido de alumínio ou alumina. A figura 8 apresenta esquema resumido com as principais operações que ocorrem durante este processo de transformação da bauxita em alumina (TORRES, 2001).

Em uma refinaria de alumina a principal função do vapor é garantir a condições necessárias de temperatura e pressão para que reação de extração, equação 1, de modo que esta possa ocorrer de modo efetivo. Dependendo da configuração da refinaria, o vapor produzido em caldeiras pode ser utilizado para gerar energia elétrica, que é consumida na própria refinaria. Geralmente, certa quantidade de vapor também pode ser destinada para etapa de evaporação. Além disso o vapor pode ser consumido ainda em trocadores de calor para lavagens, aquecedores de ar, água ou óleo, e sopragem de fuligem de caldeiras (JUNIOR, 2015).



Figura 8 – Fluxograma do Processo Bayer.



Fonte: Adaptado de Gomes et al. (2017).

3.4 Combustão

Uma reação bastante comum em todos os tipos de caldeiras é a reação de combustão. Neste tipo de reação química ocorre a oxidação de determinado combustível, liberando energia suficiente para aproveitamento. A maioria dos combustíveis são formados por carbono, hidrogênio, nitrogênio e enxofre que reagem com o oxigênio, liberando calor (BIZZO, 2003)

Em geral, os combustíveis podem ser gasosos, líquidos ou sólidos. Os gasosos costumam ser mistura de gases que são identificados individualmente. Os combustíveis líquidos destilados, como a gasolina ou querosene, podem ser separados e identificados. Enquanto combustíveis sólidos como o carvão, óleos e combustíveis residuais possuem compostos complexos, difíceis de separar em componentes individuais, como no caso dos combustíveis anteriores. (BAZZO,1995; BIZZO, 2003)

Entretanto para a maioria dos combustíveis sólidos é possível realizar uma análise elementar, que informa qual a composição do combustível em termos dos elementos carbono, hidrogênio oxigênio, nitrogênio e enxofre. Assim, com base nas equações das reações de combustão é possível calcular a quantidade de ar teórico e a composição dos produtos de combustão (BIZZO, 2003).

Grande parte dos processos industriais que envolvem combustão utiliza o ar ambiente como fonte de oxigênio. Assim, é necessário conhecer tanto a quantidade de ar para combustão quando a composição e quantidade dos produtos de combustão a fim de construir projetos e controlar os equipamentos. É a estequiometria da reação química da combustão que fornece as informações para os cálculos que vão determinar a quantidade de oxigênio e ar necessários, bem como as quantidades e composições dos produtos de combustão. A partir do peso molecular é possível determinar qual a massa de oxigênio será necessária para combustão completa, essa quantidade de específica de ar, é denominada ar teórico (BIZZO, 2003; KRISTINSSON; LANG, 2010).

Sabe-se que todo o combustível necessita, conforme sua composição, de uma quantidade específica e calculável de oxigênio e conseqüentemente de ar que fornece oxigênio para chegar uma reação completa. Caso se forneça uma quantidade subestequiométrica de ar teórico, certa quantidade de combustível não queimaria, tornando a combustão incompleta, perdendo assim a energia potencial do combustível. Se uma quantidade de ar maior que o teórico for fornecido na combustão, poderia haver perdas excessivas de calor através dos gases de combustão. As duas situações têm impactos negativos na eficiência da caldeira (KRISTINSSON; LANG, 2010).

Na prática, mesmo com as melhores condições de mistura deve ser utilizado uma quantidade adicional de ar, além do ar teórico, garantindo que haverá moléculas suficiente de oxigênio para reagir com as partículas do combustível e proporcionando uma combustão completa com alta eficiência. Esta quantidade de adicional é denominada ar em excesso. A soma do ar teórico como o ar em excesso é denominada ar total (BIZZO, 2003; KRISTINSSON; LANG, 2010).

3.4.1 ALIMENTAÇÃO DE AR EM ESTÁGIOS.

Em caldeiras, nos processos mais básicos, é comum haver somente uma fonte de ar. Todavia, com o objetivo de aumentar a eficiência e reduzir as emissões utiliza-se uma técnica de combustão em estágios que pode variar em complexidade e depende do tamanho da caldeira.

Nesse tipo de combustão o ar que alimenta a caldeira costuma ser distribuído em estágios ao longo da fornalha, assim o fluxo de ar é dividido em ar primário e secundário.

O ar primário é fornecido diretamente ao combustível, podendo variar no ponto de entrada conforme o tipo de caldeira e tipo de combustível. Nesta região de combustão primária a circulação de oxigênio é conservada abaixo da quantidade estequiométrica, é comum entre as concentrações estejam entre 55 e 80% do ar teórico. Na caldeira do tipo CFB, o ar primário é responsável pela fluidização do material que chega no leito da caldeira. Se o fluxo de ar primário não for controlado corretamente pode resultar em grandes quantidades de combustível não queimado, menor tempo de permanência do combustível entre outros problemas que podem impactar a eficiência negativamente (KRISTINSSON; LANG, 2010).

Para garantir a combustão completa, o ar secundário é introduzido na caldeira. Este costuma ser admitido em regiões acima do leito de combustão, em uma ou mais etapas, sendo denominado secundário e terciário ou ainda inferior e superior (KRISTINSSON; LANG, 2010; BASU, 2015)

3.4.2 CONTROLE DO EXCESSO DE AR

O controle do excesso de ar é um dos métodos mais eficazes para melhorar a eficiência de uma caldeira. Caso a quantidade de ar em excesso não seja controlado corretamente, pode resultar numa redução drástica da eficiência energética. Segundo a literatura, a quantidade de ar em excesso é um aspecto fundamental na operação de uma caldeira, de modo que em regra prática a redução do excesso de ar em 1% reduz em cerca de 1% uso de combustível (TURNER; DOTY, 2017)

3.5 Geradores de Vapor

3.5.1 DEFINIÇÕES E CONCEITOS

O gerador de vapor mais utilizado na indústria é a Caldeira, que consiste basicamente em um trocador de calor que opera em pressões superiores a pressão atmosférica, gerando vapor a partir da energia térmica de uma determinada fonte. Uma caldeira é composta por diversos equipamentos que juntos podem proporcionar maior rendimento térmico e segurança. Na maioria dos casos, a fonte de calor é proveniente de um combustível sólido, líquido ou gasoso

destinados especialmente para queima. (BASSO, 1995; NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

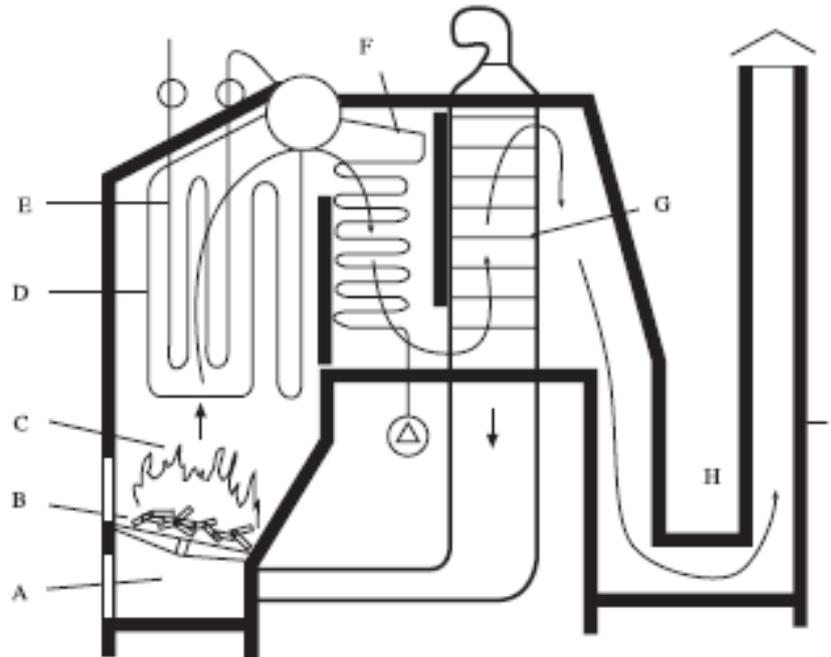
3.5.2 FUNCIONAMENTO

Via de regra uma caldeira possui dois sistemas principais: no primeiro, a fornalha envolve o local onde ocorre a queima do combustível. Durante o processo de queima, as cinzas pesadas caem ao fundo da fornalha, enquanto as cinzas leves são arrastadas pelos gases para região superior, em direção ao superaquecedores. Já o segundo sistema compreende as partes onde ocorre a mudança de fase da água. Nas caldeiras, água inserida no tubulão se distribui em tubos ascendentes e descendentes que ficam dispostos na parede da fornalha, um ao lado do outro, revestindo as paredes. Com a diferença de densidade a água circula livremente e o vapor formado se acumula na parte superior do tubulão, o vapor resultante encaminhado para os superaquecedores (BAZZO, 1995; ROBERTS et al., 2017).

3.5.3 COMPONENTES BÁSICOS DAS CALDEIRAS

Os sistemas geradores de vapor são formados e configurados conforme as normas vigentes de cada país, de modo a se aproveitar da melhor maneira possível a energia liberada durante a combustão. Devido a diversidade de combustíveis, as caldeiras podem ter diferentes designs configurações. No entanto, de modo geral até mesmo caldeiras de grande porte costumam ser compostas por um conjunto de equipamentos básicos. Entre os principais equipamentos estão o cinzeiro ou moega, fornalha, câmara de combustão, tubos evaporadores, superaquecedores, economizadores, pré-aquecedores e chaminé. A figura 12 apresenta um esquema resumido de uma caldeira de vapor com os componentes citados (NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

Figura 9 – Componentes de uma caldeira: A) Moega de Cinza; B) Fornalha; C) câmara de combustão; D) Tubos Evaporadores; E) Superaquecedores; F) Economizadores; G - Pre aquecedores de ar; H) canais de gases; I) - Chaminé



Fonte: Nogueira; Nogueira; Rocha (2005).

3.5.3.1 Moega de cinza

Este elemento consiste em um local específico para onde se depositam as cinzas ou que eventualmente armazenam restos de combustível que escapam da região de queima sem completarem seu processo de combustão. (NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

3.5.3.2 Fornalha

A fornalha é o local das caldeiras onde se inicia a reação de combustão que vai converter a energia química do combustível em energia térmica. Dependendo do tipo e das características do combustível, projetos podem se alternar em entre fornalhas par queima em suspensão, queima em grelha ou queima em leito fluidizado (NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

Fornalhas que queimam combustível em regime de suspensão costumam ser mais abrangente, permitindo a queima de óleo, carvão pulverizado e até gás natural. Outros tipos de resíduos como serragens e cascas de arroz também podem ser empregados nesse tipo de fornalha (BAZZO, 1995)

As fornalhas de queima a grelha e de leito fluidizado, por sua vez, já possuem uma aplicação mais direcionadas para unidade de médio porte e grande porte, com consumo de combustíveis sólidos. Nos últimos anos a aplicação de caldeiras em regime de leito fluidizado tem se justificados pelo elevado teor de cinzas presentes em combustíveis fosseis e pela utilização de combustíveis nem sempre nobres (BIZZO, 2003)

3.5.3.3 Câmara de combustão

Consiste no volume em que todo o combustível deve ser consumido antes mesmo que os produtos de combustão alcancem os feixes tubulares. Em alguns casos pode ser confundida com apropriá fornalha, em outros pode ser separada.

3.5.3.4 Vaso e Tubos evaporadores

São constituídos por um ou mais vasos fechados e pressurizados com tubos que contêm água em seu interior, que ao receber calor se transforma em vapor (NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

3.5.3.5 Superaquecedores

Os superaquecedores são feixes tubulares que tem por finalidade elevar a temperatura do vapor que deixa o vaso evaporador (tubulão). Além disso, costumam ser localizados de um modo que possam aproveitar o máximo de calor ainda disponível nos gases de exaustão (BAZZO, 1995).

3.5.3.6 Economizadores

Os economizadores são trocadores de calor destinados a elevar a temperatura da água de alimentação da caldeira, por intermédio do aproveitamento de energia residual ainda disponível nos gases de exaustão. Normalmente são instalados após os superaquecedores e antes de aquecedores de ar (NOGUEIRA. L.; NOGUEIRA, F.; ROCHA, 2005).

3.5.3.7 Aquecedores de ar

Os quecedores de ar são equipamentos destinados a aumentar a a temperatura do que participa da combustão. Costumam se localizar no trajetódio de saída dos gases de exasutão e estão logo depois do economizadores (BAZZO, 1995; NOGUEIRA. L.; NOGUEIRA, F.; ROCHA, 2005).

3.5.3.8 Gaiola de convecção ou canal de gases

É uma região intermediária entre o final da camara de combustão e o final da circulação dos gases, podendo ser fabricadas de alvenaria ou chapas de aço, confrome a temperatura dos gases circulam por ela (NOGUEIRA. L.; NOGUEIRA, F.; ROCHA, 2005).

3.5.3.9 Chaminé

A chaminé é a parte que garante a expulsão dos gases a uma determinada velocidade e altura para o ambiente de modo a promover a boa circulação dos gases quentes através de um sistemas de tiragem, que nada mais é do que a movimentação dos gases a partir da ação de ventiladores centrífugos, associado ao efeito de sucção da chaminé (NOGUEIRA. L.; NOGUEIRA, F.; ROCHA, 2005).

3.5.4 CLASSIFICAÇÕES

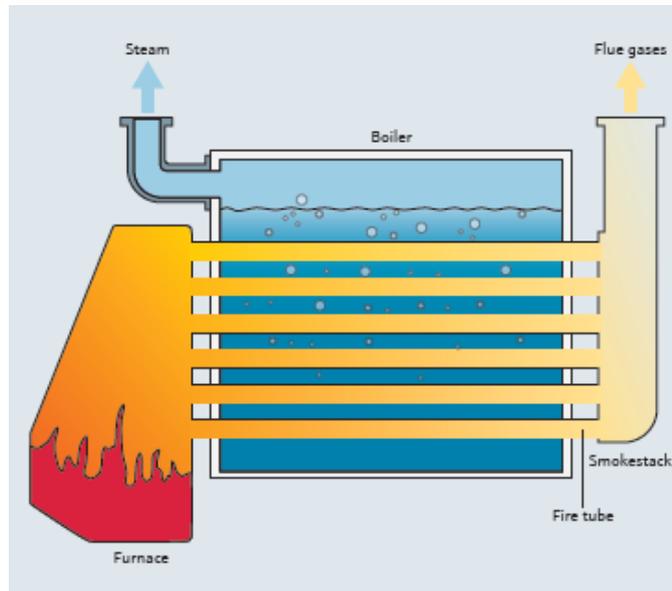
As cadeiras podem ser classificadas a partir de diferentes aspectos, como quanto a disposição da água em relação aos gases, podendo ser do tipo aquatubular ou flamotubular; quanto a energia empregada na geração de calor, podendo ser a combustível, elétrica ou de recuperação; quanto a montagem, sendo do tipo compacta ou montada em campo; e quanto a circulação de água, com circulação natural ou forçada (RAYPROLU, 2009; ROBERTS, et al, 2017)

3.5.4.1 Caldeiras Flamotubulares

As Caldeiras flamotubulares ou pirotubulares consistem em geradores de vapor em que os gases provenientes da combustão circulam através do interior de tubos, em uma ou mais

etapas, e a água fica do lado de fora dos tubos. A figura 9 mostra o esquema de uma caldeira flamotubular (ROBERTS et al., 2017; NOGUEIRA; NOGUEIRA; ROCHA, 2005).

Figura 10 – Esquema de uma caldeira flamotubular



Fonte: ROBERTS et al. (2017).

3.5.4.2 Caldeiras Aquatubulares

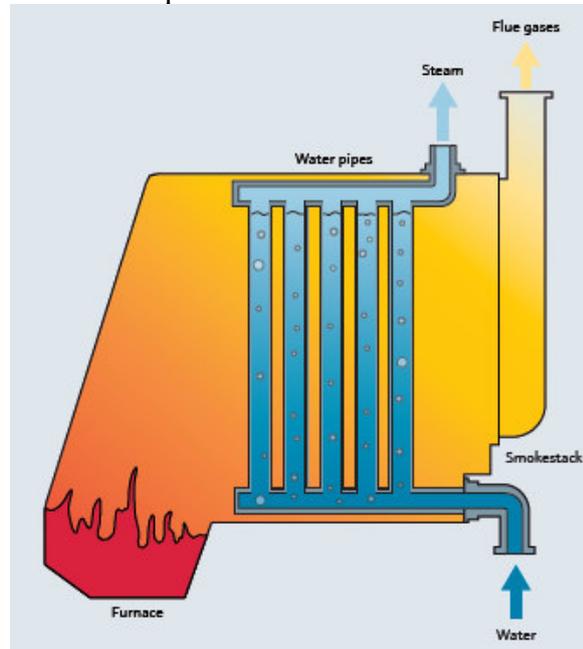
As Caldeiras aquatubulares possui uma configuração em que os gases quentes provenientes da combustão circulam por uma parte externa ao feixe tubular, enquanto a água circula pelo interior dos tubos, recebendo a energia da combustão e transformando a água líquida em vapor (ROBERTS et al., 2017). Um esquema da configuração de uma caldeira aquatubular é mostrada na figura 10.

3.5.4.3 Cadeiras de leito fluidizado circulante - CFB

A Caldeira de leito fluidizado circulante–CFB (Circulating Fluidized Bed) é um gerador de vapor que queima o combustível sob condições especiais de circulação, assim a combustão ocorre no regime de fluidização, isto é, os sólidos presentes no leito da caldeira são movimentados a uma velocidade superior à velocidade terminal das partículas, existindo ainda recirculação de sólidos que homogeneizando a temperatura na fornalha. Em uma caldeira CFB a velocidade dos gases deve ser alta e suficiente para soprar todas as partículas sólidas para fora da fornalha. Os sólidos que saem do forno são capturados por um separador gás-sólido, assim

as partículas mais grossas são recirculadas para base da fornalha, proporcionando uma temperatura homogênea e um grau mínimo de mistura vertical dos sólidos no leito (BASU, 2006, 2015).

Figura 11 – Esquema de uma caldeira aquatubular

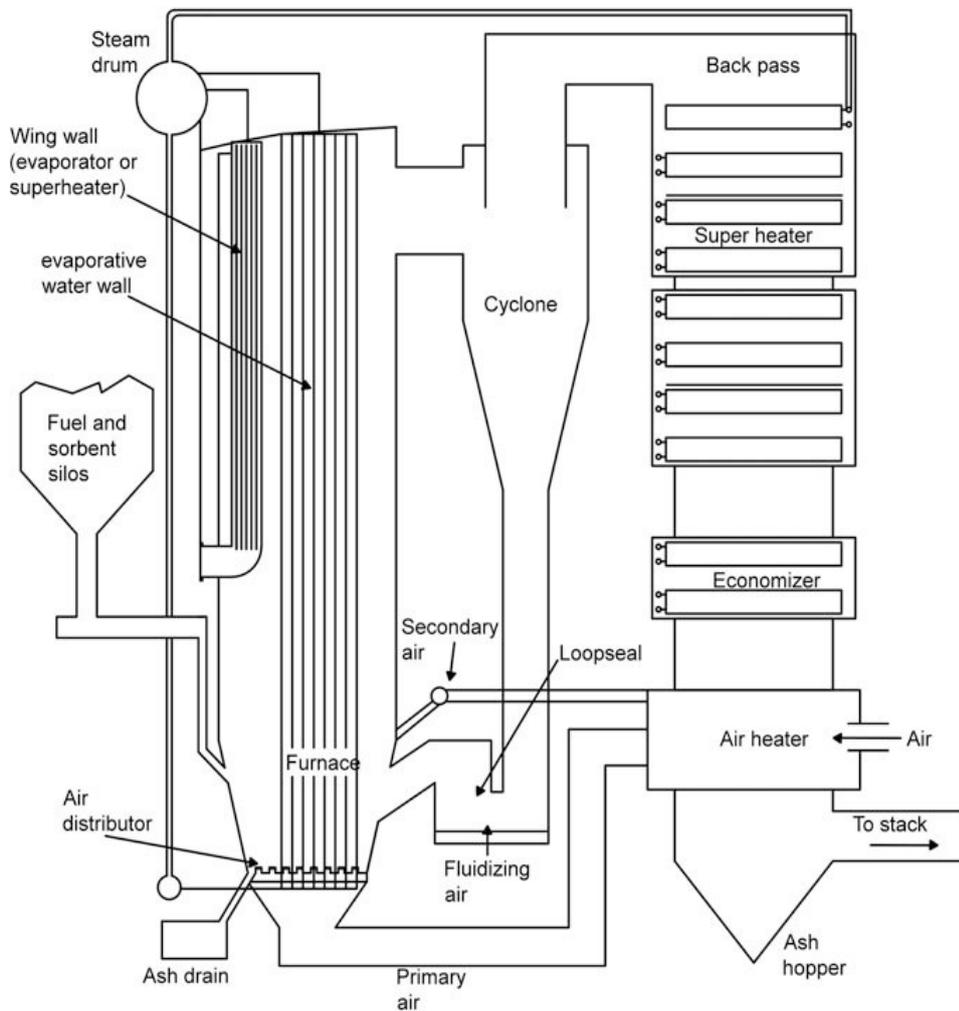


Fonte: ROBERTS, et al, 2017

A figura 11 apresenta o esquema de uma caldeira CFB. Neste tipo de caldeira, o ar de combustão primário (abaixo da quantidade estequiométrica) é injetado na região inferior da fornalha, enquanto o ar secundário é inserido pelas regiões laterais da fornalha a certa altura na fornalha. O combustível, por sua vez, é injetado na parte inferior do forno onde em contato com oxigênio queima gerando calor. Uma parte do calor gerado é absorvido pela superfície dos tubos por onde a água passa, e restante é absorvido na seção convectiva que se localiza a jusante da fornalha denominada caixa de convecção (BASU, 2006, 2015).

Uma caldeira de leito fluidizado circulante se divide em duas regiões principais: a primeira onde ocorre a combustão e onde os tubos são aquecidos; e a segunda, é a região da caixa de convecção composta por superaquecedores, pré-aquecedores e economizadores. O forno de uma caldeira CFB contém um estoque de sólidos granulares, denominados material do leito, estes costumam apresentar um tamanho de 0.1 a 0.3 mm. Esse material pode ser formado por areia; cinzas; e calcário novo ou usado. Caso o combustível queimado tenha alto teor de enxofre, as cinzas provenientes desse combustível conterão certo teor de enxofre (BASU, 2006, 2015).

Figura 12 – Diagrama esquemático de uma caldeira de leito fluidizado circulante - CFB



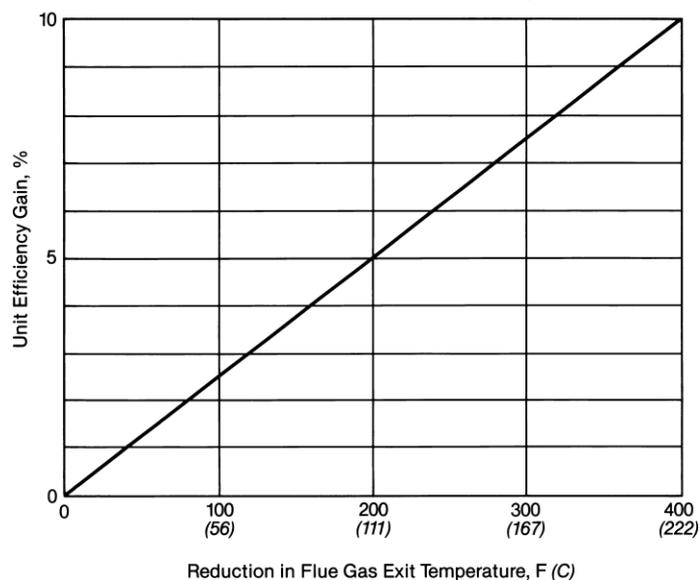
Fonte: BASU, 2015

Uma caldeira de leito fluidizado circulante se divide em duas regiões principais: a primeira onde ocorre a combustão e onde os tubos são aquecidos; e a segunda, é a região da caixa de convecção composta por superaquecedores, pré-aquecedores e economizadores. O forno de uma caldeira CFB contém um estoque de sólidos granulares, denominados material do leito, estes costumam apresentar um tamanho de 0.1 a 0.3 mm. Esse material pode ser formado por areia; cinzas; e calcário novo ou usado. Caso o combustível queimado tenha alto teor de enxofre, as cinzas provenientes desse combustível conterão certo teor de enxofre (BASU, 2006, 2015).

3.6 Aquecedores de ar

Os Aquecedores de ar desempenham uma função fundamental no aumento de eficiência térmica geral de uma caldeira, uma vez que recuperam o calor ainda presente nos gases de exaustão. Segundo a literatura, para cada a redução de 22 °C na temperatura dos gases devido ao sistema economizador e aquecedor, com ar em excesso normal e sob controle, a eficiência da caldeira pode aumentar em até 5%, conforme mostrado na figura 13 (B&W, 2015).

Figura 13 – Aumento na eficiência de uma caldeira devido à redução de temperatura dos gases pelo economizador e aquecedor.



Fonte: B&W (2015).

O aumento da temperatura do ar de combustão costuma melhorar a queima de vários tipos combustíveis. Os aquecedores de ar são usados na maioria das plantas geradoras de vapor para aquecer o ar de combustão e aprimorar o processo de queima. Com maior frequência, o gás de combustão ainda funciona como fonte de energia e o aquecedor de ar serve como coletor final do calor. De maneira geral os aquecedores de ar costumam ficar localizados na parte traseira da caldeira, onde recebe os gases de exaustão quente vindos do economizador e os gases mais frios dos ventiladores de tiragem forçada (B&W, 2015).

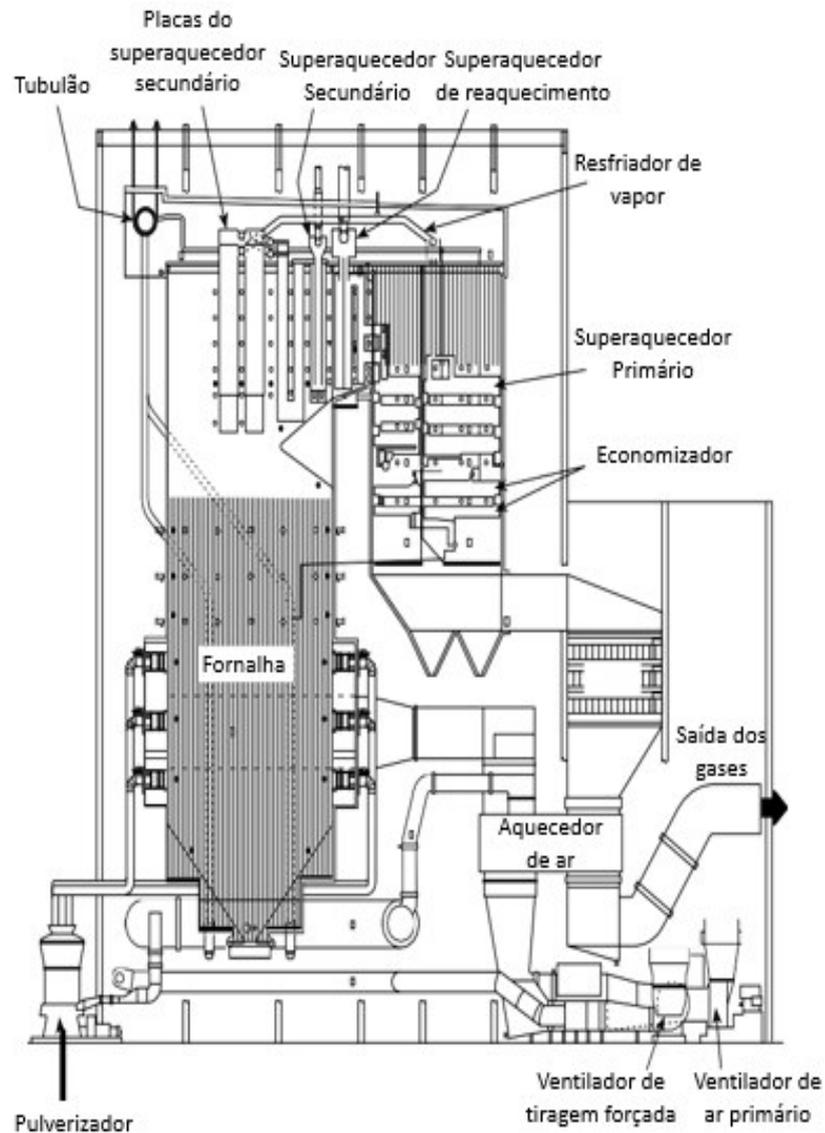
3.6.1 CLASSIFICAÇÃO

Os aquecedores de ar são classificados de acordo com seu princípio de operação, podendo ser do tipo recuperativos ou regenerativos

3.6.1.1 Aquecedores recuperativos

Os aquecedores de ar regenerativos consistem em trocadores de calor que recuperam calor continuamente e diretamente por superfícies estacionárias sólidas e fixas, separando a corrente fluxo de gases quentes corrente de gases frios. As superfícies de transferência de calor mais comuns são tubos e placas paralelas. Os aquecedores de ar recuperativos costumam operar com pouca contaminação cruzada ou pouco vazamento entre os fluxos (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

Figura 14 – Localização do economizador e aquecedores de ar em uma caldeira a carvão.

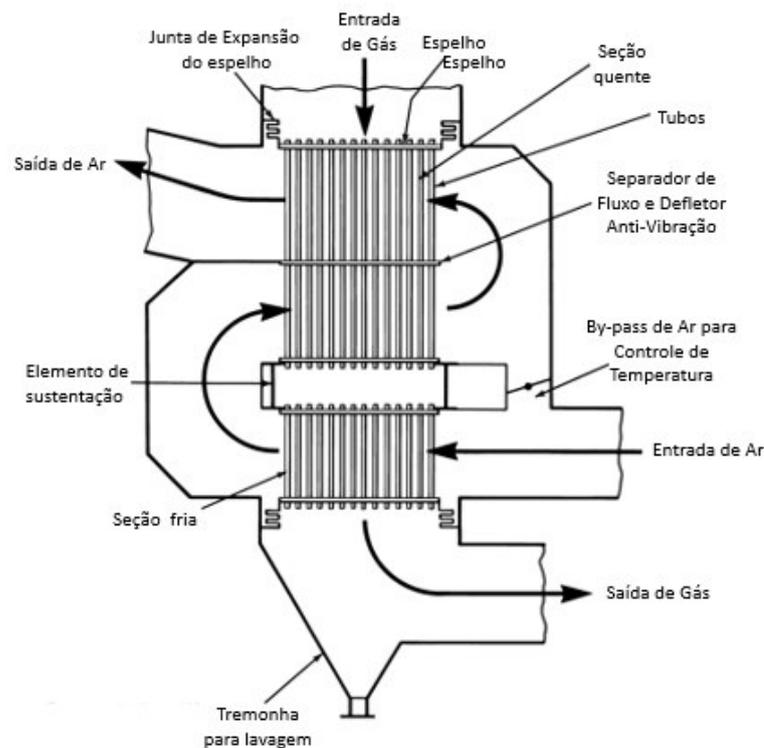


Fonte: B&W (2015).

3.6.1.1.1 Aquecedores recuperativos de tubos

Nos aquecedores de ar tubulares o calor do gás de combustão flui de dentro de tubos com paredes finas para o ar de combustão. Uma unidade de tubos costuma ser composta por um conjunto de tubos retos que são expandidos ou soldados em chapas e isolados em uma coisa de aço, como pode ser visto na figura 15 (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

Figura 15 – Aquecedor de ar tubular vertical.



Fonte: B&W (2015).

Os sistemas de aquecedores de ar podem vir acompanhados com sopradores de fuligem para remoção das cinzas acumuladas na tubulação que fica exposta aos gases de exaustão durante a operação da caldeira (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014)..

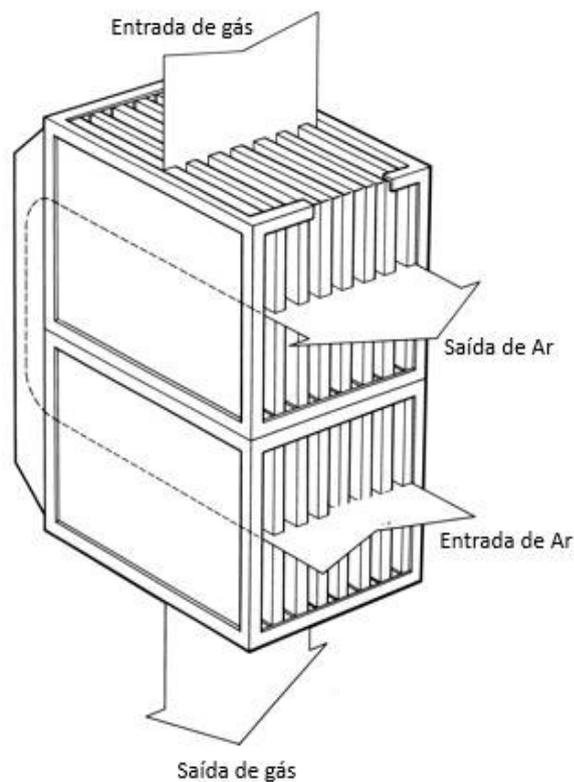
Quanto ao arranjo desses aquecedores, o mais comum é em contra fluxo com o gás passando verticalmente por meio dos tubos, enquanto o ar circula horizontalmente em um ou mais passes pelo tubo. Ainda assim, uma variedade de passe único ou múltiplo podem ser utilizados para atender aos layouts e configurações de uma planta e as demandas das conduções de um processo. É bastante frequente que esses arranjos acomodem desvios de fluxo de ar frio,

recirculação e pré-aquecedores de ar com aquecedores de água/vapor separados para controlar as taxas de corrosão e a fuligem das cinzas (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

3.6.1.1.2 Aquecedores recuperativos de placas

Os aquecedores de ar regenerativos são trocadores de calor de placas que transmitem o calor recebido do gás quente que circula por um lado de uma placa, enquanto o ar frio flui pelo lado oposto. Estes tipos de aquecedores são formados por pilhas de placas posicionadas paralelamente, sendo que a vedação entre as placas é feita por soldagem ou pela combinação de juntas e mola. Os módulos das placas nesse tipo de sistema ainda podem ser combinados para criar aquecedores de diferente tamanho e variedade na disposição dos fluxos. Na figura 16, por exemplo, é possível ver um modelo com passe único para os gases e passe duplo para o ar (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

Figura 16 – Aquecedor de placas com passe duplo para ar e passe único para gás



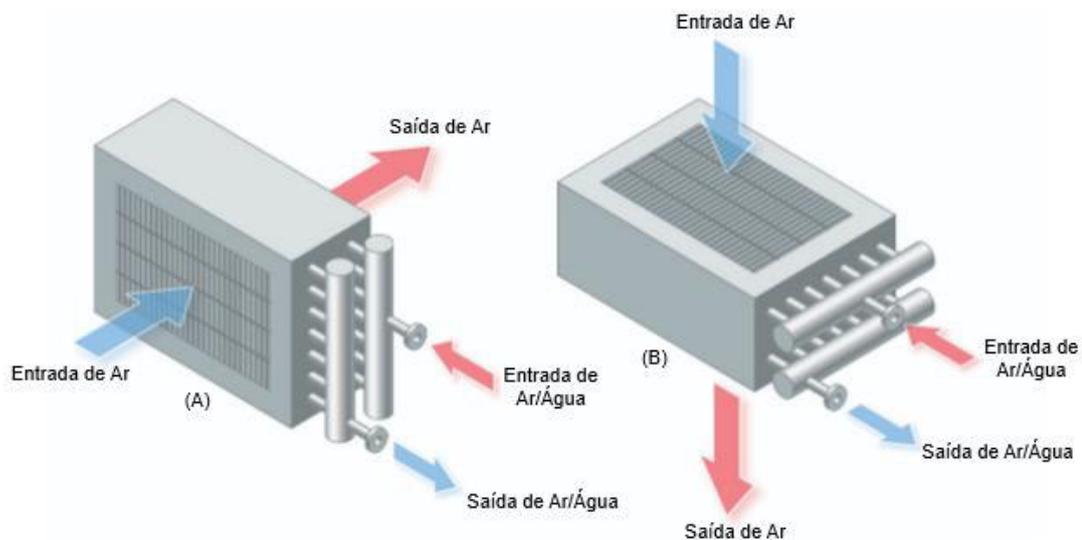
Fonte: B&W (2015).

3.6.1.1.3 Aquecedores de ar com serpentinas de ar ou água

Os aquecedores recuperativos com serpentinas de ar e água são trocadores de calor do tipo serpentina em que o fluido frio (ar ou água) passe pelas serpentinas absorvendo o calor dos gases. Este tipo de equipamento é largamente aplicado em planta geradoras de vapor para eletricidade para pre aquecer o ar de combustão de caldeiras. Essa etapa de pré-aquecimento costuma mitigar potenciais problemas com corrosão e entupimento na extremidade mais fria de aquecedores regenerativos ou recuperativos. Muito raramente, este tipo de equipamento serve como fonte única de calor para o ar de combustão (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

Aquecedores desse tipo costuma ser compostos de bancos com tubos de diâmetros pequenos, possuindo aletas extras, dispostas na horizontal ou na vertical em dutos localizados entre o ventilador de ar de combustão e o aquecedor de ar principal. Em locais onde o clima é mais frio, estes tipos de aquecedores podem ser deslocados para a entrada dos ventiladores retira o ar da atmosfera. Além disso podem ter uma configuração vertical ou horizontal, conforme a necessidade e configuração exigida pela planta, como mostrado na figura 17 (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

Figura 17 – Aquecedores de ar com serpentinas de ar/água, (A) Aquecedor com serpentina vertical, (B) Aquecedor com serpentina horizontal.



Fonte: Advanced Coil [2015?]

3.6.1.2 Aquecedores de ar regenerativos

Os aquecedores de ar regenerativos são trocadores que transferem calor de modo indireto através de convecção, nele os gases quentes e o ar frio fluem através de superfícies armazenadoras de calor e que se movem entre o gás quente e o gás frio. Em resumo, nessas unidades de aquecimento, as placas de aço ou os elementos de superfície giram através das correntes de ar e gás ou dutos rotativos que direcionam as correntes de ar e gás através dos elementos de superfície estacionários. Os aquecedores de ar regenerativos são classificados de acordo com a disposição das placas ou elementos de superfície, podendo ser do tipo com placas rotativas ou Ljungström® ou com placas estacionárias ou Rothemühle® (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

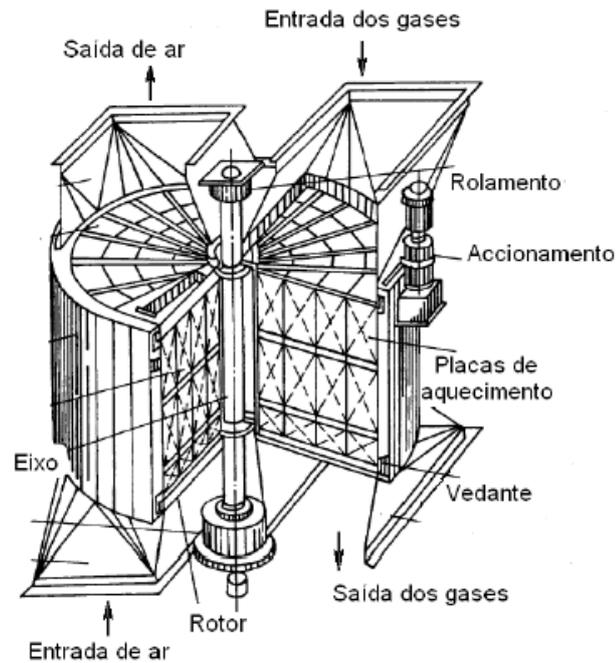
3.6.1.2.1 Aquecedores recuperativos de placa rotativa ou Ljungström®

Os aquecedores de ar regenerativos de placa rotativa ou Ljungström® são compostos estrutura com uma carcaça cilíndrica fixa, recheada com os elementos de superfícies ou placas de aquecimento que se movimentam a uma velocidade baixa, de 1 a 3 rpm. O gás quente costuma entrar no topo do da estrutura à medida que o ar frio entra no fundo, com fluxo de gás e ar em contracorrente. De um lado da estrutura cilíndrica, uma corrente de gases quentes flui através de placas, que absorvem calor, se aquecem, resfriando os gases. Do outro lado, um fluxo de ar frio escoia pelas placas quentes, transferindo energia para o ar e aquecendo-o. Um esquema deste tipo de trocador pode ser observado na figura 18 (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

3.6.1.2.2 Aquecedores recuperativos de placas estacionárias ou Rothemühle®.

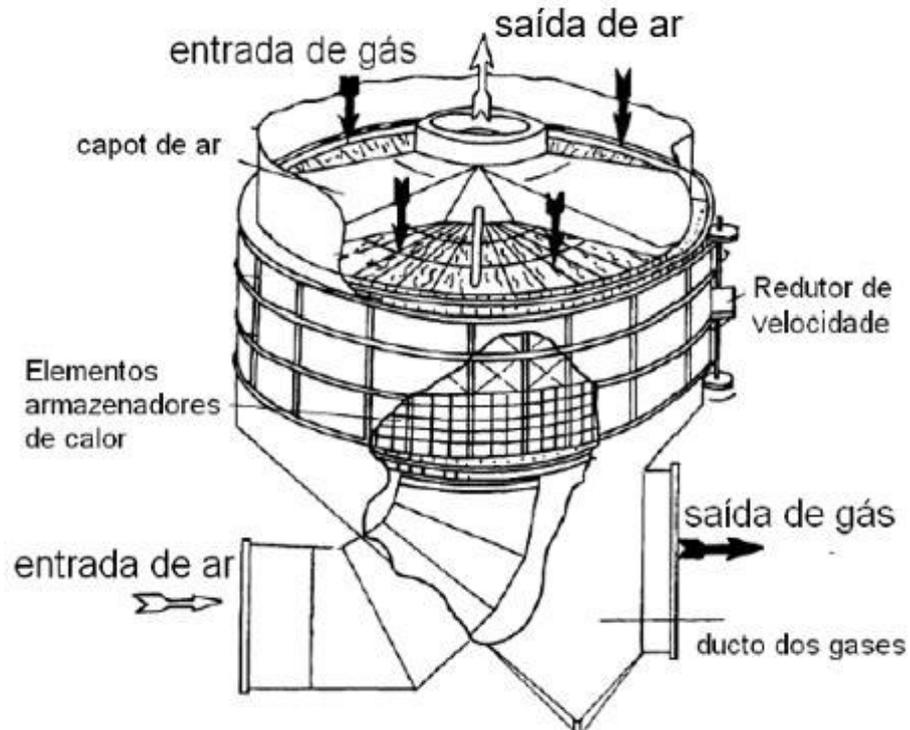
Os aquecedores de ar regenerativos de placa estacionária ou Rothemühle® utilizam elementos de superfície ou placas estacionárias enquanto dutos de ar e gás são rotacionados. As placas são suportadas no interior de uma carcaça cilíndrica estático, denominado estator. Um fluxo de gás quente entra por um duto superior externo que gira, transfere calor para as placas e diminui sua temperatura. Enquanto isso, uma corrente de ar frio, em contracorrente, entra por um duto central interno que se movimenta, recebe calor das placas quentes, aumentando a temperatura. A figura 19 apresenta um esquemático deste tipo de equipamento (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

Figura 18 – Aquecedores recuperativos de placa rotativa ou Ljungström®



Fonte: Nhambiu (2014).

Figura 19 – Aquecedores recuperativos de placas estacionárias ou Rothemühle®.



Fonte: Nhambiu (2014).

3.5.1.3 Condições operacionais

Durante a operação dos aquecedores de ar é necessário controle de uma série de condições a fim de evitar problemas relacionados a formação de ácido sulfúrico, corrosão, incrustação e redução de desempenho de troca térmica destes equipamentos.

Se o combustível possuir certo teor de enxofre, durante reação de combustão produz-se o SO_2 que costuma ser convertido em SO_3 , este ao reagir com a umidade forma ácido sulfúrico nos gases de combustão. O vapor de SO_3 no gás de combustão costuma condensar em superfícies com temperaturas em torno de 121 a 149°. Essa temperatura depende das pressões parciais do SO_3 , do vapor de água contido nos gases e do tipo e condições operacionais da caldeira. Logo, diferentes tipos e designs são projetados a fim de evitar este tipo de condição (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

Incrustações em aquecedores podem ocorrer sempre que as superfícies de transferência de calor são cobertas por cinzas ou produtos de corrosão, reduzindo significativamente o desempenho térmico do equipamento. Estes problemas são evitados através da realização sopragem de fuligem periódica e do controle de temperatura dos gases na extremidade fria do trocador. (B&W, 2015; NHAMBIU, 2014).

3.7 Eficiência de caldeiras

A eficiência da caldeira é comumente confundida com eficiência térmica. Porém, a eficiência real de uma caldeira é aquela que relaciona a quantidade de energia disponível no combustível pela quantidade de energia obtida ao final do processo. De modo geral a eficiência de uma caldeira pode ser definida como a energia produzida pela entrada de energia no volume de controle da caldeira, como mostra a equação 2 (CLEAVER BROOKS, 2010; ASME, 2013).

$$EF = 100 \frac{\text{Saídas}}{\text{Entrada}} = 100 \frac{Q_L}{Q_E} \quad (2)$$

Onde; EF é a eficiência de uma caldeira em %;

Q_L é energia absorvida pelo fluido de trabalho da caldeira que não é recuperada em W;

Q_E é energia que entra na caldeira em W;

A eficiência combustível / vapor, que é responsável por perdas de radiação e convecção, é uma verdadeira indicação da eficiência geral da caldeira. O termo “eficiência da caldeira” deve ser definido pelo fabricante da caldeira antes de ser usado em qualquer avaliação econômica. Deste modo, considera tanto pela eficácia do trocador de calor, como as perdas associadas a radiação e convecção (CLEAVER BROOKS, 2010).

A definição da eficiência é uma grandeza fundamental para o desenvolvimento do projeto e operação de caldeiras. Na ausência de normas nacionais, é comum utilizar a norma American Society of Mechanical Engineers (ASME) 4-2013 para determinar a eficiência de caldeiras. Segundo essa norma a eficiência de combustível para vapor de uma caldeira pode ser determinada por dois métodos: o método Entradas-Saídas ou direto e o Método por Balanço de Massa e Energia ou Método indireto.

3.7.1 MÉTODO ENTRADA-SAÍDA OU DIRETO

Conforme o a ASME (2013) a eficiência pelo método Entrada-Saída é determinada pela equação geral de eficiência, e se fundamenta medição do fluxo de entrada do combustível e os fluxos energéticos que saem da caldeira (aquecimento de água, superaquecimento de vapor, incluindo purgasse outros). Para o calcular da eficiência, basta reescrever a equação 2, obtendo-se a equação 3.

$$EF = 100 \frac{Saídas}{Entrada} = 100 \frac{Q_L}{M_C PCS} \quad (3)$$

Onde; EF é a eficiência de uma caldeira em %;

Q_L é energia absorvida pelo fluido de trabalho da caldeira que não é recuperada em W

M_C é a vazão do combustível em kg/s;

PCS é o poder calorífico superior do combustível em J/kg.

A incerteza de eficiência calculada pelo método de entrada e saída é diretamente proporcional à incerteza na medição do fluxo de combustível. Portanto, para resultados confiáveis, é necessário tomar cuidado para determinar com precisão esse item (ASME, 2013).

3.7.2 MÉTODO POR BALANÇO DE ENERGIA OU INDIRETO.

No cálculo da eficiência pelo método de balanço de energia utiliza-se um balanço global considerando todas entradas, saídas, créditos e perdas de energia existentes na caldeira. Assim, a equação 2 pode ser reescrita, resultando na equação 3 (ASME, 2013).

$$EF = 100 \left(\frac{Q_E + Q_A - Q_L}{Q_E} \right) \quad (4)$$

Onde: EF é a eficiência da caldeira em %;

Q_E é a energia que entra na caldeira em W;

Q_A é a energia adicional que entra na caldeira em W;

Q_L é energia absorvida pelo fluido de trabalho da caldeira que não é recuperada em W

3.7.3 FATORES QUE IMPACTAM NA EFICIÊNCIA DE UMA CALDEIRA

Quando se fala em economia de energia em caldeiras, inevitavelmente se discute sobre a eficiência destes equipamentos, deste modo, faz-se necessário conhecer os principais fatores que podem influenciar na eficiência de uma caldeira.

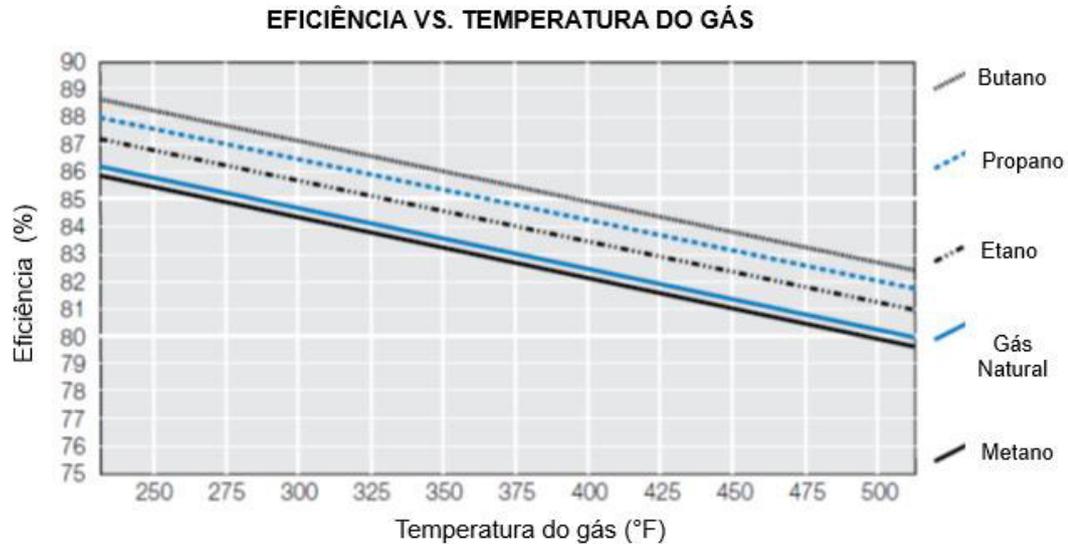
3.7.3.1 Temperatura dos gases de combustão

Essa temperatura se refere basicamente a temperatura de saída dos gases que deixam a caldeira e seguem para chaminé. Essa temperatura representa a energia que não foi utilizada durante o processo de queima do combustível e que está sendo perdida para atmosfera. Assim, quanto maior for essa temperatura, menor será a energia transferida para a água se transformar em vapor, mais energia será perdida pela chaminé e menor será a eficiência da caldeira (BHATIA, 2015).

A figura 20 apresenta um gráfico que relaciona a eficiência com temperatura dos gases, para cada temperatura dos gases existe uma eficiência máxima para determinados combustíveis (butano, propano, metano, e gás natural). É possível notar a relação linear e inversamente proporcional desta temperatura com eficiência. Assim qualquer variação de temperatura para

mais ou para menos pode resultar numa variação de eficiência da caldeira (CLEAVER BROOKS, 2010)

Figura 20 – Curva de Eficiência em função da Temperatura dos Gases para Butano, Propano, Etano, Gás Natural e Metano.



Fonte: Cleaver Brooks (2010).

3.7.3.2 Poder calorífico e especificações do combustível

Para calcular a eficiência de uma caldeira é fundamental conhecer o poder calorífico do combustível, que é a quantidade de energia na forma de calor por unidade de massa que será liberado durante a oxidação do combustível. De maneira geral, os combustíveis costumam ter dois calores de referência para quantificar sua energia: o poder calorífico superior – PCS e o poder calorífico inferior – PCI. Outros fatores também são relevantes como o a relação entre hidrogênio e carbono, o estado da água liberada após a combustão (CLEAVER BROOKS, 2010; BHATIA, 2015)

O poder calorífico superior pode ser definido com a soma da energia liberada na forma de calor na reação de combustão mais a entalpia de condensação da água formada na combustão. Enquanto o poder calorífico inferior corresponde somente a energia liberada na forma de calor durante a reação de combustão, sem aproveitar a energia proveniente do vapor de água formado durante a combustão. Para combustíveis que não contêm hidrogênio, o PCS costuma ser igual ao PCI uma vez que não há a formação de vapor de água. Na maioria dos casos, o PCS é maior que o PCI (BHATIA, 2015; ÇENGEL; BOLES, 2013).

Em caldeiras, a temperatura dos gases costuma ser bastante elevada, portanto a água formada no processo de combustão se encontra no estado gasoso. Deste modo, o mais adequado seria utilizar nos cálculos de eficiência o poder calorífico inferior, todavia se a caldeira possuir um bom sistema de recuperação de calor (superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar) o ideal é utilizar no cálculo da eficiência o PSC, uma vez que estes elementos consegue aproveitar a energia do vapor d'água (BHATIA, 2015).

O PCS é bem mais utilizado para o cálculo de eficiência de caldeiras, pois assume que todo o calor disponível no combustível foi aproveitado. Utilizando o PCS o cálculo da eficiência resulta em valores menores que 100% devido a perdas de energia que não podem ser recuperadas. Como citado acima, ambos os poderes calorífico podem ser utilizados no cálculo da eficiência, no entanto deve ficar claro se a base de cálculo utiliza o PCI ou PCS (BHATIA, 2015).

Outras especificações do combustível também têm impacto significativo sobre a eficiência de caldeiras. Por exemplo, combustíveis com maior conteúdo de hidrogênio favorecem a formação de vapor de água, resultado em maiores perdas de energia, pois o vapor absorve calor e reduz a eficiência. A partir disto, o cálculo da eficiência deve considerar o tipo e composição do combustível que está sendo utilizado na caldeira (CLEAVER BROOKS, 2010).

3.7.3.3 Excesso de ar

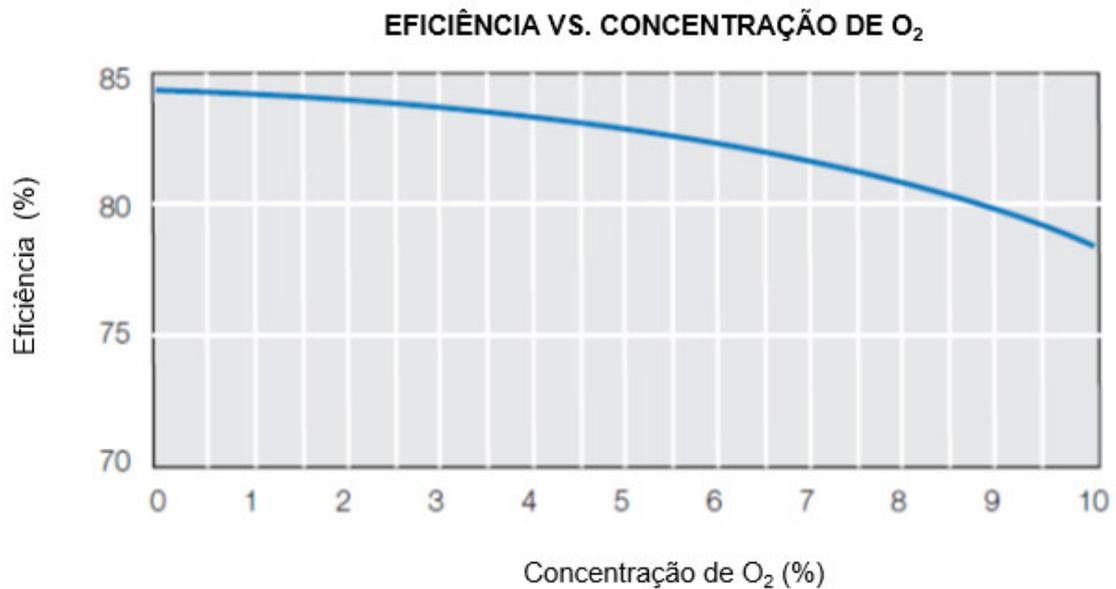
Considerando que o excesso de ar é um volume de ar adicional fornecido a caldeira, caso esta quantidade seja muito grande, esse volume de ar utiliza energia disponível do processo de combustão para se aquecer e saindo na corrente de gases, assim reduz a energia disponível para aquecer a água e reduz a eficiência. Bons projetos de caldeiras utilizam excesso de ar em torno de 15% , que equivale a 3% de excesso de O_2 . A figura 21 apresenta um gráfico de eficiência vs. Excesso de oxigênio, gráficos desse tipo podem ser utilizados para entender os impactos de variação no excesso de ar sobre a eficiência da caldeira (CLEAVER BROOKS, 2010).

3.7.3.4 Temperatura do ar

A temperatura do ar é outro fator que tem um efeito significativo sobre a eficiência de caldeiras. Segunda a literatura variações em torno de 40 graus podem aumentar a eficiência em

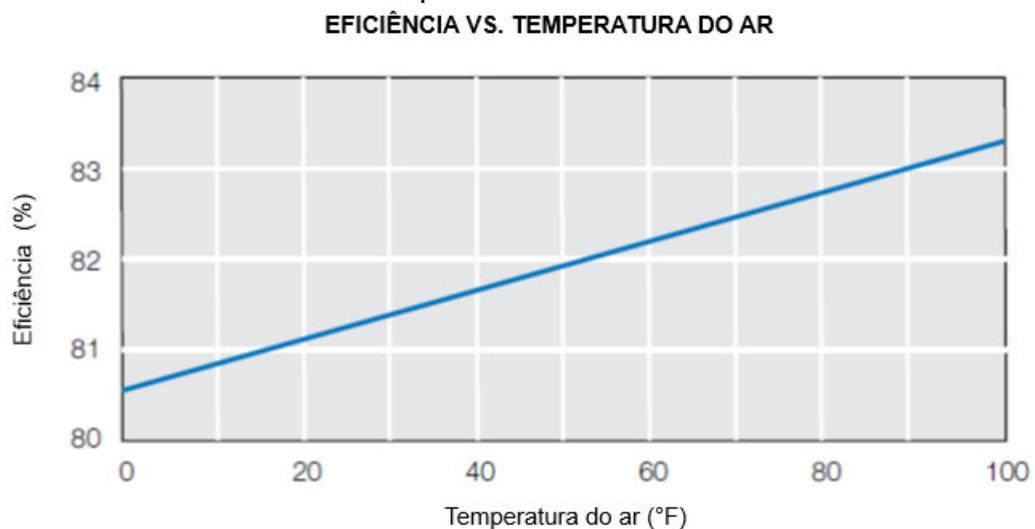
1% ou mais. A maioria dos cálculos de eficiência considera a temperatura ambiente em torno de 25°C e umidade do ar em torno de 30% (CLEAVER BROOKS, 2010; BHATIA, 2015). A figura 22 apresenta uma curva que mostra a relação entre a eficiência e temperatura do ar. Observa-se uma relação linear entre a temperatura do ar e eficiência, assim quanto maior a temperatura do ar maior será a eficiência. Este gráfico pode ser utilizado para avaliar os efeitos que temperaturas mais baixas ou mais altas podem causar na eficiência de caldeiras.

Figura 21 – Curva de eficiência em função do excesso de oxigênio.



Fonte: Cleaver Brooks (2010).

Figura 22 – Curva de eficiência vs. temperatura do ar.



Fonte: Cleaver Brooks (2010).

3.7.3.5 Perdas por convecção e radiação

Perdas por convecção e radiação costumam ter um impacto negativo sobre a eficiência de caldeiras. Devido à grande quantidade de calor liberada durante a reação de combustão no interior de uma caldeira, perdas para o ambiente através de convecção e radiação são inevitáveis, por isso essas perdas geralmente são assumidas como constantes (CLEAVER BROOKS, 2010; BHATIA, 2015).

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição do local

O presente trabalho foi desenvolvido em uma empresa que tem como atividade principal a produção de alumina. Na planta industrial aplica-se o Processo Bayer, que consiste em um processo de transformação da bauxita em hidrato, que posteriormente é calcinado transformando-se em óxido de alumínio (alumina). A planta possui também a área de Utilidades que tem por finalidade fornecer vapor, energia, ar comprimido e água tratada para que a operação da planta possa ocorrer.

Os estudos foram realizados na área da Utilidades, que contém duas caldeiras de leito fluidizado circulante, disponibilizando vapor superaquecido para atender as demandas de processo e da planta.

As modificações implementadas e análises realizadas ocorreram no sistema pré-aquecimento de ar de combustão das caldeiras CFBs e no sistema de retorno de condensado que pré-aquece o ar das caldeiras.

4.2 Descrição do processo

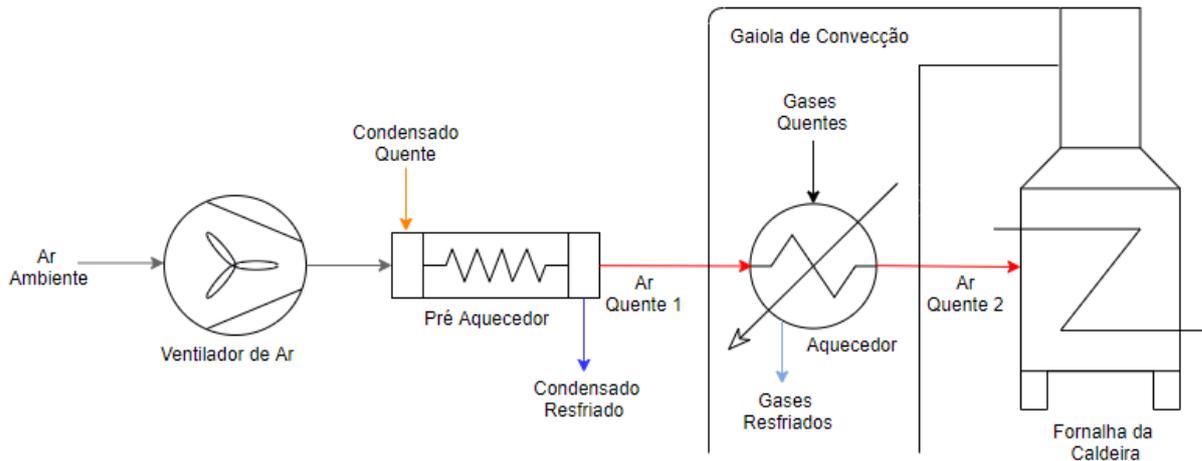
4.2.1 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE AR DE COMBUSTÃO DAS CALDEIRAS

A refinaria contém duas caldeiras de leito fluidizado circulante – CFB que juntas disponibilizam centenas de toneladas de vapor superaquecido para o processo Bayer, para produção de energia elétrica e outras operações da planta. Estas caldeiras utilizam energia da reação de combustão do carvão mineral e oxigênio sob um regime de fluidização, para transformar o condensado da planta em vapor.

A fim de garantir uma combustão completa do carvão e a fluidização do material presente no leito da caldeira, insere-se ar na câmara de combustão sob diferentes estágios. Nas caldeiras CFBs, o ar total é dividido em dois estágios, sendo inserido na fornalha em diferentes níveis, que são denominados primário e secundário.

O ar primário e o ar secundário são retirados da atmosfera através de ventiladores centrífugos e seguem para duas etapas de aquecimento em série: uma no pré-aquecedor e outra no aquecedor. Um esquema do sistema de aquecimento de ar é apresentado na figura 23.

Figura 23 – Fluxograma do sistema de aquecimento de ar das caldeiras CFBs.



Fonte: Próprio Autor (2019).

A primeira etapa de aquecimento do ar ocorre nos pré-aquecedores, localizado fora do volume de controle da caldeira, que são trocadores de calor que permitem a troca térmica entre o ar de combustão (fluido frio) e uma corrente de condensado quente (fluido quente) vindo área da calcinação. Deste modo, a temperatura do ar aumenta e a temperatura do condensado diminui. Cada caldeira possui dois pré-aquecedores, um para o ar primário e outro para o ar secundário. Assim, o fluxo de condensado quente costuma se dividir para aquecer ambos os fluxos de ar das duas caldeiras.

A segunda etapa de aquecimento do ar ocorre nos aquecedores, localizado na parte interna da caldeira (gaiola de convecção), consistem em trocadores de calor que proporcionam a troca térmica entre o ar proveniente dos pré-aquecedores e os gases da própria combustão da caldeira. Em vista disso, a temperatura do ar aumenta e a temperatura dos gases de combustão diminuem. Por consequência, a taxa de aquecimento da primeira etapa tem influência sobre a segunda etapa de aquecimento e sobre o controle de temperatura gases de combustão que deixam a caldeira. A fim de garantir a segurança na operação das caldeiras, temperatura elevadas dos gases de combustão podem ocasionar o desligamento das caldeiras, esta referencias de temperatura dos gases são denominadas temperaturas de interlock.

Após as duas etapas de aquecimento, o fluxo de ar primário quente se divide em dutos que entram na região inferior da fornalha por meio de bocais, auxiliando na fluidização do material presente no leito e iniciando a reação de combustão. Enquanto isso, o fluxo de ar secundário quente segue se dividindo em três dutos que se distribuem para a região frontal e traseira da fornalha. O ar secundário é fornecido à câmara de combustão em um nível inferior e superior, de modo que complete o ar necessário para combustão completa do carvão.

Os gases e partículas sólidas formados durante a combustão, assim que saem da fornalha, seguem até o topo da câmara de combustão até encontrar um separador gás-sólido, desta maneira as partículas mais grossas são recirculadas para a câmara de combustão. Enquanto partículas mais finas e gases seguem através da gaiola de convecção, sendo resfriados devido a troca térmica com superaquecedores, economizadores e aquecedores de ar.

A mistura dos gases e particulados segue para os filtros de mangas, que retêm as partículas sólidas e deixa fluir os gases que seguem até uma chaminé. A temperatura dos gases deve ser devidamente controlada, limites superiores devem ser evitados pois resultam em perda de energia, danificam os elementos posteriores a gaiola de convecção, como as mangas dos filtros, e podem ocasionar o desligamento da caldeira. Limites inferiores devem ser evitados para não ocorrer a condensação de gases com enxofre e consequente formação de ácido sulfúrico.

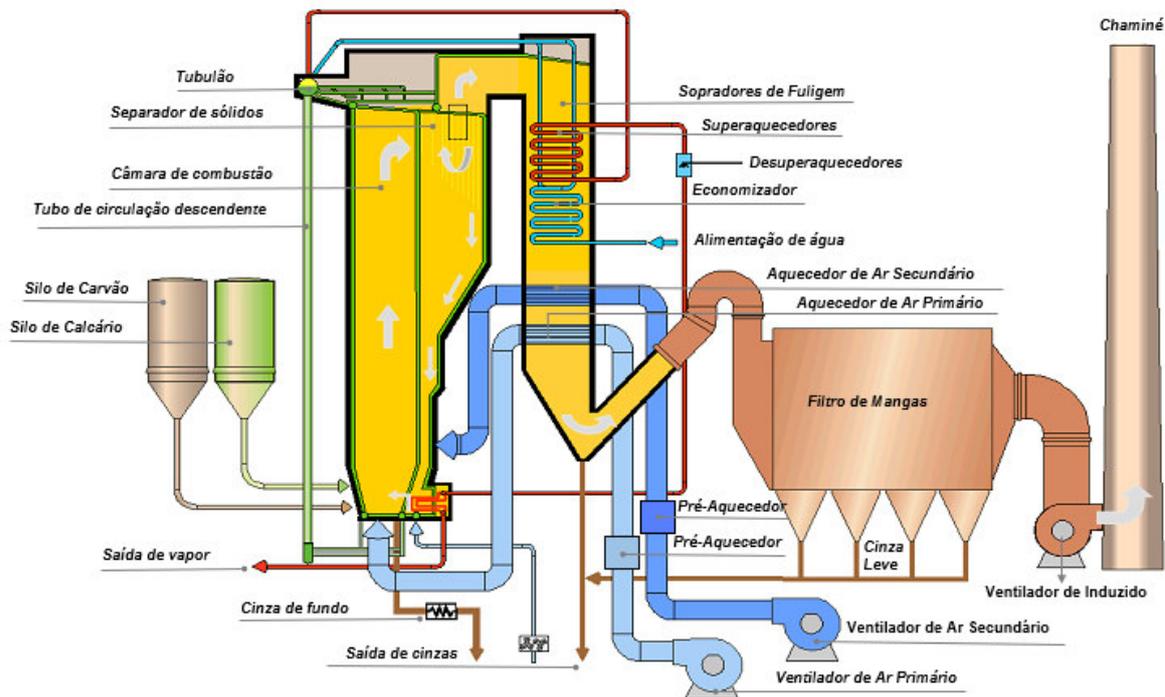
A fim de evitar perdas de energia devido a temperaturas dos gases elevadas e melhorar a troca térmica na superfície de transferência de calor de superaquecedores, economizadores e aquecedores, que costumam acumular cinzas em suas superfícies, é realizada a sopragem de fuligem periódica ao longo de toda a gaiola de convecção. Deste modo, a sopragem de fuligem pode influenciar na temperatura dos gases. A figura 24 apresenta a vista lateral da caldeira CFBs e a respectiva localização dos elementos citados acima (economizador, pré-aquecedores e aquecedores, região de circulação dos gases, soprador de fuligem e outros).

Em relação a alimentação de água na caldeira, inicialmente ela é tratada e admitida por um economizador, onde é pré-aquecida. Em seguida, a água flui através de tubos verticais, localizados na gaiola de convecção, ganhando mais temperatura. Ao chegar no tubulão de vapor, a água é dividida em dois grande tubos que distribuem a água em condutos descendentes e ascendentes localizados nas paredes da fornalha, assim a água que retorna ao tubulão se mantém em equilíbrio com o vapor saturado, que se separa da água através de separadores contido no interior do tubulão. A água de alimentação substitui continuamente a água que está sendo evaporada.

Ao deixar o tubulão, o vapor saturado é aquecido no superaquecedor I, localizado na gaiola de convecção, e logo depois passa pelo primeiro estágio de resfriamento, a fim de garantir o controle de temperatura. Logo em seguida, o vapor segue para o segundo estágio de aquecimento no superaquecedor II, localizado no interior da fornalha. Após esta etapa, o vapor segue para o segundo estágio de dessuperaquecimento, e posteriormente para aquecimento no superaquecedor III, localizado na gaiola de convecção. O vapor superaquecido produzido flui

até um “header” de alta pressão que distribui vapor para turbogeradores e válvulas reguladoras de pressão. Posteriormente o vapor é distribuído para as diferentes áreas da refinaria.

Figura 24 – Vista Lateral das Caldeiras de Leito Fluidizado Circulante.



Fonte: Adaptado de Chaibamrung (2013).

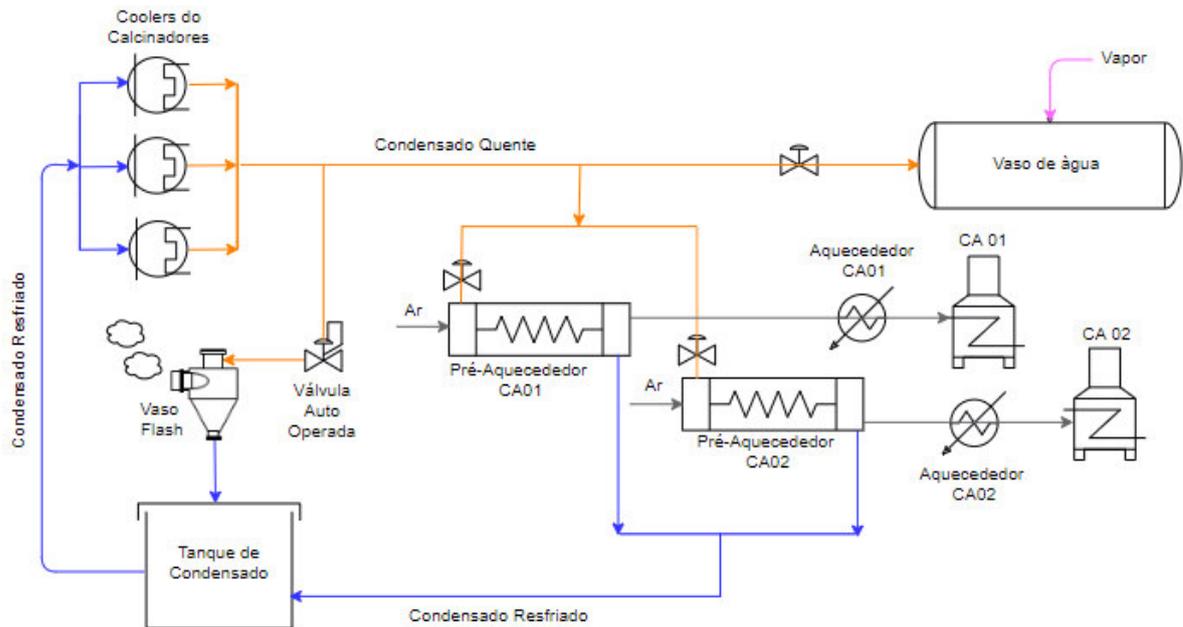
4.2.2 DESCRIÇÃO DO CIRCUITO DE CONDENSADO

A refinaria possui uma área específica que é responsável pelo armazenamento e distribuição de condensado gerado e consumido na planta. Existe um tanque específico que recebe condensado de qualidade e o envia para área da calcinação. Quando chega na calcinação, esse condensado tem por finalidade resfriar a alumina que está saindo do calcinadores. Desta maneira, esse condensado adquire energia térmica, aumentando a sua temperatura. Assim que deixa a calcinação, o condensado retorna para a área da Utilidades servindo de make up para o principal vaso de água que alimenta as caldeiras e paralelamente envia condensado para os pré-aquecedores de ar de combustão.

À medida que o condensado realiza a troca térmica com o ar de combustão, perde energia e reduz a sua temperatura, retornando para o seu tanque de armazenamento e reiniciando o circuito. Um esquemático do circuito de condensado é apresentado na figura 25.

Se a demanda de condensado no vaso de alimentação e/ou nos pré-aquecedores de ar aumentar, a pressão na linha de retorno reduz significativamente, tornando o fluxo insuficiente. Caso contrário, se a pressão na linha de retorno torna-se excessivamente alta, uma válvula auto operada é acionada e envia esse condensado para um vaso flash, localizado acima do tanque de armazenamento de condensado, que reduz sua pressão e temperatura e emite vapor de flash para a atmosfera, levando a perda de energia. Após esta etapa, o condensado está apto para retornar ao tanque de armazenamento e reiniciar todo o ciclo novamente.

Figura 25 – Fluxograma do circuito de condensado que aquece o ar da caldeira 01(CA01) e caldeira 02 (CA02).



Fonte: Próprio Autor, (2019).

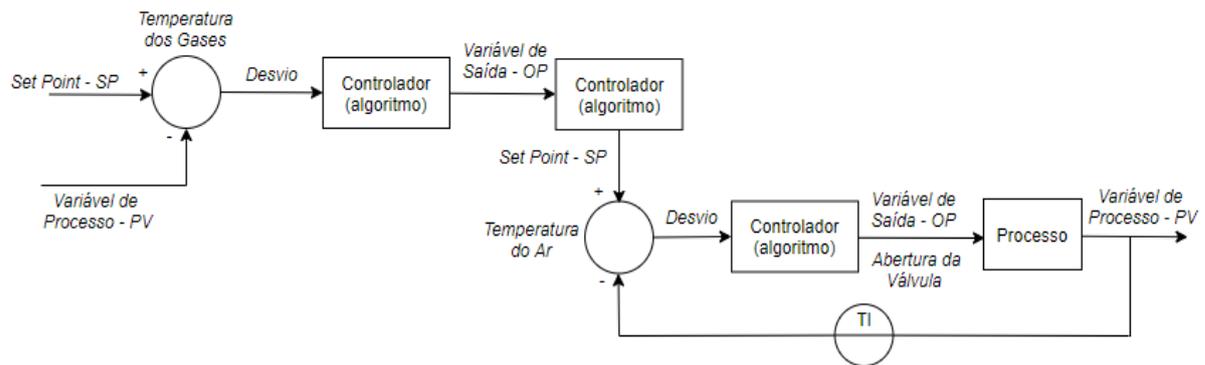
4.3.3 CONTROLE DO PRÉ-AQUECIMENTO DE AR

O fluxo de condensado que alimenta os pré-aquecedores de ar é regulado através da abertura das válvulas de controle. Estas válvulas são controladas de modo indireto pela temperatura dos gases de combustão que deixam as caldeiras CFBs. Assim, se a temperatura dos gases estiver abaixo do valor desejado (*set point - SP*), fixado em 142°C, a malha de controle observa a temperatura de processo (variável de processo – PV) e a respectiva diferença entre os dois valores, e então gera uma variável de saída (OP) que corresponde a temperatura desejada do ar nos pré-aquecedores. A malha de controle dos pré-aquecedores recebe essa informação, e armazena como variável desejada (SP). Assim, o controlador compara com a

temperatura real do ar (PV) e o valor desejado (SP), e então da origem uma nova variável de saída (OP) que corresponde ao percentual de abertura da válvula de condensado.

Caso a temperatura dos gases esteja igual ou maior que o valor fixado, 142°C, a malha de controle não dá origem a uma nova temperatura para o ar, e conseqüentemente a abertura da válvula fica constante. Caso a pressão da linha de condensado caísse excessivamente, seria necessário a intervenção manual de controle, que ajustava manualmente a abertura da válvula de condensado para 0% até que as condições de pressão na linha fossem novamente favoráveis para fornecer condensado quente para os pré-aquecedores. Um esquema da malha de controle do fluxo de condensado pode ser visto na figura 26.

Figura 26 – Malha de controle de condensado para pré-aquecimento de ar.



Fonte: Próprio Autor (2020).

4.2. Equipamentos

Os estudos e análises realizadas envolveram como principais equipamentos duas caldeiras de leito fluidizado circulante (CFB), modelo CFB compacta, de fabricação polonesa. Foram utilizados ainda quatro pré-aquecedores de ar, dois em cada caldeira, localizados na parte externa da caldeira, que realizavam um primeiro estágio de aquecimento do ar de combustão. Estes equipamentos são trocadores de calor do tipo serpentina, onde o fluido quente, que nesse caso é o condensado de flash, fornece energia para o fluido frio, que é o ar.

4.3 Instrumentos

Os dados utilizados para o estudo realizados foram coletados de diferentes instrumentos de medição in loco, os principais foram instrumentos medidores de pressão, termopares, e posicionadores de válvulas de controle, medidores de fluxo de ar e condensado.

4.4 Softwares

O projeto realizado neste trabalho utilizou os Sistemas Digitais de Controle Distribuído (DCS) para implementação do controle de condensado de flash que segue para o aquecimento de ar das caldeiras CFBs da refinaria de alumina e para o sistema de retorno de condensado. Os *softwares* usados para implementação foram o Native Windows e Expirion PKS. Para a coleta de dados da planta foi utilizado o Microsoft Excel

4.5 Procedimento

4.5.1 OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMA RETORNO DE CONDENSADO E DE PRÉ-AQUECIMENTO DE AR

Para realizar a otimização dos sistemas de pré-aquecimento de ar das caldeiras foram executados os seguintes passos:

- i. *Definição das oportunidades de otimização:* a primeira etapa da otimização consistiu em identificar as principais oportunidades relacionados nas unidades de gerenciamento de condensado e pré-aquecimento de ar;
- ii. *Estabelecendo Objetivos:* a partir das oportunidades identificados no item anterior, foi necessário definir quais variáveis alvo a serem atingidos com otimização dos sistemas;
- iii. *Identificação do critério de desempenho, variáveis de decisão e restrições:* Nesta etapa da otimização foram identificadas todas as variáveis necessárias para se alcançar o objetivo estabelecido e possíveis restrições associadas ao processo;
- iv. *Desenvolvimento de estratégias de otimização:* nesta etapa foram criadas estratégias que quando utilizadas no controle de processo favorecessem um funcionamento otimizado em ambos os sistemas, disponibilizando fluxo e aproveitando ao máximo a energia do condensado para aquecer o ar quando as condições de processo fossem favoráveis;
- v. *Implementação do sistema de aquecimento de ar otimizado:* nesta fase o modo de controle otimizado foi colocado em produção primeiramente para o sistema de retorno de condensado. Posteriormente, o modo de controle otimizado foi aplicado nos sistemas de pré-aquecimento de ar da caldeira 01 (CA01) e depois na caldeira 02 (CA02);
- vi. *Avaliação dos resultados da otimização:* para a verificar se sistemas de controle otimizado estavam sendo utilizados no gerenciamento do retorno de condensado, foram

analisados dados de pressão da linha de retorno e temperatura do condensado, comprando dados anteriores e posteriores a otimização. Para as unidades de pré-aquecimento de ar das caldeiras foram contabilizados o número de dias no mês em que o controle funcionou automaticamente antes e depois da otimização.

4.6 Análise de dados

4.6.1 EFEITOS DA OTIMIZAÇÃO NO SISTEMA DE AQUECIMENTO DE AR

A fim de compreender os impactos das modificações realizadas no controle de processo do sistema de aquecimento de ar e combustão das caldeiras foram monitoradas três variáveis: a temperatura do ar que deixa o pré-aquecedor T_{SPA} e a temperatura dos gases (T_{SG}) e eficiência (EF) para cada uma das caldeiras. Para realização das análises foram calculadas a temperatura média (\bar{X}) e desvio padrão (s) de diferentes meses comparando com dados de meses anteriores a otimização. Assim, a média foi calculada a partir da soma das temperaturas no mês, dividida pelo número de temperatura do mês, conforme mostra a equação 5. O desvio padrão foi calculado a partir da equação 6.

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + X_3 \dots X_n}{n} \quad (5)$$

Onde, \bar{X} é média

X_1 é o valor da primeira amostra;

X_2 é o valor da segunda amostra;

X_n é o valor da amostra n

n é o número de amostras

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i^N (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (6)$$

Onde, s é o desvio padrão das amostras

X_i é o valor individual de uma amostra;

\bar{X} é a média das amostras;

n é o número de amostras;

4.6.2 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DE EFICIÊNCIA DAS CALDEIRAS CFBS

Considerando que as modificações realizadas no sistema de controle e as mudanças no causadas na temperatura do ar que entra na fornalha das caldeiras e na temperatura dos gases que deixam a gaiola de convecção foi necessário avaliar o impacto dessas variáveis sobre a eficiência das caldeiras.

Para compreender a relação entre a temperatura do ar, temperatura dos gases e eficiência das caldeiras foi utilizado o método descrito pela American Society of Mechanical Engineers (ASME) 4-2013. Esta norma determina basicamente dois métodos para o cálculo de eficiência de geradores de vapor, o primeiro deles é o método de entrada-saída ou método direto e o segundo é o método por balanço de energia ou indireto, que é mostrado na equação 7.

$$EF = 100 \left(\frac{Q_E + Q_A - Q_L}{Q_E} \right) \quad (7)$$

Onde: EF é a eficiência da caldeira em %;

Q_E é a energia que entra na caldeira em W;

Q_A é a energia adicional que entra na caldeira em W;

Q_L é energia absorvida pelo fluido de trabalho da caldeira que não é recuperadas em W.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos a partir das metodologias utilizadas foram separados em quatro diferentes etapas listadas abaixo.

5.1 Otimização do sistema de pré-aquecimento de ar de combustão das caldeiras

5.1.1 OTIMIZAÇÃO DO SISTEMA DE RETORNO DE CONDENSADO

Conforme a descrição do processo, o pré-aquecimento de ar das caldeiras CFBs ocorre em função da troca térmica com condensado quente que vem da calcinação, havendo uma relação direta entre a estabilidade do sistema de retorno condensado e o pré-aquecimento de ar. Deste modo, foi necessário realizar uma otimização nesse sistema a fim de garantir fluxo e temperatura do condensado, de modo que este seja capaz de abastecer o vaso de água das caldeiras e/ou alimentar os pré-aquecedores.

Inicialmente foram listadas as principais oportunidades existentes no sistemas de retorno de condensado, as mais relevantes são apresentadas na tabela 1. A primeira oportunidade está nos fluxos constantes que deixam os três coolers dos calcinadores, deste modo, caso seja necessário um fluxo maior para o vaso de alimentação de água e/ou pré-aquecedores, um ajuste era realizado manualmente.

Tabela 1 – Principais oportunidades encontradas no sistema de retorno de condensado.

Sistema/Equipamento	Oportunidades
<i>Coolers</i> dos calcinadores	Fluxo de Condensado constante
Linha de Retorno	Baixa demanda de condensado pressuriza a linha
Linha de Retorno	Alta demanda de condensado despressuriza a linha
Fluxo de condensado alto	Reduz a temperatura do condensado

Fonte: Próprio Autor (2019).

Assumindo que os fluxos de condensado são constantes, qualquer demanda maior de condensado tanto para o vaso de alimentação quanto para os pré-aquecedores resultavam na despressurização da linha de retorno, tornado necessário o aumento de fluxo de condensado.

Contudo, o aumento da vazão de condensado costuma ocasionar a queda na temperatura do mesmo, reduzindo a quantidade de calor transferida para o ar de combustão.

Por outro lado, menores demandas de condensado, no vaso de alimentação e/ou nos pré-aquecedores de ar, poderiam resultar na pressurização da linha de retorno, ocasionando a atuação da válvula auto operada, que envia condensado quente para o vaso flash, resultando na liberação de vapor de flash e perda de energia para atmosfera.

A partir dos problemas encontrados, a otimização do sistema de retorno de condensado tem por objetivo regular de maneira otimizada o fluxo de condensado que circula na linha de sem perder temperatura e atendendo tanto a necessidade do vaso de alimentação de água quanto dos pré-aquecedores de ar.

A tabela 2, apresenta as principais variáveis que são relevantes para a otimização do sistema de retorno de condensado, foram estabelecidos o critério de desempenho, as variáveis de decisão e as respectivas restrições relacionadas a esse sistema.

Tabela 2 – Variáveis de otimização do sistema de retorno de condensado.

Critério de Desempenho	Variáveis de decisão	Restrições
Maximizar e Minimizar fluxo de condensado segundo condições de processo	Pressão da Linha s de Retorno	1160 kPa – 1310 kPa
	Temperatura da Alumina	102°C – 112°C
	Fluxo dos Coolers do Calcinador	46 m ³ /h – 86 m ³ /h
	Temperatura do Condensado	138°C

Fonte: Próprio Autor (2019).

Baseando-se nas oportunidades encontrados nas variáveis de otimização e adotadas as seguintes estratégias para que o controle do fluxo de condensado operasse de modo otimizado:

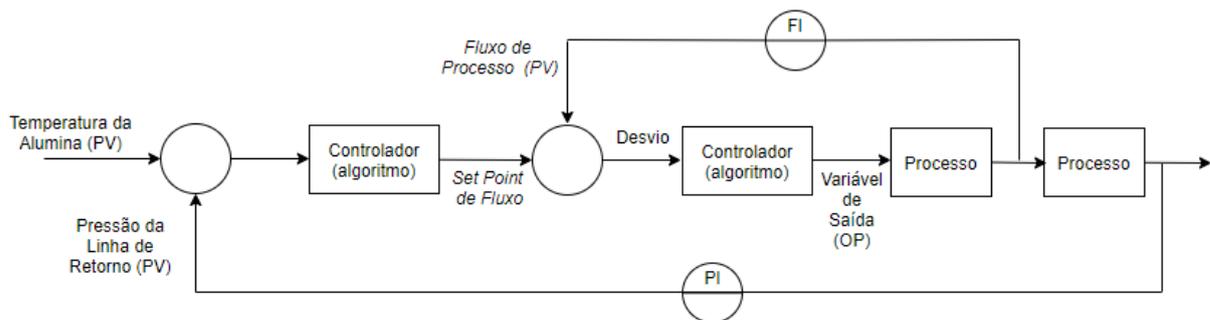
1. Aumentar o fluxo de condensado do calcinador que estiver com a maior temperatura da alumina em 12 m³/h se a pressão da linha de retorno for menor que 1160 kPa.
2. Reduzir o fluxo de condensado do calcinador que estiver com a menor temperatura de alumina em 6 m³/h se a pressão da linha for maior que 1310 kPa

A primeira estratégia foi adotada para garantir que o condensado resfrie a alumina dentro dos valores de temperatura desejados e posteriormente para garantir fluxo de condensado para o vaso de alimentação de água das caldeiras e depois para os pré-aquecedores de ar.

Enquanto a segunda estratégia teve por objetivo garantir a temperatura do condensado e evitar as perdas de energia pelo vaso de flash.

Após a elaboração das estratégias, os algoritmos foram inseridos no controlador de fluxo de condensado e o novo modo de controle otimizado foi implementado. A figura 27 apresenta um resumo do novo modo de controle otimizado do sistema de retorno de condensado.

Figura 27 – Esquema do controle otimizados do sistema de retorno de condensado.



Fonte: Próprio Autor (2019).

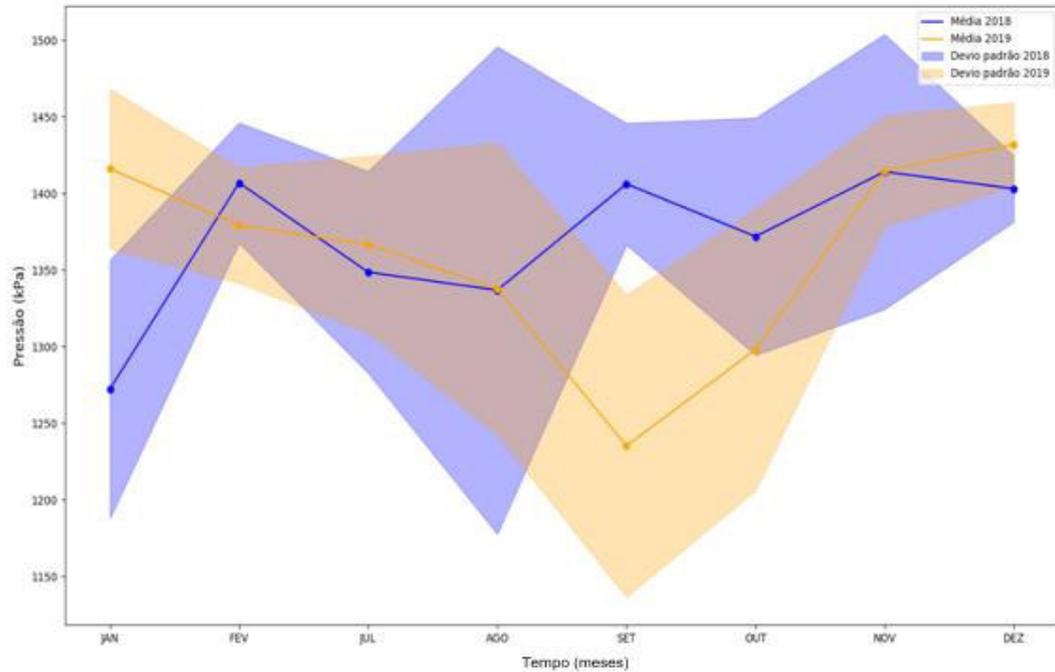
Inicialmente, observa-se a pressão da linha de retorno e a temperatura da alumina, esses dados são verificados pelo algoritmo de controle que produz um *set point* de fluxo, ao registrar o fluxo real do processo (*PV*), a diferença entre os dois é calculada e enviada para um segundo controlador que libera uma variável de saída (*OP*), que nesse caso corresponde a abertura das válvulas de condensado no coolers do calcinador. O primeiro processo corresponde a alteração de fluxo de condensado que deixa o calcinador, que é medido por um instrumento e realimenta o controlador. O segundo processo se refere a distribuição do condensado pela linha de retorno, resultando na variação da pressão que é medida por um instrumento, realimenta o controlador.

A figura 28 apresenta os dados de pressão da linha que chega no pré-aquecedor da caldeira 01, conforme pode ser observado há uma pequena redução nessa variável após a otimização, indicando controle de pressão do sistema. Entretanto, vale ressaltar que existem outros fatores que podem interferir no valor dessa pressão, como falhas nos demais alimentadores de água das caldeiras, alimentação do tanque de condensado, parada de manutenção de uma das caldeiras e consumo do pré-aquecedor.

Um comportamento oposto foi observado na pressão do condensado na caldeira 02 (ver figura 29). A média e desvio padrão da pressão na linha de retorno indicam que na maioria dos meses não houve redução desta variável, exceto nos meses de agosto e setembro, onde a redução

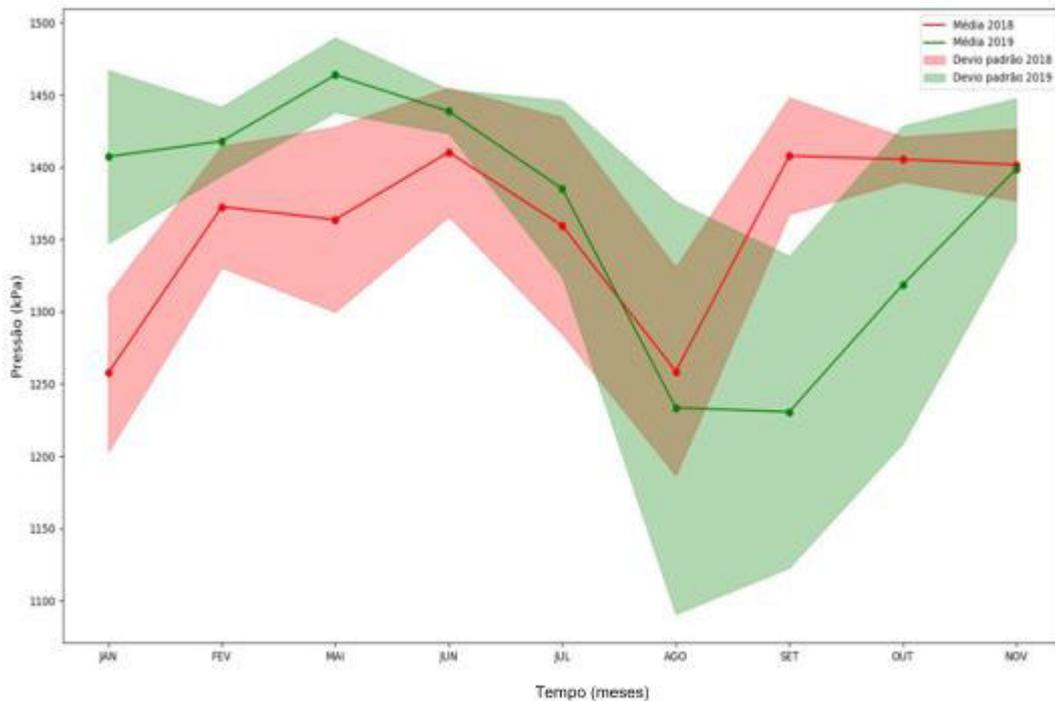
foi significativa. Nos meses de março, abril e dezembro não foi possível avaliar dados de pressão devido a períodos de paradas para manutenção ou limitações operacionais.

Figura 28 – Pressão na linha de retorno condensado para caldeira 01.



Fonte: Próprio Autor (2019).

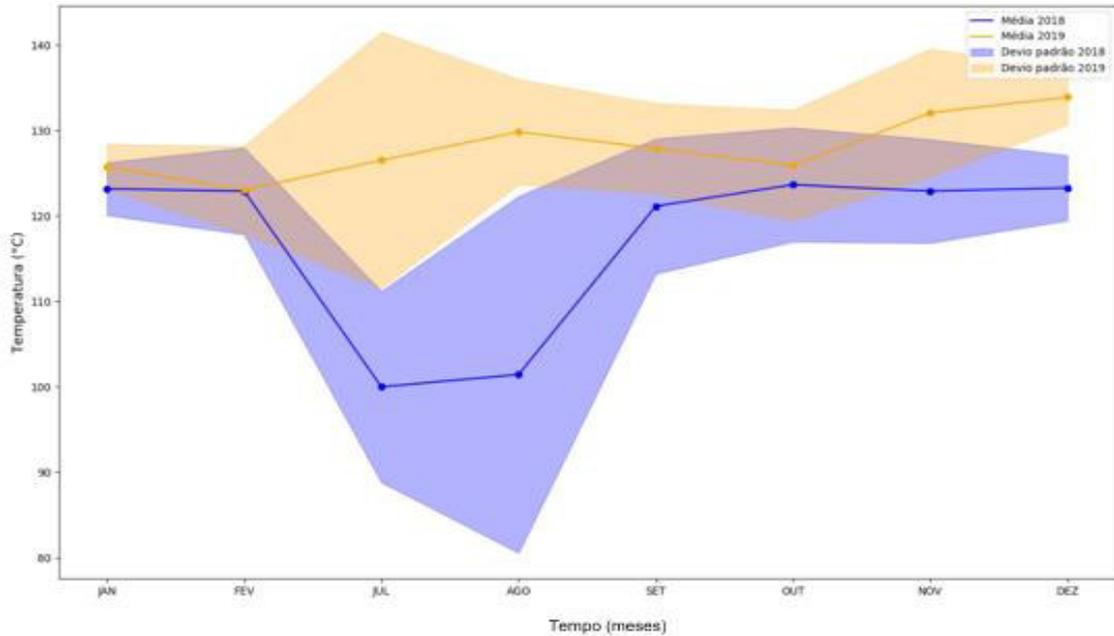
Figura 29 – Pressão na linha de retorno de condensado na caldeira 02.



Fonte: Próprio Autor (2019).

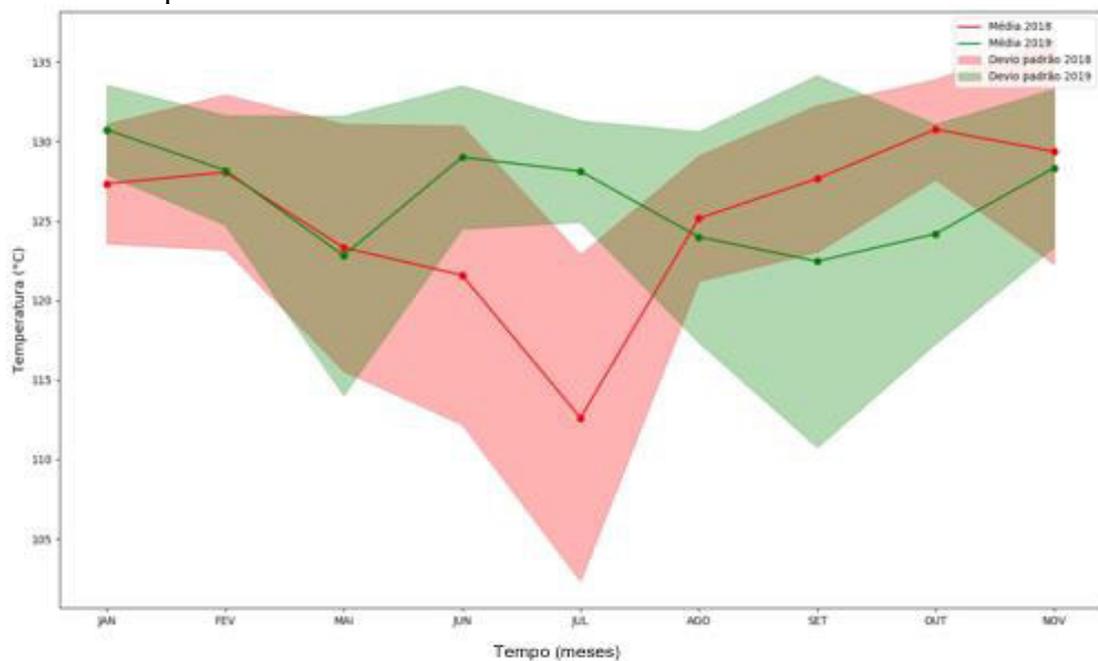
No que se refere a temperatura do condensado, é possível observar, pelos dados da figura 30, que a temperatura se tornou um pouco mais elevada e estável à medida que foi executado novo modo de controle do sistema. Embora não esteja tão próximo alvo desejado, os valores obtidos indicam uma tendência de aumento. Os resultados obtidos para a caldeira 02 são bastante semelhantes, exceto para alguns meses, conforme pode ser observado na figura 31.

Figura 30 – Temperatura do condensado na caldeira 01.



Fonte: Próprio Autor (2019).

Figura 31 – Temperatura do condensado na caldeira 02.



Fonte: Próprio Autor (2019).

5.1.2 OTIMIZAÇÃO DOS SISTEMAS DE PRÉ-AQUECIMENTO DE AR

Considerando o modo de funcionamento do pré-aquecimento de ar da caldeira foram listados na tabela 3 as principais oportunidades encontradas.

Tabela 3 – Principais oportunidades encontradas nos sistemas de pré-aquecimento de ar.

Sistema/Equipamento	Oportunidades
Controle de Pré-aquecimento	Temperatura de Referência dos Gases Constate
Controle de Pré-aquecimento	Não considera o fluxo/pressão da linha de retorno de condensado
Controle de Pré-aquecimento	Não considera a temperatura de interlock da caldeira

Fonte: Próprio Autor (2019).

A primeira oportunidade destacada se refere a temperatura dos gases que era fixada em 142°C, uma vez que essa temperatura controlava indiretamente a quantidade de condensado que flui pelo pré-aquecedor de ar, isso representa uma limitação para a etapa de aquecimento.

Além disso, a malha de controle atual não realiza nenhum tipo de verificação, a fim identificar se há condensado suficiente na linha de retorno para que este possa ser utilizado no pré-aquecedor, deste modo mesmo com pressões baixas na linha, as válvulas de condensado continuavam abertas, consumindo o condensado, o que reduz ainda mais a pressão.

Embora, a referência de temperatura dos gases esteja fixada em 142°C para controle da mesma e para evitar que o pré-aquecimento de ar possa levar ao aumento excessivo da temperatura dos gases e conseqüente desligamento da caldeira, o atual modo de controle não altera o fluxo de condensado que entra pelo pré-aquecedor se a temperatura dos gases estiver elevada, tornando necessário uma intervenção manual no controle.

Portanto o principal objetivo da otimização do pré-aquecimento de ar das caldeiras foi maximizar a temperatura do ar de combustão conforme as condições de processo. As principais variáveis para decisão para otimização e as respectivas restrições do processo são apresentadas na tabela 4.

Tabela 4 – Variáveis de otimização dos pré-aquecedores de ar das caldeiras.

Critério de Desempenho	Variáveis de decisão	Restrições
Maximizar a temperatura do ar conforme condições de processo	Pressão na linha de retorno de condensado	1170kPa – 1260kPa
	Temperatura dos gases	142°C – 152°C
	Temperatura de interlock das caldeiras	> 167°C

Fonte: Próprio Autor (2019).

Para elaboração do modo de controle otimizado dos sistemas de aquecimento de ar das caldeiras foram aplicadas as seguintes estratégias:

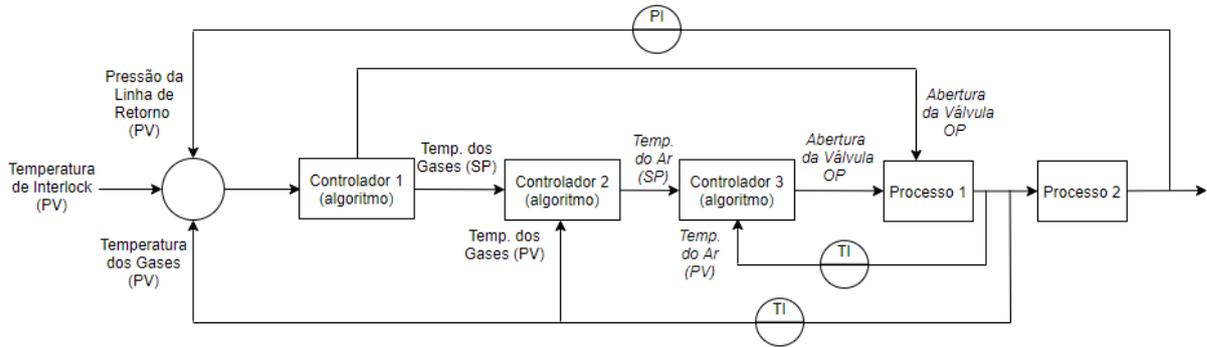
1. Redução do alvo de temperatura dos gases em 1°C a cada 10 minutos caso a pressão da linha de retorno de condensado esteja baixa (menor que 1220 kPa);
2. Redução direta na abertura da válvula de condensado do pré-aquecedor em 1% a cada 1 minuto se a pressão muito baixa (menor que 1170 kPa);
3. Aumentar o alvo de temperatura dos gases após pressões muito baixas ou temperaturas de interlock elevadas;
4. Aumentar o alvo de temperatura em 1 °C /15 minutos com boa pressão (maior que 1260 kPa);
5. Redução do alvo de temperatura dos gases para 142°C e redução da abertura da válvula de condensado para 0% se a temperatura dos gases estiver maior que 167°C.

Considerando as estratégias desenvolvidas, foram elaborados algoritmos para cada estratégia, e inseridos no controlador. Assim o novo modo de controle otimizado foi executado em setembro de 2018 na caldeira 01 e em novembro de 2018 na caldeira 02. Um resumo do novo modo de controle do sistema de pré-aquecimento de ar é apresentado na figura 32.

O modo e controle otimizado avalia as principais variáveis de decisão, pressão da linha de retorno de condensado, temperatura dos gases e temperatura de interlock das caldeiras, e repassa ao controlador 1, que verifica estas condições e decide qual a melhor estratégia a ser utilizada e executa o respectivo algoritmo de controle, assim o controlador 1 poderá atuar gerando um alvo de temperatura do gases (*set point*) ou diretamente na abertura das válvulas de condensado, conforme as condições das variáveis de processo. É importante comentar que em condições de pressão baixa na linha de retorno de condensado, em função dos intervalo de

pressão registrado no algoritmo (restrições) o modo de controle otimizado do pré-aquecedor de ar atuará antes do controlador do sistema de retorno de condensado.

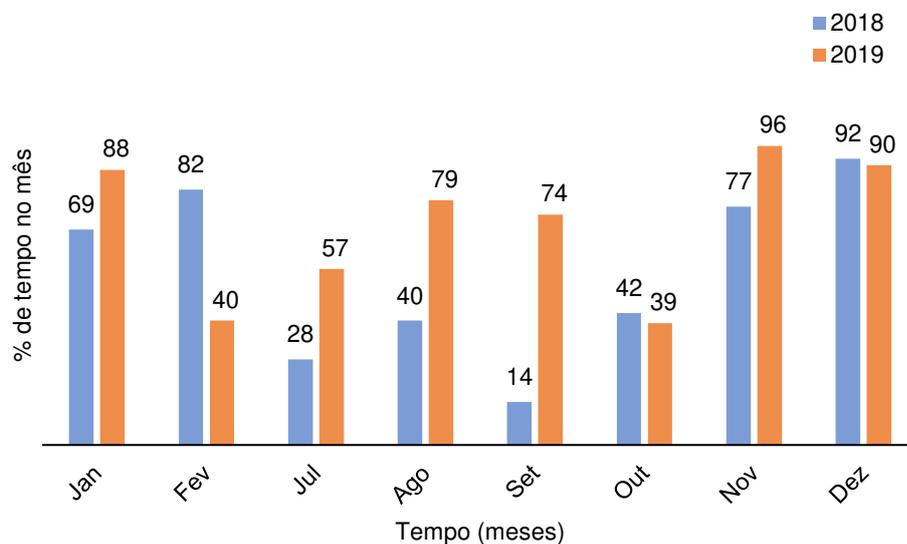
Figura 32 – Esquema do controle otimizado do pré-aquecimento de ar das caldeiras CFBs.



Fonte: Próprio autor (2019).

Para avaliar a otimização do pré-aquecimento de ar verificou-se o percentual de tempo que em o sistema permaneceu em modo de controle automático antes e depois das mudanças no controle do processo, com exceção dos meses em que houve paradas de manutenção (maio e junho de 2019) ou limitações operacionais da caldeira ou do sistema de pré-aquecimento (, setembro e outubro de 2019). Segundo os resultados apresentado na figura 33, observa-se que na maioria dos meses esse tempo foi maior após a implementação do sistema de controle otimizado na caldeira 01, indicando que este estava atuando de modo autônomo.

Figura 33 – Percentual de tempo em controle automático do sistema de pré-aquecimento de ar da caldeira 01.

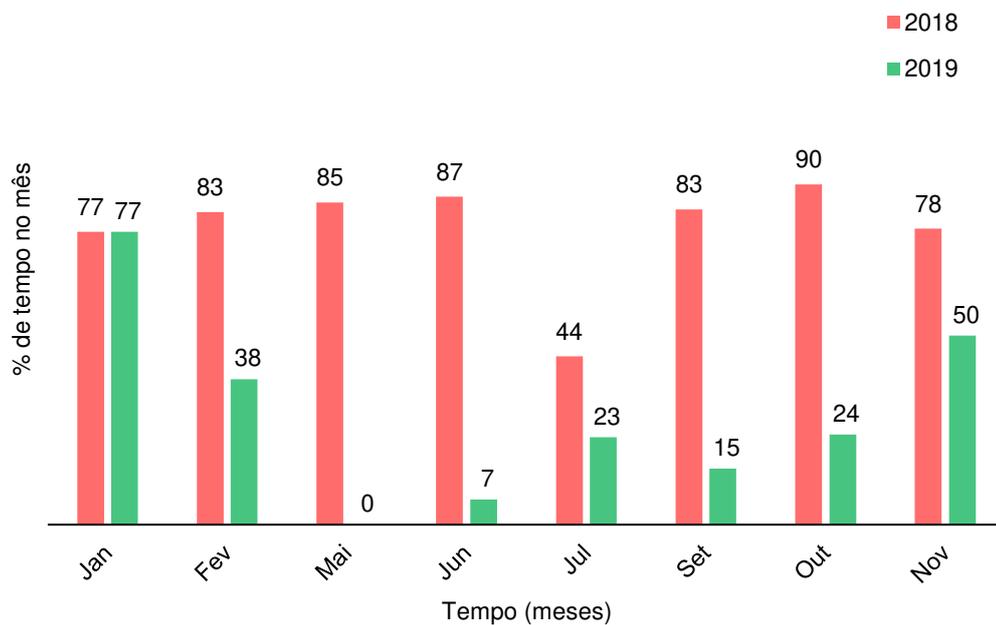


Fonte: Próprio Autor (2019).

Mediante os resultados obtidos, conforme demonstrado no gráfico da figura 34, o percentual de tempo que o controle do sistema ficou em automático após a otimização de aquecimento de ar da caldeira 02 foi menor quando comparado ao período anterior. Todavia, é necessário levar em consideração os períodos de parada para manutenção (agosto de 2018 e dezembro de 2019) e limitações operacionais das caldeiras e unidades de pré-aquecimentos de ar (março, abril, setembro, outubro de 2019).

Estes dados podem sugerir que a utilização do novo sistema de controle otimizado ainda não é suficiente, na caldeira 02, para garantir o funcionamento autônomo do sistema de pré-aquecimento, indicando que ainda há oportunidades no controle otimizado. Sendo assim, se pressupõe que em condições operacionais do sistema desfavoráveis, como por exemplo falta de condensado e despressurização da linha de retorno ou elevação da temperatura de interlock, é muito provável que se utilize de um controle manual.

Figura 34 – Tempo em que o sistema de pré-aquecimento de ar da caldeira 02 esteve em controle automático.



Fonte: Próprio Autor (2019).

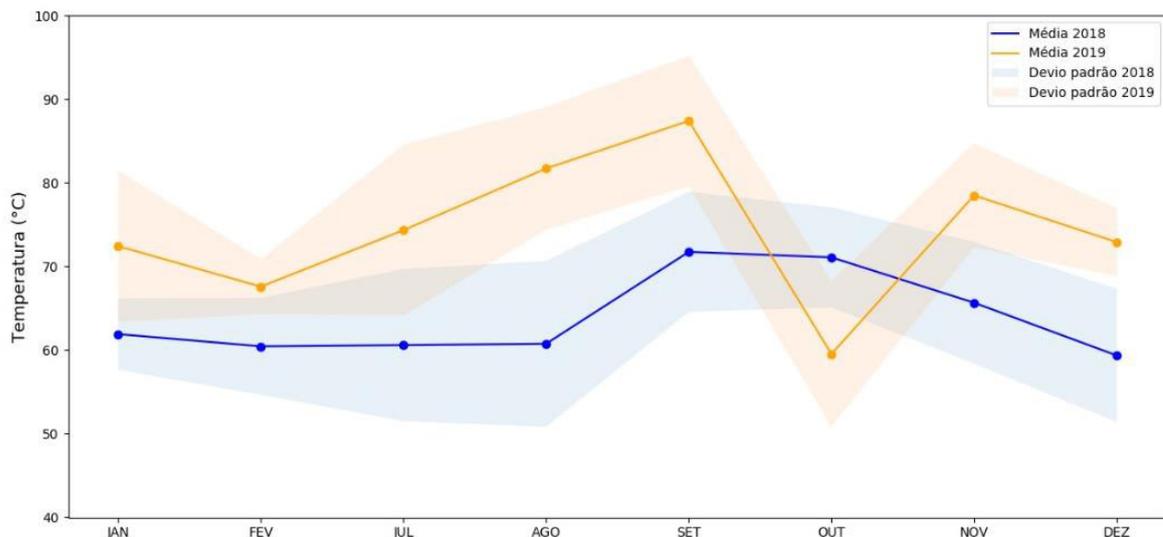
5.2. Efeitos da otimização do sistema de pré-aquecimento de ar das caldeiras

5.2.1 TEMPERATURA DE AR PRÉ-AQUECIDO

Baseado nos dados de temperatura do ar que sai dos pré-aquecedores da caldeira 01, foi possível calcular a média e desvio padrão das temperaturas do ar primário e secundário após otimização no controle das unidades de pré-aquecimento. Para o ar primário, na maioria dos meses, a média das temperaturas foi maior após as modificações no controle, indicando que de fato houve um aumento na temperatura do ar pré-aquecido. Esta é a principal evidência da otimização do aquecimento

As maiores temperaturas para o ar primário e secundário podem ser observadas nos meses de julho, agosto e setembro, e ficaram em torno 78°C, 82°C e 85° respectivamente, como pode ser visto na figura 35 e figura 36. Este período de maiores temperaturas coincide com o período em que o sistema da caldeira 01 esteve em controle automático, como pode ser visto na figura 33, o que indica que o novo modo de controle, quando utilizado, e maximiza a temperatura do ar.

Figura 35 – Média e desvio padrão da temperatura do ar primário pré-aquecido na caldeira 01.

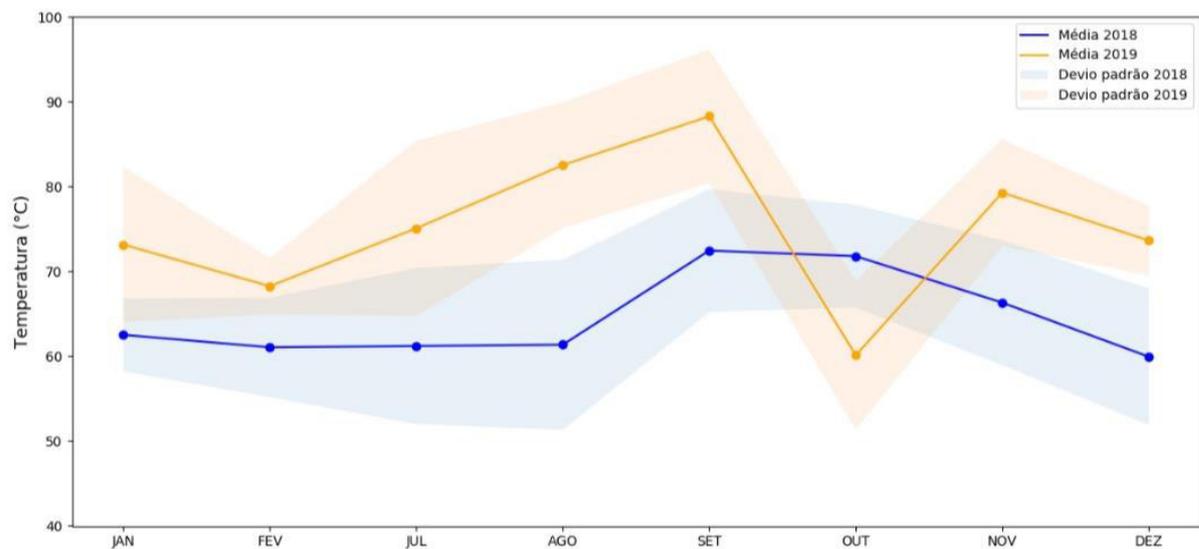


Fonte: Próprio Autor (2019).

O desvio padrão das temperaturas do ar na caldeira 01 indicam uma maior dispersão após a otimização do pré-aquecimento, o que sugere que o controle está modulando entre temperatura mais baixas quando necessário e temperaturas mais altas quando possível.

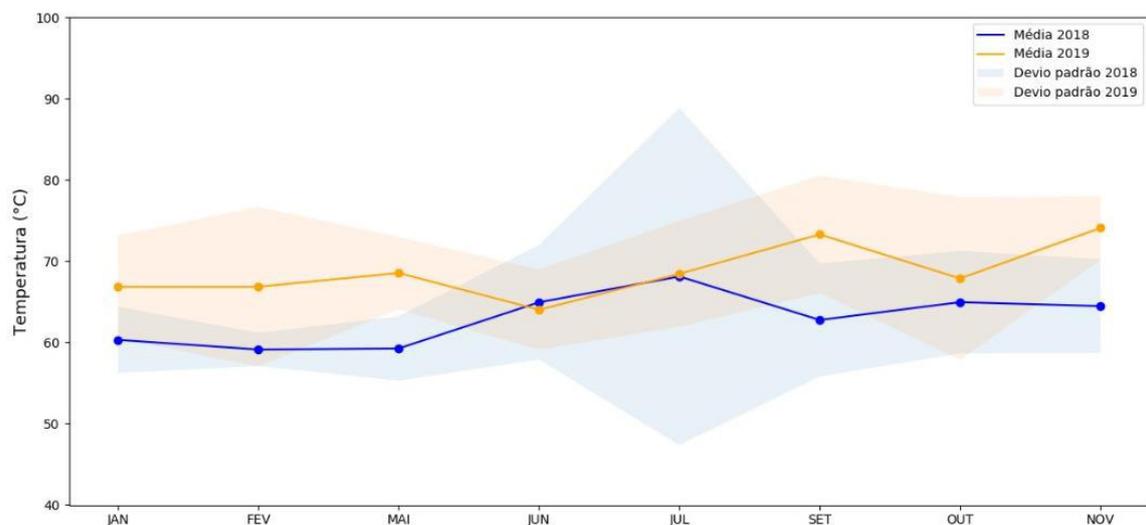
Baseado nos dados de temperatura do ar na caldeira 02, e calculando a média e o desvio padrão para o ar primário nota-se (ver figura 37e 38) na maioria dos meses um aumento na temperatura do ar, indicando que os ganhos energéticos neste primeiro estágio de aquecimento foram significativos após a implementação da otimização. As maiores médias são observadas nos meses julho e setembro de 2019, com valores em torno de 70°C e 71° C nesta ordem. O desvio padrão indica apenas uma leve dispersão em relação ao período anterior a otimização.

Figura 36 – Média e desvio padrão da temperatura do ar secundário pré-aquecido na caldeira 01.



Fonte: Próprio Autor (2019).

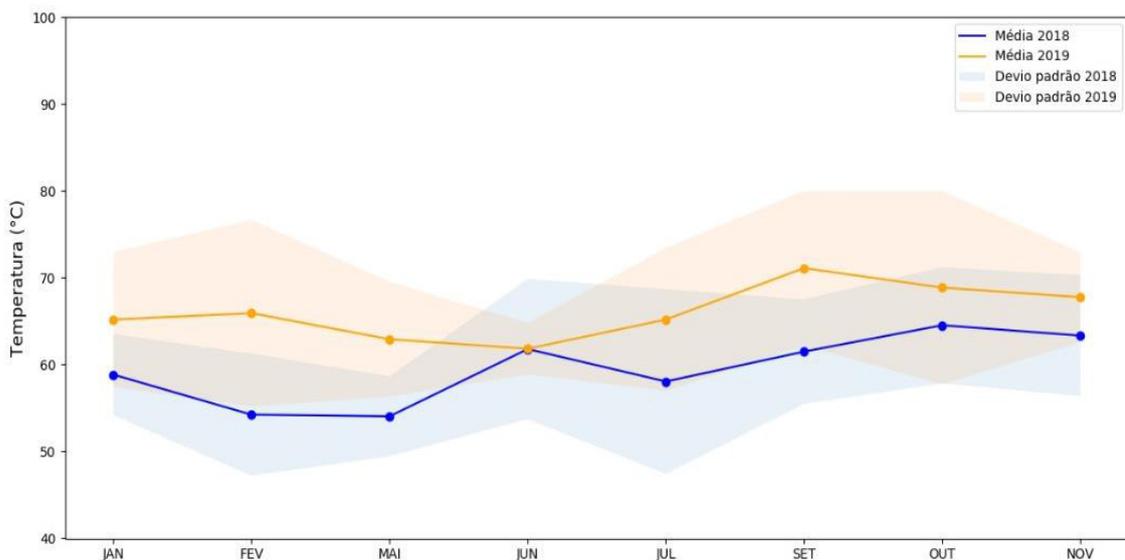
Figura 37 – Médias e desvio padrão da temperatura de ar primário pré-aquecido na caldeira 02.



Fonte: Próprio Autor (2019).

Quando se observa a média e desvio das temperaturas do ar secundário da CA01, observa-se um aumento de temperatura bem mais constante, geralmente em torno de 10°C, assim mesmo existindo um incremento na temperatura, estas não tem variado, portanto o controle não está forçando o sistema de pré-aquecimento para maiores e menores temperaturas quando necessário. As maiores temperaturas obtidas ocorreram nos meses de julho e setembro, e ficaram em torno de 70°C e 72°C. Apenas uma leve variabilidade é observada na temperatura do ar secundário.

Figura 38 – Média e desvio padrão da temperatura de ar secundário pré-aquecido na caldeira 02.



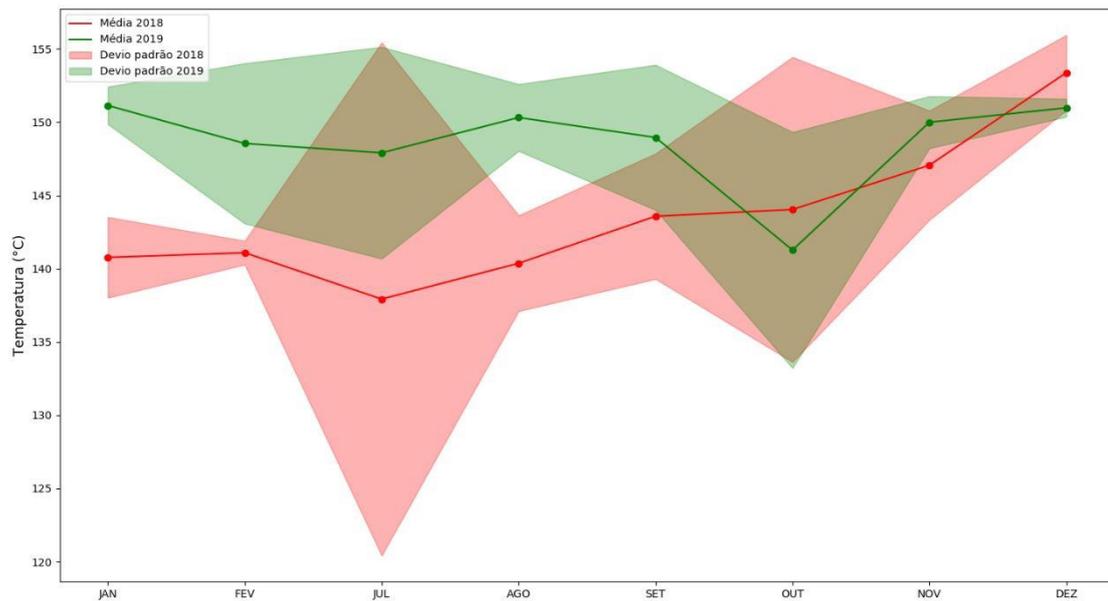
Fonte: Próprio Autor (2019).

5.2.2 TEMPERATURA DOS GASES

A figura 39 apresenta a temperatura média dos gases de exaustão antes e depois da otimização. No ano de 2018, até meados de setembro que foi quando as modificações de controle foram aplicadas na caldeira 01, a temperatura dos gases permaneceu próxima de 142°C que era a temperatura de referência utilizada no modo de controle antigo. Assim, a partir do primeiro mês de aplicação do controle já se percebeu uma tendência de aumento dessa temperatura em direção ao novo limite de controle estabelecido. A instabilidades observada pelo desvio padrão é devido ao uso do controlador, principalmente no seu limite superior de de controle, de 152 °C. Alguns resultados pontuais são observados acima e abaixo dos limites de controle, que muito provavelmente está associado a carga da caldeira 01. Assim como na caldeira 01, a temperatura dos gases na caldeira 02 se mostrou bastante controlada antes

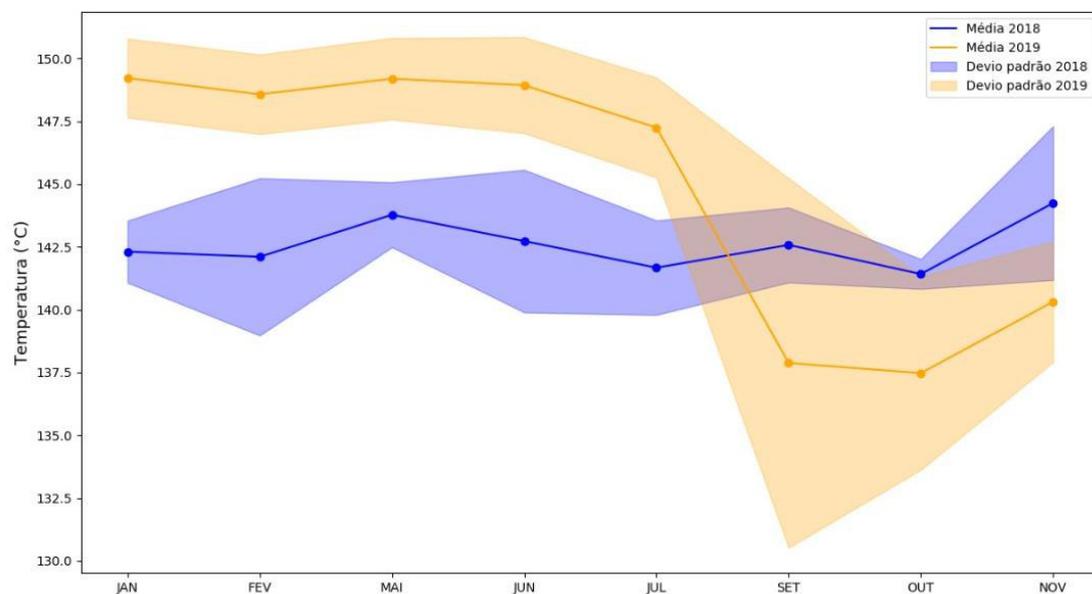
otimização, no entanto, assim que o modo de controle otimizado foi aplicado, por volta de novembro de 2018, nota -se uma forte tendência do aumento da temperatura para próximo do limite superior estabelecido que foi de 152 °C (ver figura 40). A partir deste momento, na maioria das vezes a temperatura dos gases se manteve controlada e dentro do intervalo de temperatura estabelecido no modo de controle otimizado. Esse comportamento confirma que a o a otimização regulou a temperatura dos gases e ao mesmo que aquecia o ar.

Figura 39 – Temperatura dos gases da caldeira 01.



Fonte: Próprio Autor (2019).

Figura 40 – Temperatura dos gases da caldeira 02.



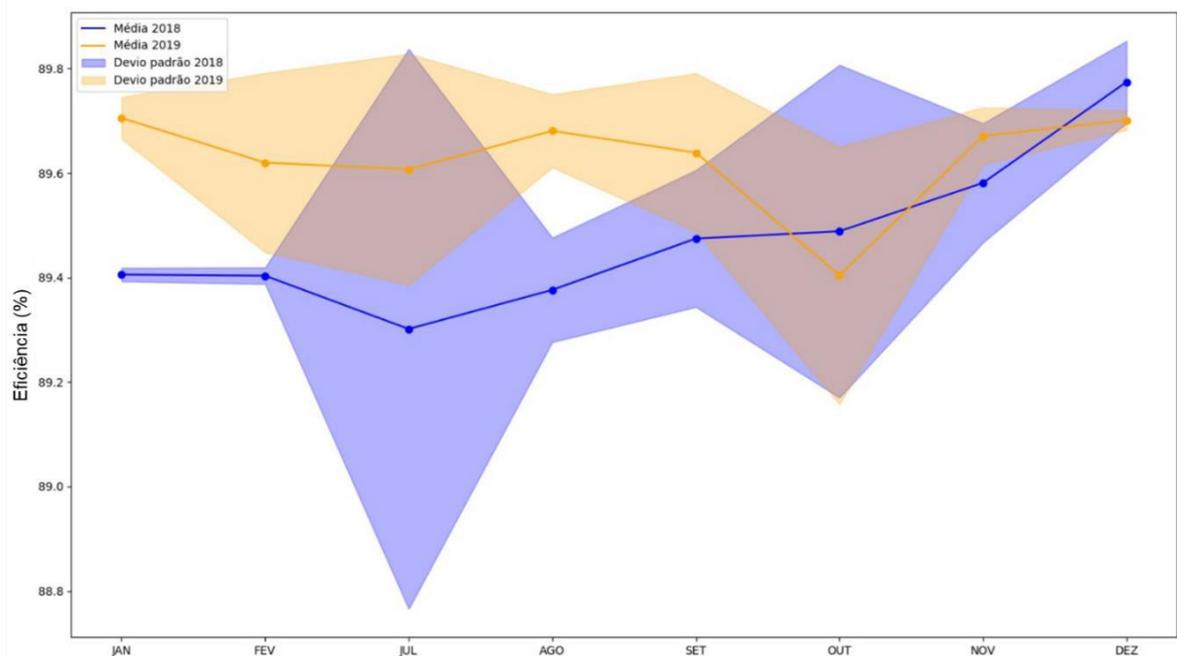
Fonte: Próprio Autor (2019).

5.3 Análise da variação de eficiência das caldeiras CFBs

A eficiência das caldeiras é determinada pelos ganhos e perdas de energia dentro do volume de controle da caldeira, conforme relatado na literatura. À medida que colocamos o ar mais quente no volume de controle das caldeiras, fornecemos uma energia adicional para o equipamento, aumentando a energia que entra nas caldeiras, o que possivelmente levou ao aumento de eficiência das caldeiras. Contudo, o aumento da temperatura dos gases representou uma maior perda de energia, o que deveria ocasionar uma redução na eficiência da caldeira. Entretanto, esse comportamento não foi observado no estudo realizado, pois a eficiência aumentou após a otimização, o que indica que a energia recebida pelo pré-aquecimento do ar compensou a energia perdida pela temperatura dos gases.

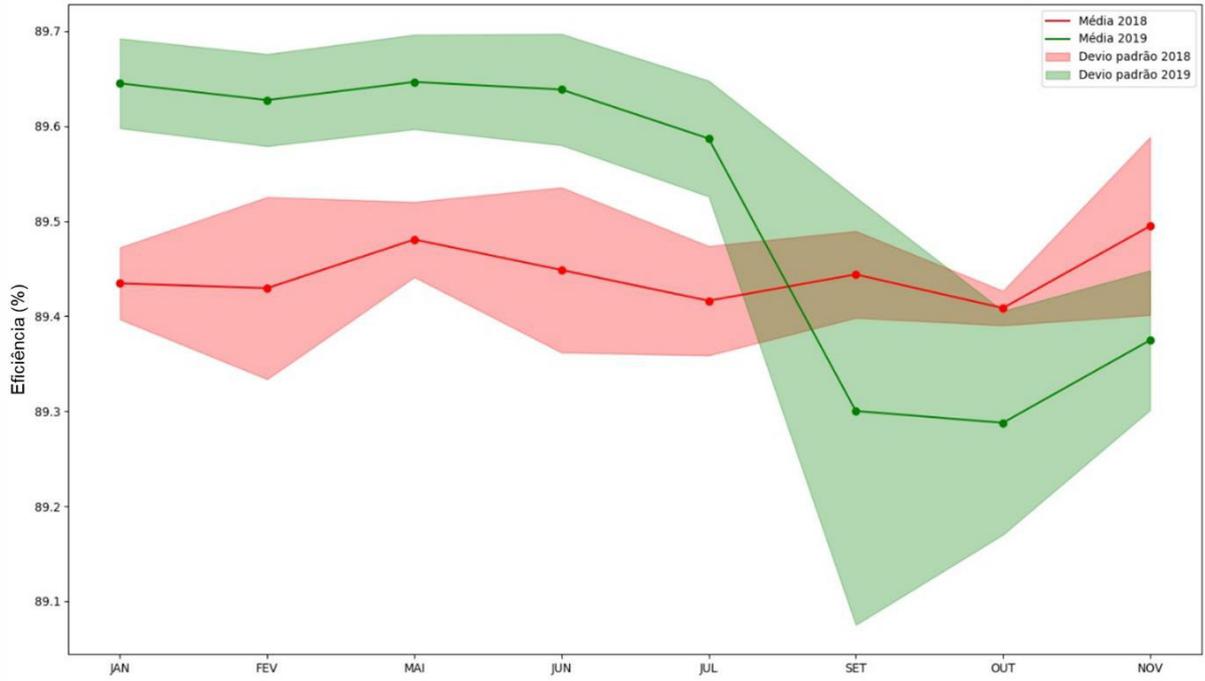
Assim como na caldeira 01, os resultados adquiridos para caldeira 02 se mostraram promissores, em sua maioria os valores de eficiência foram maiores nos períodos posteriores a otimização do sistema de pré-aquecimento de ar, exceto para alguns meses, indicando novamente que mesmo existindo perdas relacionadas a energia dos gases, o ganho na temperatura do proporcionou um aumento na eficiência da caldeira 02. A figura 42 apresenta as eficiências obtidas para a caldeira 02, os dados analisados indicam em sua maioria um pequeno aumento de eficiência, em torno de 0,1% a 0,16% após a otimização do sistema de pré-aquecimento de ar.

Figura 41 – Eficiência estimada da caldeira 01.



Fonte: Próprio Autor (2019).

Figura 42 – Eficiência estimada da caldeira 02.



Fonte: Próprio Autor (2019).

6 CONCLUSÃO

A otimização de equipamentos individuais como pré-aquecedores de ar de combustão em caldeiras deve ser uma prática recorrente, uma vez que pode proporcionar o aumento de temperatura do ar, incremento na taxa de energia e aumento na eficiência de uma caldeira, o que reduz custos e emissões.

Os resultados apresentados evidenciam a otimização das unidades de pré-aquecimento de ar das caldeiras de leito fluidizado, o que foi confirmado pelo aumento de temperatura do ar no primeiro estágio de aquecimento e pelo aumento de temperatura dos gases de combustão da caldeira.

Mesmo que o aumento da temperatura dos gases de combustão represente uma perda de energia considerando as entradas e saídas de energia no volume de controle das caldeiras, os resultados de eficiência apresentados sugerem que ganho energético obtido na fase de pré-aquecimento foi efetivo a ponto de compensar as perdas energéticas relacionadas a temperatura dos gases. O ganho energético das duas caldeiras foi evidenciado pelo aumento da eficiência destes equipamentos.

Tendo em vista todos os aspectos observados, entende-se que a otimização do pré-aquecimento de ar teve um impacto positivo sobre a eficiência das caldeiras de leito fluidizado desta refinaria de alumina.

7 SUGESTOES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Validação estatística para análise das mudanças nas variáveis de processo.
- Estudo da performance térmica dos pré-aquecedores de ar.
- Estudo da eficiência térmica dos aquecedores de ar.
- Análise do impacto da sopragem de fuligem na eficiência de caldeiras CFBs.
- Avaliação da eficiência térmica em economizadores e superaquecedores em caldeiras CFBs.

REFERÊNCIAS

- ADVANCED COIL. **Water & Glycol Heating Coils**. 2015? Disponível em: <https://advancedcoiltechnology.com/heating-glycol/>. Acesso em: 10 de dez. de 2019.
- BASU, P. **Circulating Fluidized Bed Boilers. Design, Operation and Maintenance**. Springer International Publishing: Switzerland, 2015. 370 p.
- BASU, P. **Combustion and gasification in fluidized beds**. Taylor & Francis Group: United States of America, 2006. 496 p.
- BAZZO, E. **Geração de Vapor**, 2ºed., Florianópolis: Ed. da UFSC, 1995. 216 p.
- BHATIA, A. **Improving Energy Efficiency of Boiler Systems**. Continuing Education and Development, Inc., New York, United States of America, 2012. 64 p. Disponível em: <https://www.pdhone.com/courses>. Acesso: 15 de dez. 2019.
- BIZZO, W.A. **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. Apostila do Curso, Faculdade de Engenharia Mecânica, Unicamp, São Paulo, 2003. 164 p. Disponível em: <https://www.docsity.com/pt/geracao-distribuicao-e-utilizacao-de-vapor-1/4711855/>. Acesso em: 30 de set. 2019.
- BRASIL. **Plano Nacional de eficiência energética – Premissas e Diretrizes Básicas**. Brasil: Ministério de Minas e Energia, 2010. 156 p. Disponível em: <http://www.biblioteca.presidencia.gov.br/presidencia/dilma-vanarousseff/publicacoes/conselhos/conselho-nacional-de-politica-energetica/plano-nacional-de-eficiencia-energetica-premissas-e-diretrizes-basicas/@@download/file/PlanoNacEfiEnergetica.pdf>. Acesso em: 10 de dez. 2019.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7º ed. McGraw-Hill: Porto Alegre 2013. 1035 p.
- CHAINBAMRUNG, P. **CFB Boiler Desing, Operation and Maintenance**. 2012, 179 p. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/PichaiChaibamrung/cfb-boiler-basic-design-operation-and-maintenance>. Acesso em 03 de dez. de 2019.
- CLEAVER BROOKS. **Boiler Efficiency Guide**. Cleaver Brooks, Inc, United States of America, 2010. 24 p. Disponível em: http://cleaverbrooks.com/uploadedfiles/internet_content/reference_center/insights/boiler%20efficiency%20guide.pdf. Acesso em: 12 de dez. de 2019.
- DUTRA, R. M. **Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro**. Tese (Mestrado em Ciências e Planejamento Energético) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001. Disponível em: Viabilidade técnico-econômica da energia eólica face ao novo marco regulatório do setor elétrico brasileiro. Acesso em: 10 de dez. 2019.
- EDGAR, T. F.; HIMMELBLAU, D. M.; LASDON, L. S. **Optimization of Chemical Processes**. 2ª ed, United State of America: McGraw-Hill Companies, 2001. 672 p.

EINSTEIN, D. et al. **Steam Systems in Industry: Energy use and Energy efficiency. Improvement Potencial.** 2001. 13 p. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/255271068_Steam_systems_in_industry_Energy_use_and_energy_efficiency_improvement_potentials. Acesso em: 09 de set. 2019.

FARIAS, L.M.; SELLITO, M.A. **Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras.** Revista Liberato: Novo Hamburgo, v.12, nº17, p.01-106. Jan, 2011.

FRAGMAQ. **Entendendo os problemas da crise energética no mundo.** São Paulo, 2013. Disponível em: <https://www.fragmaq.com.br/blog/entenda-os-problemas-da-crise-energetica-no-mundo/>. Acesso em 03 de dez. de 2019.

Generators. Performance Test Codes. ASME, 2013. 288 p.
<http://www.hydro.com/pt-BR/a-hydro-no-brasil/sobre-o-aluminio/ciclo-de-vida-doaluminio/refino-da-alumina/>. Acesso em: 13 de set. 2019.

GOMES, M. P. et al. **Análise da eficiência energética em segmentos industriais selecionados.** Empresa de Pesquisa Energética – EPE, Brasil, 2017. 72 p.

JUNIOR, J. F. S. **Melhoria na Arquitetura do Sistema de Controle de Combustão de uma Caldeira Modelo DZ-SD na Refinaria da Hydro Alunorte.** 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Processo) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processo, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019. Disponível em: <http://ppgep.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/dissertacoes/Dissertacao2015-PPGEP-MP-JuvenalFariasdeSousaJunior>. Acesso em: 10 de dez. 2019.

KALID, R. A. **Otimização de processos químicos: problemas sem restrições.** Laboratório de Controle e Automação Industrial, Universidade Federal do Bahia: Bahia, 2015.

KRISTINSSON, H.; LANG, S. **Boiler control: Improving Efficiency of boiler Systems.** Thesis - Lund University, Faculty of Engineering: Sweden, 2010. 90 p.

NHAMBIU, J. **Geradores de Vapor.** Notas de aulas, 4º ano, Aula 15, 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/6453558-Geradores-de-vapor-4o-ano-aula-15.html>. Acesso em 13 de dez. 2019.

NOGUEIRA, F. A. H.; NOGUEIRA, F. J. H.; ROCHA, C. R. **Eficiência Energética no Uso de Vapor.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005. 196 p. Disponível em: <https://bucket-gw-cni-static-cms-si.s3.amazonaws.com/media/uploads/arquivos/LivroVapor.pdf>. Acesso em: 08 de ago. 2019.

PHELPS, F. **A practical guide to chemical process optimization: analysis of a styrene plant.** Thesis, Faculty of the University of Mississippi: Oxford, 2015, 33 3.

POMPERMAYER, M. L.; FURTADO, A. T. **A crise energética dos anos setenta e suas repercussões na economia dos países industrializados.** São Paulo, Biblioteca Digital da Unicamp, 1998. 6 p. Disponível em: [www.bibliotecadigital.unicamp.br > document](http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document). Acesso em: 09 de dez. 2019

RAYPROLU, K. **Boilers for power and process**. Taylor & Francis Group: United States of America, 2009. 824 p.

ROBERTS, I. et al. **Steam Handbook: An introduction to steam generation and distribution.**, 1ª ed, Suíça: Endress+Hauser Flowtec AG, 2017. 124 p.

RUSSEL, J. B. **Química Geral**, volume 1. Tradução e revisão técnica Márcia Guekezian, et al. 2 ed. São Paulo: Pearson Universidades, 1994. 822 p.

SIMABUBUKULO, L. A. et al. **Energia, Industrialização e Modernidade – História Social**. Fundação Energia e Saneamento, 2006. 34 p. Disponível em: <http://eletromemoria.fflch.usp.br/content/energia-industrializacao-e-modernidade-historia-social-lucas-antonio-nizuma-simabukulo-luiz>. Acesso em: 09 de dez. 2019.

The American Society of Mechanical Engineers, ASME PTC 4-2013. **Fired Steam**. United States of America, 2013. 288 p.

THE BABCOCK & WILCOX COMPANY. B&W. **Steam/its generation and use**. 42nd edition, North Carolina, United State of America, 2015.

TORRES, A.A.O. **Modelagem do Processo Bayer utilizando o software comercial Aspen Plus**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química, UNICAMP, São Paulo, 2001. Disponível em: http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/267614/1/Torres_ArmandoAntoniodeOliveira_M.pdf. Acesso em: 15 de ago. 2019.

TURNER, W. C.; DOTY, S. **Energy Management Handbook**. 6th ed . The Fairmont Press, Inc: United States of America, 2007. 924 p.

TURTON, R. et al. **Analysis, synthesis, and design of chemical processes**. 3ª ed, Persson Educations: United States of America, 2009. 1143 p.