

RODRIGO MORETTO DA SILVA

Estudo de aumento de eficiência e produção de uma Caldeira de Recuperação Química

Guaratinguetá - SP
2016

Rodrigo Moretto da Silva

Estudo de aumento de eficiência e produção de uma Caldeira de Recuperação Química

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador (a): José Elias Tomazini

Guaratinguetá - SP
2016

S586e

Silva, Rodrigo Moretto da

Estudo de aumento de eficiência e produção de uma caldeira de recuperação química / Rodrigo Moretto da Silva – Guaratinguetá, 2016.

59 f : il.

Bibliografia: f. 58

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. José Elias Tomazini

1. Caldeiras 2. Caldeiras a vapor 3. Fornalhas I. Título

CDU 621.772

RODRIGO MORETTO DA SILVA

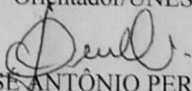
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

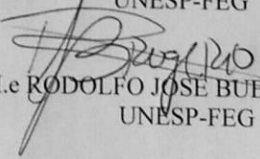
APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr.  MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ANTÔNIO PERRELLA BALESTIERI
UNESP-FEG


Prof. M.e RODOLFO JOSÉ BUENO ROGÉRIO
UNESP-FEG

Dezembro 2016

dedico este trabalho
de modo especial, à minha família

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha inteligência, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Elias Tomazini* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível.

aos meus pais *Abimael e Yara*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivaram meus estudos.

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campos de Guaratinguetá pela dedicação e alegria no atendimento.

“Só sabemos com exatidão quando sabemos pouco;
à medida que vamos adquirindo conhecimento,
instala-se a dúvida.”

Goethe

RESUMO

O presente trabalho tem como foco a análise e estudo do aumento de eficiência e produção de uma caldeira de recuperação química para atingir os objetivos futuros de aumento de produção de celulose da fábrica analisada. Foram obtidos os dados de projeto de implantação de 1985 e do projeto de renovação da caldeira de 2002, além dos dados coletados durante a operação entre 2015 e 2016. Através da análise dos dados foi realizada uma discussão dos gargalos que dificultam a produção da caldeira e em seguida foram propostas modificações diversas, desde mudanças de processos até a utilização de um novo projeto de caldeira com ciclo de reaquecimento de vapor. As melhores soluções foram definidas analisando a viabilidade de realização do aumento de produção em relação às dificuldades locais e teóricas das propostas. Parte das soluções considerou cálculos de aumento de produção e eficiência e parte foi teórica, por serem projetos de empresas fornecedoras externas. Definiu-se que primeiramente será necessário realizar manutenção nas áreas identificadas como gargalos para então realizar duas possíveis soluções. A primeira, mais simples, altera os parâmetros de operação da caldeira alcançando um pequeno aumento de produção e eficiência, enquanto a segunda, mais complexa, visa modernizar partes da fornalha e do sistema de ar para alcançar um aumento de produção mais significativo. Definiu-se que, levando em consideração os objetivos da fábrica, a caldeira com ciclo de reaquecimento de vapor não atende alguns dos pré-requisitos de projeto da empresa.

PALAVRAS-CHAVE: Eficiência. Caldeira de recuperação química. Aumento de produção. Fornalha.

ABSTRACT

The present work aims to analyze and study the increase in efficiency and production of a chemical recovery boiler to reach the future objectives of increasing the pulp production of the analyzed factory. Project data was obtained for its installation in 1985 and for the renovation project in 2002, besides the collected data during the operation of the boiler between 2015 and 2016. By analyzing the data a discussion about the bottlenecks that hold back the boiler's production took place followed by some modification propositions, from process changes to the use of a new project of a reheat steam cycle boiler. The best solutions were defined by analyzing the efficiency and production increase viability related to the theoretical and local difficulties of the proposals. Part of the solutions considered efficiency and production increase calculations and part was theoretical, since they are projects by third party companies. It was defined that firstly it is necessary to apply maintenance on the current identified bottlenecks so that the following two solutions can be considered. The first, and simpler, is the modification of certain operational parameters of the boiler to reach an increase of the efficiency and production of the plant, while the second, more complex, aims to modernize areas of the furnace and air system to reach a more significant result. It was decided that, considering the main objectives of the factory, the reheat steam cycle boiler does not comply with some of the company's project prerequisites.

KEYWORDS: Efficiency. Chemical recovery boiler. Production increase. Furnace.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Simplificação do Processo <i>Kraft</i>	18
Figura 2 – Modelo de caldeira de recuperação	20
Figura 3 – Região inferior da fornalha	23
Figura 4 – Bicas de fundido e tanque de dissolução	23
Figura 5 – Composição do licor negro	25
Figura 6 – Componentes da caldeira de recuperação química	26
Figura 7 – Exemplo de sistema de ar em uma caldeira de recuperação química	28
Figura 8 – Sistema de circulação de água	31
Figura 9 – Gerador de vapor com tubulão duplo e superaquecedores	33
Figura 10 – Gráfico dos dados relevantes à análise do ar secundário	42
Figura 1 - Geradores de vapor de tubulão duplo e único.....	48
Figura 12 – Desenho do projeto da caldeira de dupla pressão	51
Figura 13 – Diagrama da configuração do ciclo de reaquecimento	52
Figura 14 – Ponto onde a corrosão passa a ser crítica	53
Quadro 1 – Vantagens e desvantagens do Processo <i>Kraft</i>	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição e dados gerais do licor negro	36
Tabela 2 – Principais informações de projeto e operação em 2016 da caldeira CBC 3	38
Tabela 3 – Temperaturas nos precipitadores da caldeira CBC 3.....	39
Tabela 4 – Concentração média mensal do licor negro.....	40
Tabela 5 – Principais dados para análise do ar secundário.....	41
Tabela 6 – Média mensal da produção de vapor da caldeira CBC 3.....	43
Tabela 7 – Dados estimados e calculados entre 2016 e produção futura	44

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVOS	16
1.1	ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	PROCESSO KRAFT E SUSTENTABILIDADE	18
2.2	FUNÇÕES DAS CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO	19
2.3	RECUPERAÇÃO	21
2.3.1	Evaporação	21
2.3.2	Caldeira de recuperação	22
2.3.3	Geração e distribuição de vapor	23
2.4	COMBUSTÍVEL	24
2.5	PROCESSOS DAS CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO	25
2.5.1	Sistema de ar	26
2.5.1.1	Ar primário	28
2.5.1.2	Ar secundário	29
2.5.1.3	Ar terciário	30
2.5.2	Sistema de gases de combustão	31
2.5.3	Água e vapor	31
2.5.4	Licor negro e cinzas	33
2.5.5	Óleo e gás	34
2.5.6	Licor verde	34
2.5.7	Equipamentos auxiliares	34
3	DADOS E INFORMAÇÕES COLETADAS	36
3.1	DADOS DO LICOR	36
3.2	CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO	37
3.3	GARGALOS	38
4	PROPOSTAS PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA	44
4.1	MODIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSO	44
4.2	MODIFICAÇÃO DE PARTES DA CALDEIRA	46
4.2.1	Aumento da área da fornalha	46
4.2.2	Modificação do tubulão de vapor – Single drum	47
4.2.3	Modificação do sistema de ar	49

4.2.4	Aumento dos sólidos secos do licor negro	50
4.3	CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO QUÍMICA COM DUPLA PRESSÃO.....	51
5	DISCUSSÕES FINAIS.....	55
6	CONCLUSÃO.....	57
	REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

Fábricas de papel e celulose são dependentes de vários processos para que seu ciclo produtivo funcione de maneira eficiente. Elas necessitam de uma grande quantidade de vapor e energia, assim, foi necessário descobrir uma forma de inovar seu ciclo produtivo. Segundo Vakkilainen (2005), a melhor forma encontrada foi o reaproveitamento de uma substância chamada licor negro como combustível. Esse licor negro e alcalino costumava ser rejeitado e, nas décadas de 1930 e 1940, foi criada uma forma de recuperação do licor em larga escala. O licor negro é, basicamente, o rejeito do processo de cozimento da celulose. Durante o cozimento o chamado licor branco é utilizado para transformar o cavaco de madeira em polpa celulósica, retirando componentes indesejáveis ao processo, como a lignina. O licor negro é composto de produtos químicos utilizados e materiais orgânicos dissolvidos durante o cozimento, que são separados da celulose durante a etapa de lavagem da polpa celulósica.

Como comentado anteriormente, a intenção por trás da recuperação do licor negro é sua capacidade de servir de combustível em caldeiras de recuperação química, que o queimam e geram vapor que é utilizado em turbinas, assim, gera uma quantidade de energia muitas vezes suficiente para abastecer a fábrica. Além disso, ao ser queimado é possível recuperar uma grande quantidade dos produtos utilizados durante o cozimento da celulose. Esses produtos são recuperados na forma de *smelt*, um fundido no fundo da fornalha que é dissolvido e passa por processos em um ciclo fechado para sua reutilização durante o cozimento como licor branco.

Fábricas de papel e celulose utilizam um dos processos produtivos mais completos entre as indústrias. Na fábrica estudada, por exemplo, o processo inclui desde a pesquisa de melhorias para a produção e plantio do eucalipto, passando por todos os processos produtivos relacionados ao papel e à celulose, até a recuperação de agentes químicos e tratamento de efluentes provenientes do processo. No processo de recuperação química, a geração de vapor para utilização nos processos internos e a geração de energia diminuem a dependência das fábricas na compra de energia e também diminuem os custos da produção. Observando-se o funcionamento deste tipo de fábrica, percebe-se a preocupação com a sustentabilidade e a busca de excelência operacional para que a empresa se destaque no mercado.

De acordo com o Treino E-Suzano Papel (2016), a sustentabilidade é de grande importância para esse tipo de fábrica e no caso estudado, o selo FSC (*Forest Stewardship Council*) foi obtido para mostrar esse compromisso. Isso significa ser ambientalmente adequado, socialmente justo e economicamente viável. Com o selo FSC, prova-se que tanto a

celulose quanto o papel da unidade são produzidos de maneira sustentável, respeitando o meio ambiente, as comunidades próximas e as gerações futuras.

1.1 OBJETIVOS

Com o aumento de demanda na produção de celulose para suprir o mercado e a necessidade de maior produção de energia, identificou-se na unidade a oportunidade de desenvolvimento de um projeto de análise das caldeiras de recuperação. Há duas caldeiras de recuperação em operação na fábrica; o estudo visa em especial a caldeira CBC 3, da fornecedora CBC Indústrias Pesadas S/A. Deseja-se analisar a atual produção da caldeira, bem como fazer um comparativo dos parâmetros atuais com os de projeto. Além disso, serão analisadas as mudanças que ocorreram em sua operação e produção desde a realização de *upgrade*, que é a modernização de sistemas da caldeira, até alterações em outras áreas da planta da fábrica. De posse desses dados, pode-se analisar qual a situação e a eficiência da caldeira e analisar se há e quais seriam os gargalos nela presentes. Havendo a possibilidade de ações de melhoria ou substituição de algum sistema, recomenda-se realizar um estudo de viabilidade. Além disso, serão considerados os objetivos de produção desejada para os próximos anos, para que a empresa possa continuar seu crescimento.

1.2 ESTRUTURA DOS CAPÍTULOS

A partir do capítulo de introdução, será realizada a apresentação dos capítulos seguintes conforme descrito abaixo:

No Capítulo 2 falaremos sobre a fundamentação teórica para facilitar o entendimento do funcionamento e importância da caldeira de recuperação química. Será feita uma explicação do processo mais utilizado nas fábricas de papel e celulose, chamado Processo *Kraft*, em seguida serão mostradas as funções da caldeira dentro desse processo seguida de uma explanação das etapas que mais afetam o ciclo de recuperação. Também será comentado, de maneira breve, o combustível utilizado nas caldeiras e então, com mais detalhes, cada um dos processos envolvidos no ciclo de recuperação.

O Capítulo 3 é responsável em fornecer informações sobre os parâmetros de operação da caldeira. Também aqui, falaremos melhor sobre a composição do licor negro e apresentaremos os parâmetros coletados para utilização no trabalho, entre eles estão os dados de projeto de 1985, da modernização de 2002 e de operação entre 2015 e 2016. Por fim serão

mostrados os gargalos identificados e que podem oferecer oportunidades de melhorias para a produção da caldeira.

No Capítulo 4 serão discutidas as propostas de melhorias, passando por modificações de valores operacionais, *upgrade* de algumas partes da caldeira e apresentação de um novo conceito de tecnologia de caldeiras de recuperação química.

O penúltimo capítulo, Capítulo 5, tem como foco definir as melhores escolhas para aplicação na caldeira estudada, apresentando as razões e viabilidade do projeto.

Por fim, o Capítulo 6 fica responsável em conter informações da conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

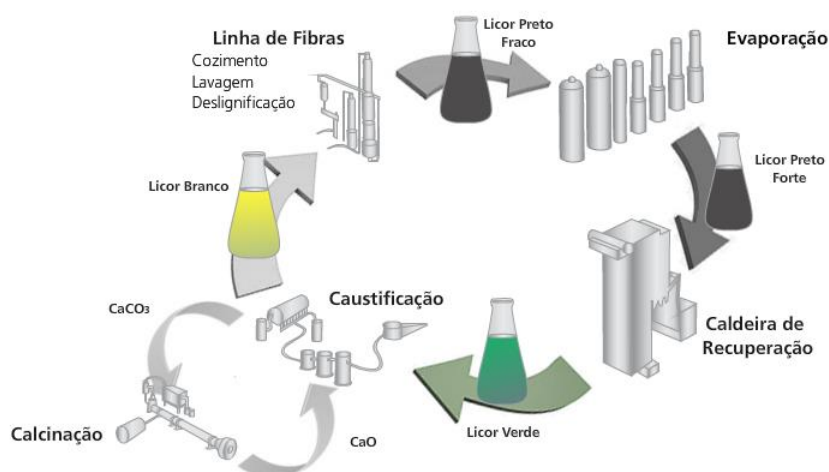
A seguir, será discutida toda a fundamentação teórica a respeito dos principais processos envolvidos com os elementos de recuperação, bem como as informações mais aprofundadas sobre caldeiras de recuperação e seus vários sistemas.

2.1 PROCESSO KRAFT E SUSTENTABILIDADE

Do Treino E-Suzano Recuperação 1 (2016), treino introdutório do ciclo de recuperação química, o processo utilizado na produção de papel e celulose pode variar de uma fábrica a outra, mas hoje, aproximadamente 96,7% da produção mundial utiliza o chamado Processo *Kraft*. Esse processo, também conhecido como Processo Sulfato, foi patenteado no ano 1884 e foi uma modificação do Processo Soda. Os reagentes de cozimento utilizados são a soda cáustica (NaOH) e o sulfeto de sódio (Na₂S). Utiliza-se o sulfato de sódio (Na₂SO₄) como substância de reposição (*make-up*) na caldeira de recuperação para se conseguir recuperar o sulfeto utilizado. Esse processo ataca quimicamente as moléculas de celulose e hemicelulose de maneira menos intensa, resultando em fibras mais resistentes.

A Figura 1 mostra de maneira simplificada o caminho da recuperação do licor em ciclo fechado utilizado na fábrica estudada.

Figura 2 - Simplificação do Processo *Kraft*



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016)

No Quadro 1 estão representadas algumas vantagens e desvantagens do chamado Processo *Kraft* de acordo com Treino E-Suzano Recuperação 1 (2016).

Quadro 1 – Vantagens e desvantagens do Processo Kraft

<i>Vantagens</i>	<i>Desvantagens</i>
<i>Maior resistência da pasta celulósica e também maior alvura.</i>	<i>Odor dos gases produzidos.</i>
<i>Recuperação de licor de cozimento com tratamento de efluentes e recuperação de reagentes.</i>	<i>Alto custo de investimento.</i>
<i>Maior flexibilidade na utilização de diferentes espécies de madeira.</i>	<i>Baixo rendimento da polpação (52 a 54%).</i>
<i>Ciclo de cozimento mais curto que em outros processos (sulfito).</i>	<i>Alto custo de branqueamento.</i>

Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 1 (2016)

O objetivo principal desse processo é a retirada da lignina da madeira sem danificar as fibras para se conseguir uma polpa celulósica de melhor qualidade. Sua retirada é necessária pois, além de conferir uma coloração escura e indesejável à celulose, ela não agrega resistência ao produto final. O ciclo de recuperação utilizado na fábrica estudada viabiliza ambiental e economicamente o processo produtivo de papel e celulose. Com ele é possível recuperar e concentrar o licor negro, proveniente do cozimento dos cavacos com licor branco, para utilizá-lo na geração de energia e recuperação de químicos utilizados no processo. Algumas das etapas relacionadas ao processo de recuperação são: evaporação, caldeira de recuperação, caustificação e calcinação, mas o foco desse estudo será a caldeira, citando os demais processos quando necessário.

2.2 FUNÇÕES DAS CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

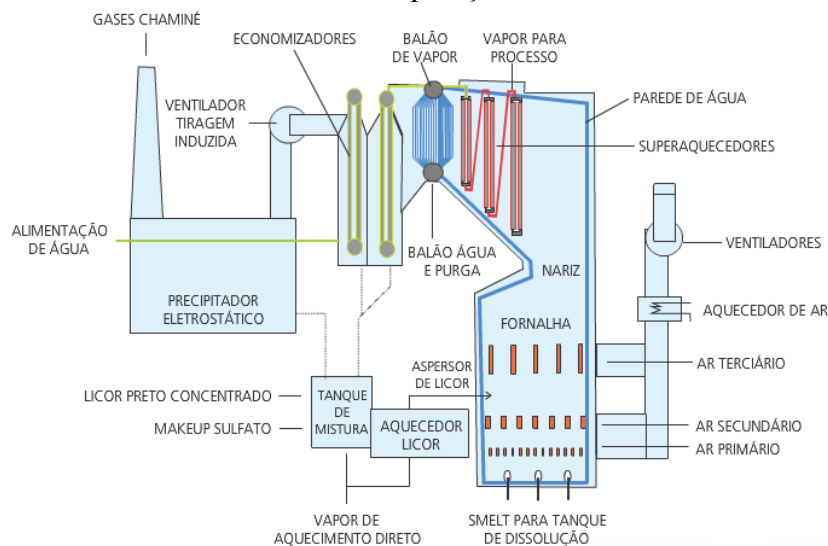
Vakkilainen (2005) explica que caldeiras de recuperação química utilizam o licor negro como combustível. Esse licor concentrado, com teor de sólidos secos normalmente na faixa de 70% a 85%, contém resíduos orgânicos de madeira dissolvidos juntamente com os químicos de cozimento aplicados no digestor. Quando em combustão, a porção orgânica do licor produz

grande quantidade de calor, que leva à produção de vapor de alta pressão para as turbinas a vapor com gerador elétrico acoplado ao eixo, chamados de turbogeradores na fábrica. Das turbinas, extrai-se vapor de baixa pressão para utilização nos processos da fábrica. Além disso, vapor de média pressão também pode ser extraído para aplicação no cozimento, em sopradores de fuligem e na evaporação de alto teor de sólidos. A combustão de licor negro é complicada e precisa ser controlada com cuidado, pois o licor apresenta altos níveis de enxofre, que requerem condições específicas de processo. Assim, evita-se a produção de dióxido de enxofre e emissões de gases de enxofre reduzido. Ocorrendo no leito fundido, a reação de combustão do enxofre inorgânico torna-se ambientalmente limpa.

O processo de caldeiras de recuperação é dividido em vários processos menores, explicados na lista abaixo:

1. Combustão de matéria orgânica do licor negro para gerar vapor;
2. Redução de compostos de enxofre inorgânico em sulfato de sódio;
3. Produção de fluxo inorgânico fundido composto principalmente por carbonato de sódio e sulfato de sódio com posterior dissolução desse fluxo em licor branco fraco para produzir licor verde;
4. Recuperação de cinzas inorgânicas dos gases de combustão para recuperar químicos;
5. Produção de fumaça de sódio para capturar resíduos de combustão de compostos de enxofre emitidos.

Figura 3 - Modelo de caldeira de recuperação



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016)

2.3 RECUPERAÇÃO

É o ciclo de recuperação utilizado na fábrica analisada que viabiliza ambiental e economicamente o processo produtivo de papel e celulose. Com ele é possível recuperar e concentrar o licor negro, proveniente do cozimento dos cavacos em licor branco, para utilizá-lo na geração de energia e recuperação de químicos utilizados no processo. Algumas das etapas relacionadas com o processo de recuperação são: evaporação, caldeira de recuperação, caustificação e calcinação. Além desses, ainda existem os processos de recuperação de água e efluentes.

2.3.1 Evaporação

Do Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016), responsável pelas informações mais detalhadas da área, o objetivo principal da evaporação é juntar todo o licor negro de baixa concentração, proveniente do processo de cozimento, lavagem, depuração, pré-branqueamento e branqueamento para evaporar parte da água nele presente, elevando sua concentração para que sua queima dentro da caldeira de recuperação seja mais eficiente. O licor de baixa concentração é conhecido como LP15 (15% de sólidos) e o licor obtido para queima é o LP70 (70% de teor sólido). O licor negro fraco é oriundo de aproximadamente 40% do volume da madeira, representando quase toda a lignina e extrativos, com uma pequena porcentagem de celulose e hemicelulose que acaba sendo degradada. Além desses compostos, também pode haver orgânicos oxidados provenientes da deslignificação com oxigênio.

O processo de evaporação é feito em trocadores de calor indiretos, com uma separação entre vapor e licor, utilizando tubos ou placas. Segundo o Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016), tubos são preferenciais por serem mais econômicos, permitirem maior facilidade de limpeza, além de aguentarem maior pressão de vapor e concentração de licor. Um dos maiores problemas nessa etapa são os problemas de incrustações, que podem ocorrer com maior facilidade quando se trabalha com um licor mais concentrado e viscoso. Isso gera menor transferência de calor nos trocadores, tornando o processo menos eficiente. Para se conseguir um aumento de eficiência nos grupos de evaporação, apenas o primeiro recebe vapor vivo da caldeira, sendo que a água evaporada por cada efeito é utilizada para aquecer o efeito seguinte e assim por diante. Isso é possível pois a temperatura de ebulição do licor

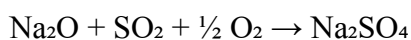
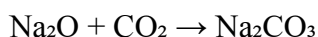
negro é mais elevada que a da água pura. A variação da pressão também afeta a temperatura de ebulição, sendo que quanto maior a pressão, maior a temperatura e vice-versa. Outro fator que afeta a eficiência do evaporador é a concentração dos sólidos do licor negro (quanto maior a concentração, maior a temperatura de ebulição). Aproximadamente, a cada uma tonelada de vapor consumido, consegue-se gerar de cinco a seis toneladas de água evaporada.

2.3.2 Caldeira de recuperação

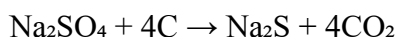
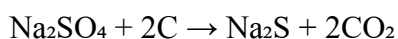
O combustível utilizado nas caldeiras de recuperação é o licor negro concentrado. Na fábrica estudada sua concentração é de aproximadamente 70% de sólidos. A combustão da parte orgânica do licor gera o vapor de processo utilizado na fábrica, enquanto que a parte inorgânica forma o *smelt* no fundo da fornalha. Com a queima de matéria orgânica do licor negro, diminui-se uma parcela dos problemas que existiriam com a necessidade de eliminar os resíduos sem que afetem o meio ambiente. O vapor gerado para processos com essa queima é utilizado na fabricação do papel, na extração da celulose e também na geração de energia para toda a fábrica.

De acordo com o Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016), outra importante função das caldeiras é a de produzir carbonato de sódio (Na_2CO_3) e sulfeto de sódio (Na_2S), que são utilizados na caustificação e na produção de licor branco, respectivamente. Lembrando que a função da caustificação também é de gerar licor branco.

As reações utilizadas para explicar a queima do licor, encontradas em Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016), são:

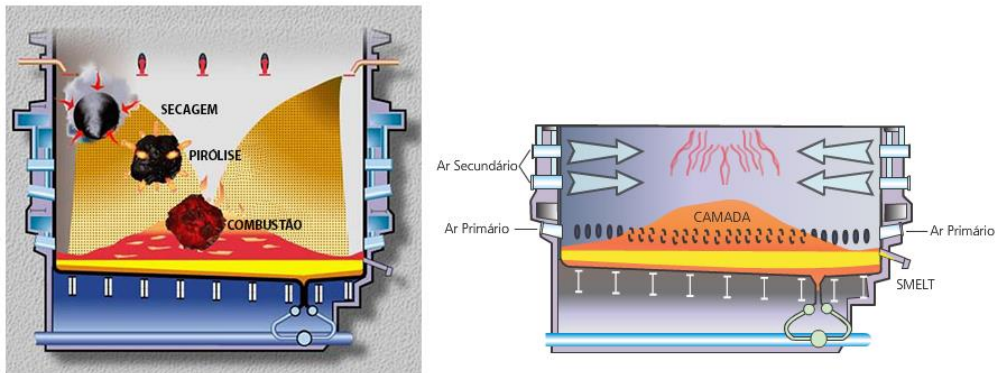


No leito, que se encontra na região inferior da caldeira, as fórmulas de queima são as seguintes:



A Figura 3 mostra alguns detalhes da fornalha da caldeira de recuperação, onde as reações acima descritas ocorrem.

Figura 4 - Região inferior da fornalha

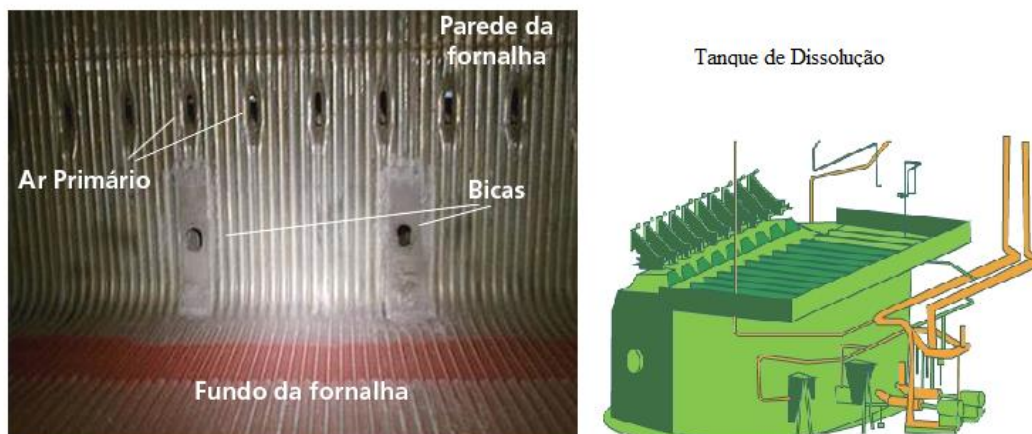


Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016)

O Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016) explica que, uma das formas de utilização das cinzas provenientes da queima e do pó proveniente do precipitador eletrostático é a mistura desses ao licor negro no tanque de mistura, antes da sua aspersão na fornalha, ainda na etapa dos evaporadores. As bicas de retirada do fundido, ou *smelt*, são resfriadas com água desmineralizada, pois o fluido está entre 800 e 950°C. O *smelt* que dali sai será diluído no tanque dissolvedor com licor branco fraco formando licor verde bruto para a caustificação.

A Figura 4 apresenta a região inferior da fornalha, com as entradas de ar primário e bicas de saída de *smelt*, além de mostrar um exemplo de tanque dissolvedor.

Figura 5 - Bicas de fundido e tanque de dissolução



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016)

2.3.3 Geração e distribuição de vapor

Um dos importantes aspectos das fábricas de papel e celulose é a sua capacidade de geração de vapor que é utilizado tanto na geração de energia elétrica através de turbinas

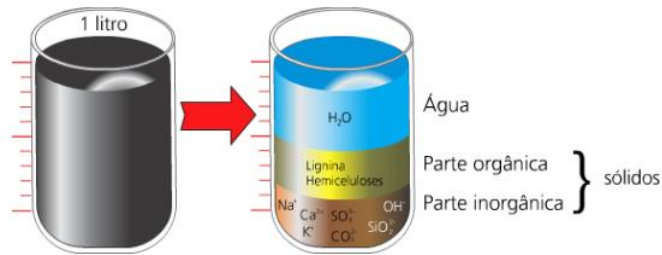
acopladas com geradores elétricos, quanto em diversos processos através das extrações de vapor de média e baixa pressão. O sistema utilizado é conhecido como sistema de cogeração e, na unidade em questão, são utilizadas duas caldeiras a gás e uma de biomassa, além das caldeiras de recuperação. A utilização dessas caldeiras a gás e biomassa, também conhecidas como caldeiras auxiliares, são necessárias para compensar a flutuação de consumo de vapor da fábrica. O consumo de vapor na produção de papel e celulose é variável, dependente dos tempos de parada das máquinas e processos. Dependendo do tipo de produto a ser fabricado, pode-se utilizar mais ou menos vapor nas etapas de secagem, por exemplo. Assim, as caldeiras auxiliares são utilizadas para garantir o bom funcionamento de todos os equipamentos da fábrica em questão, sem afetar a produção, podendo ser utilizadas para regular o consumo geral da fábrica. Devido a essa necessidade primária de utilização do vapor em processos, a fábrica não é autossuficiente em produção de energia elétrica e acaba comprando uma parcela de eletricidade para garantir o funcionamento de toda a fábrica. Outras fábricas, que não produzem papel, podem produzir maiores quantidades de vapor para geração de energia, tornando possível a venda de energia sobressalente.

2.4 COMBUSTÍVEL

Vakkilainen (2005) diz que o licor negro é composto por compostos orgânicos e inorgânicos. Sua composição é dependente da espécie de madeira que o gera, do método utilizado em seu cozimento e do processo de polpação empregado. Ao ser injetado na fornalha, sua matéria orgânica é queimada enquanto sua matéria inorgânica forma o *smelt* que será recuperado, retornando Na_2S ao sistema. Entre os combustíveis industriais, o licor negro possui um dos mais baixos valores de aquecimento, devido à importância de sua porção inorgânica em sua composição. Alto teor de água, baixo poder calorífico e alta quantidade de cinzas tornam a combustão do licor negro difícil.

A Figura 5 mostra a composição do licor de acordo com seus principais componentes.

Figura 6 - Composição do licor negro



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016)

Através da evaporação da água do licor negro, tornando-o mais concentrado, torna-se possível gerar mais vapor durante a queima do licor, pois uma menor quantidade do calor fornecido pela caldeira será gasta apenas evaporando água do licor. Vakkilainen (2005) mostra que no início da década de 1950 a concentração típica do licor negro era de aproximadamente 50%, sendo que a partir dos anos 1980, concentrações entre 70 e 80% já eram aplicadas. Com esse nível de concentração de sólidos secos, pode-se produzir grandes quantidades de vapor a alta pressão e temperatura, resultando em geração energética significativa.

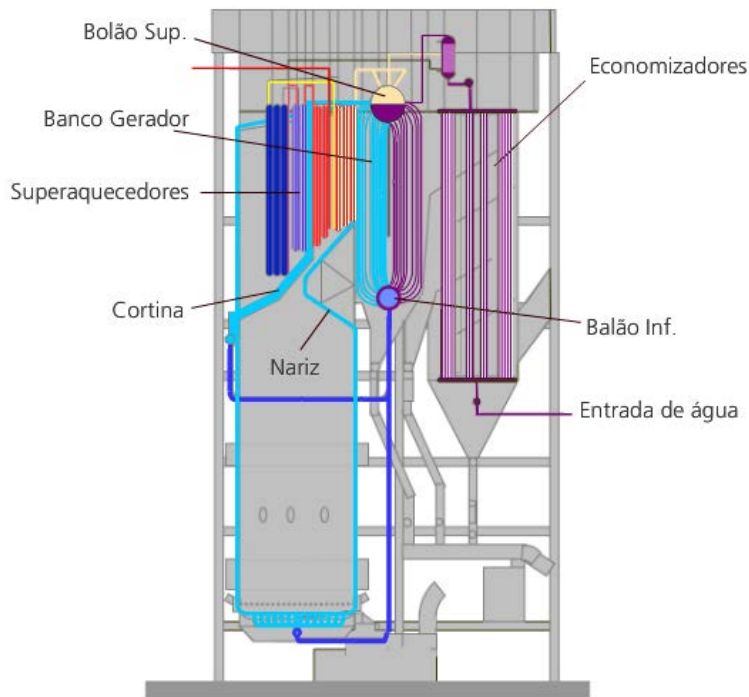
2.5 PROCESSOS DAS CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

Os processos mais importantes para se compreender o funcionamento de uma caldeira de recuperação química são:

- Sistema de ar;
- Sistema de gases de combustão;
- Sistema de água e vapor;
- Sistema de licor negro e cinzas;
- Sistema de óleo ou gás natural;
- Sistema de licor verde;
- Sistemas de equipamentos auxiliares.

Assim, a Figura 6 identifica alguns dos componentes responsáveis pelo funcionamento dos sistemas que serão explicados nos itens em seguida.

Figura 7 - Componentes da caldeira de recuperação química



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016)

2.5.1 Sistema de ar

Como explicado em Vakkilainen (2005), o licor negro é constituído por materiais orgânicos e inorgânicos que reagem dentro da fornalha durante a combustão. Com o aumento da quantidade de matéria orgânica do licor negro, maior a quantidade de ar necessária por unidade de sólido seco de licor negro. Os requisitos principais para o sistema de ar da caldeira são uma distribuição efetiva e uma mistura máxima de ar com os gases de combustão. Ar é tipicamente injetado por diversas elevações horizontais para garantir a combustão completa e minimizar as emissões. Sistemas de ar típicos de caldeiras possuem um duto de entrada de ar com silenciador, *venturi* para cálculo de fluxo de ar, sopradores de ar, aquecedores, dutos de distribuição e dutos de ar.

Além disso, equipamentos de medição de temperatura e pressão são instalados nos locais apropriados. O fluxo de ar é controlado através de *dampers* nas aberturas da fornalha e pelo controle dos sopradores de ar. O fluxo de ar através dos sopradores pode ser controlado por *dampers* no duto, mudança de velocidade de rotação dos mesmos e outros métodos. O controle de vazão de ar com *dampers* nas aberturas das fornalhas produz altas pressões no duto de ar. Isso aumenta o consumo de energia dos sopradores, mas garante vazão uniforme em cada abertura. Sopradores de ar instalados antes dos pré-aquecedores de ar diminuem o

consumo de energia dos sopradores. Depois dos aquecedores de ar o fluxo é dividido em dutos separados para uma distribuição idêntica pelos lados da caldeira. A temperatura do ar é controlada pelos aquecedores. Caso os gases de combustão sejam relativamente limpos, eles podem ser utilizados para pré-aquecer o ar. O papel do aquecimento do ar é de aumentar a temperatura da fornalha diminuindo o emprego de superfícies de troca de calor e aumentando a transferência de calor para o vapor. Os sistemas de ar mais recentes introduzem a maior parte do ar na parte inferior da fornalha, logo acima do piso. O objetivo principal é de manter uma alta temperatura e uma distribuição de velocidade do gás na fornalha inferior.

A maioria das inovações de sistemas de ar se concentram em aumentar a mistura e a penetração do ar nessa região. Um exemplo disso é o estudo realizado por MacCallum (2013), que explica os efeitos de realizar a injeção de ar primário de outra maneira, que será explicada no Capítulo 4 desse trabalho.

Outro fator que afeta o sistema de ar é o teor de sólidos secos do licor negro. Teores mais altos aumentam a temperatura da fornalha. Com maiores diferenças de temperatura, a penetração de jatos de ar aumenta. Todas as entradas de ar secundário são projetadas para controle de vazão e pressão da área. Assim, o operador pode alterar as condições de fluxo de ar de acordo com o teor de licor negro utilizado.

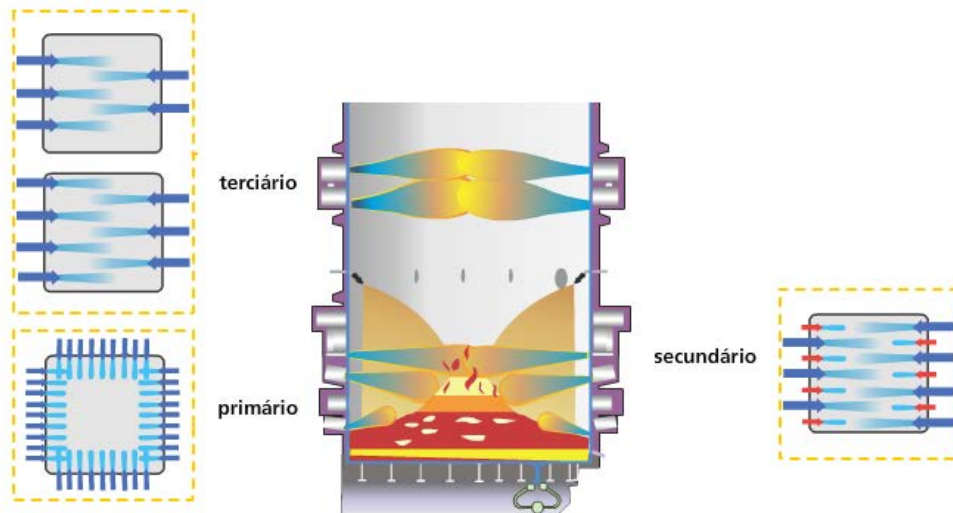
As entradas de ar são projetadas com um formato que maximize a sua vida útil e minimize as incrustações. Utilizando-se um design de combustão eficiente, toda a combustão ocorre dentro da parte inferior da fornalha. Todo o restante da altura da caldeira é utilizado para o arrefecimento dos gases de combustão antes que alcancem os superaquecedores. O ar de combustão é introduzido em três níveis; o primário e secundário estão localizados próximos do piso da fornalha, embaixo dos injetores de licor negro. O ar terciário se encontra acima dos injetores. Com tal sistema, condições de redução eficiente são mantidas próximas da fornalha inferior. Um ambiente de oxidação efetivo é criado na parte superior. Isso significa que entre 80 e 90% do ar é introduzido nas entradas de ar primário e secundário, enquanto o restante e o ar em excesso são introduzidos no ar terciário. A vazão de ar das entradas no nível primário pode ser ajustada individualmente ou em grupos, dependendo do projeto da caldeira, enquanto que os níveis secundário e terciário ocorrem de maneira independente. Os bocais de ar secundário e terciário devem ficar o mais aberto possível.

De CBC Indústrias Pesadas S.A. (1985), a distribuição do ar da caldeira é um pouco diferente da proposta na literatura anterior. No caso da caldeira CBC 3, 70% do ar é introduzido na região inferior, com 30% no ar primário e 40% no secundário. Eles são introduzidos às pressões de 784,5 Pa e 2451,6 Pa, respectivamente. O ar terciário corresponde

aos 30% restantes, a uma pressão de 4903,2 Pa. Essas razões podem mudar conforme a carga, em consequência da velocidade do ar primário introduzido na fornalha. Essencialmente, o ar primário e o secundário mantêm a atmosfera redutora no leito para redução de Na_2SO_4 em Na_2S .

A Figura 7 demonstra uma disposição comum dos níveis de ar primário, secundário e terciário, além de mostrar a abrangência de cada nível dentro da fornalha.

Figura 8 - Exemplo de sistema de ar em uma caldeira de recuperação química



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2

2.5.1.1 Ar primário

De acordo com Vakkilainen (2005), ar primário deve ser injetado a pressão e velocidade constantes para manter a estabilidade da combustão. Na maioria dos projetos de caldeiras, o ar primário deve ser entregue de maneira uniforme para criar simetria. O fluxo de ar primário tem um efeito menor sobre a combustão da fornalha do que outros níveis de ar. Com o ar primário pode-se manter o *smelt* longe das paredes, aumentando-se a queima nas extremidades da mesma. A área efetiva que o ar primário normalmente abrange é de até cerca de um metro das paredes. Os bocais de injeção de ar primário ficam igualmente espaçados em relação às paredes. Maior espaçamento requer pressão de ar primário mais alta. Espaçamento lateral de até 650 mm já foi usado com sucesso. Nos cantos da fornalha, espaçamentos entre 300 e 700 mm é empregado. Assim é possível evitar o acúmulo de licor negro nos cantos. Os bocais são angulados de 10 a 45° na direção inferior, para evitar que o *smelt* flua até as entradas de ar. Outros projetos mantêm os bocais o mais próximo da horizontal possível.

Além disso, de CBC Indústrias Pesadas S.A. (1985), a função do ar primário é oxidar parcialmente os materiais orgânicos e fornecer calor para redução e fundição dos produtos químicos no leito e formar a inclinação da camada. Sua vazão é controlada através do registro de entrada do ventilador de ar forçado primário. As pressões são reguladas pelos registros individuais, localizados na caixa de ar primário. A vazão total do ar primário é medida através de um medidor de vazão.

2.5.1.2 Ar Secundário

Segundo Vakkilainen (2005), ar secundário é introduzido logo acima do leito para manter a temperatura desejada na fornalha inferior. Controlando-se esta temperatura, baixas emissões e alta eficiência de redução podem ser mantidas. Quando se utiliza alto teor de sólido seco, o desafio está em se manter o *smelt* a uma altura suficiente, não em mantê-la aquecida. Com um projeto bem feito, a combustão deve ocorrer na parte mais inferior da fornalha, evitando-se os problemas de *carryover*, partículas não queimadas do combustível, que levam a maiores índices de incrustações. Esse perfil de temperatura melhorado, com menor variação de temperatura na saída da fornalha, reduz a incrustação em superfícies de troca de calor e o risco de corrosão dos superaquecedores. Combustão estável da fornalha inferior requer mistura eficiente de jatos de alta velocidade. Assim, *dampers* ajustáveis e controle de fluxo preciso permitem operação a níveis de baixa carga. O maior propósito desse nível de ar é de queimar gases ascendentes do leito. Essa queima irradia calor de volta para o *smelt*, o que mantém a alta temperatura do mesmo. Além disso, o ar secundário impede o crescimento em excesso do leito, que poderia causar obstruções no ar primário. Combustão completa significa que a mistura de combustível e ar deve ocorrer de maneira efetiva e rápida, acima de toda a camada do leito. Um arranjo melhorado da distribuição de ar secundário pode diminuir o *carryover*, a temperatura de saída, as emissões de gases e aumentar a temperatura empregada. As aberturas começam entre 0,5 e 2 metros dos cantos e o espaçamento entre elas varia até 2,5 metros.

O nível de ar secundário tem o maior efeito sobre a operação e controle da fornalha, por isso algumas caldeiras, ao passar por projetos de melhorias, apenas fazem mudanças no sistema de ar secundário. Dessa forma, consegue-se atingir grandes aumentos de produção, como já foi feito em 2002 na caldeira CBC 3, segundo CBC Indústrias Pesadas S.A. (2002), sem a necessidade de reformar várias outras partes da caldeira, economizando no custo do projeto de melhoria.

De acordo com CBC Indústrias Pesadas S.A. (1985), na CBC 3 o ar secundário é introduzido horizontalmente através de dez aberturas localizadas cinco em cada parede lateral, aproximadamente a 1,23 metros acima das aberturas para ar primário. Sua função é de controlar a altura do leito, isto é, manter adequado o formato e controlar a temperatura de combustão. O leito tem a configuração de um tronco de pirâmide que é formado ajustando-se principalmente o ar secundário. Caso o leito seja mantido muito baixo, o fundido fica exposto ao ar e apresenta uma baixa redução resultante. Do contrário, um leito alto pode cobrir as entradas de ar primário, apagando o fogo. De maneira similar ao ar primário, a quantidade total de ar secundário é controlada pelo registro de entrada dos ventiladores de ar forçado secundário. A pressão é regulada pelos registros individuais, localizados nas caixas individuais. Sua vazão total também é medida através do medidor de vazão. Os teores de CO_2 e O_2 devem ser ajustados através de injeção de ar secundário, pois eles influenciam a eficiência de combustão do licor.

2.5.1.3 Ar Terciário

Vakkilainen (2005) explica que o ar terciário queima o combustível restante que se eleva da seção inferior da fornalha. Sua região efetiva se estende até o centro da fornalha. Isso é facilmente realizado, pois o ar não é aquecido e pode ser introduzido a maiores velocidades. As entradas de ar terciário se localizam normalmente nas paredes frontal e traseira. Espaçamento máximo entre bocais pode chegar a até 3,5 metros. O número de entradas de ar não precisa ser idêntico, diferente do ar secundário e primário. É comum colocar um bocal a mais na parede frontal, fazendo com que o fluxo ascendente seja forçado até a região traseira, fazendo com que o nariz funcione da melhor maneira possível. Quanto maior a caldeira, maior a quantidade de bocais terciários.

CBC Indústrias Pesadas S.A. (1985) explica que, na CBC 3 o ar terciário é introduzido horizontalmente através de aberturas localizadas nas paredes frontal e traseira, aproximadamente 2,0 metros acima das aberturas para lanças de licor negro. Ele é necessário por efetuar uma cortina de ar, que bloqueia o arreste de cinzas e não queimados. Ele também completa a queima de licor na parte superior da fornalha. Os combustíveis não queimados procedentes da atmosfera redutora entram na zona de ar terciário, onde são carregados pelo fluxo turbulento, que promove a sua mistura com o ar e completa a combustão. Se ele for introduzido com baixa velocidade na fornalha, não haverá boa mistura e penetração. Assim, deve ser introduzido com velocidade razoavelmente alta, regulando-se os registros.

2.5.2 Sistema de gases de combustão

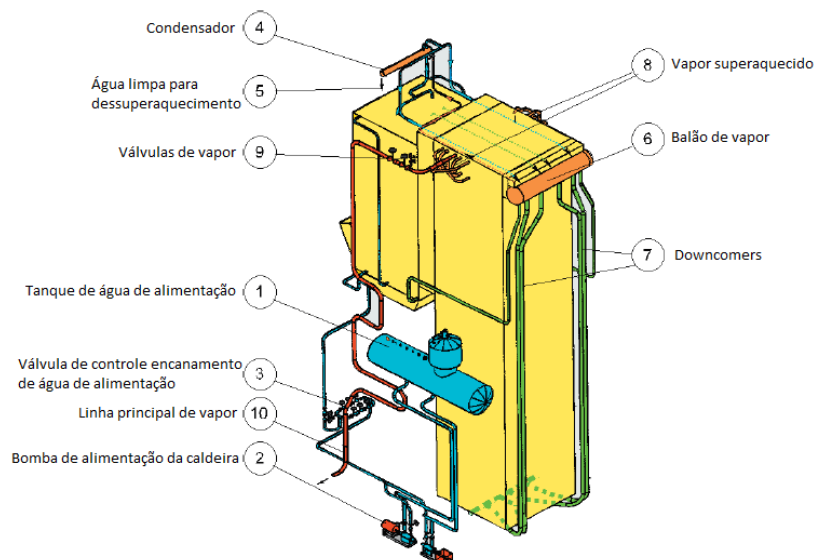
Para Vakkilainen (2005), o sistema de gases de combustão transporta material queimado da fornalha até a atmosfera de maneira segura. Os gases passam da fornalha pelas superfícies dos trocadores de calor. Os gases fluem por dutos e através de ventiladores até o precipitador eletrostático. A vazão natural dos gases não é o suficiente para a saída de todo o gás, então uma vazão induzida por ventiladores é aplicada. Essa vazão também controla a passagem de gases através da fornalha e a pressão dela no nível dos injetores de licor deve ser mantida abaixo da pressão da fornalha. O precipitador eletrostático e outros equipamentos de redução de emissões são empregados para diminuir a poluição, pois separam as cinzas do gás de combustão.

2.5.3 Água e vapor

A circulação de água e vapor na caldeira começa com água de alimentação de baixa pressão e termina com vapor de alta pressão e temperatura. Os sistemas de circulação transportam, pressurizam, pré-aquecem, vaporizam e superaquecem a água até formar o vapor nas condições desejadas.

A Figura 8 representa um sistema de água e vapor em caldeiras de tubulão único.

Figura 9 - Sistema de circulação de água



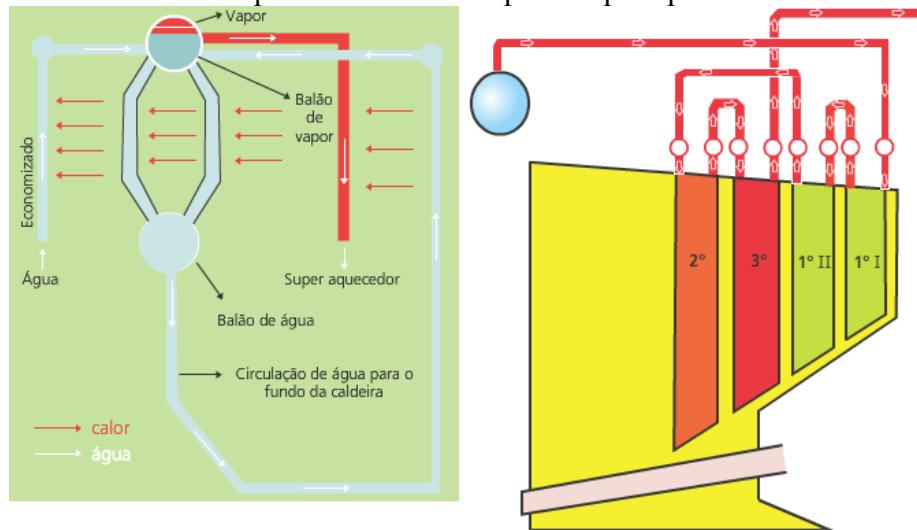
Fonte: Vakkilainen (2005)

Vakkilainen (2005) explica que, para uma operação confiável da caldeira, a água de alimentação deve ter baixo teor de oxigênio e minerais. O sistema de água de alimentação consiste de um tanque de alimentação, desaerador, bomba de água de alimentação para caldeira, válvulas de controle e o sistema de tubulações. A água de alimentação é introduzida primeiramente no economizador, que recupera calor dos gases de combustão e o utiliza para pré-aquecer a água até uma temperatura próxima da ebulição. As superfícies internas de caldeiras de recuperação ficam facilmente incrustadas, então o fluxo dos gases utilizado costuma ser na vertical, de preferência em sentido contrário ao da passagem da água. A água do economizador é utilizada para gerar arrefecimento ou dessuperaquecimento do vapor. A água então flui para o tubulão de vapor, onde água e vapor são separados por gravitação, ciclones separadores e *screens*. *Downcomers*, que nada mais são do que tubulações descendentes, levam água saturada até as superfícies evaporativas.

Em seguida, água parcialmente evaporada é coletada até o tubulão de vapor. De acordo com Vakkilainen (2005), as paredes da fornalha fazem a maior parte da evaporação, que pode variar entre 10 e 25% da evaporação total, dependendo da pressão de operação. Vapor saturado deixa o tubulão de vapor e flui até os superaquecedores, cujo objetivo é aquecer o vapor bem acima da temperatura de saturação. Como turbinas só operam com no mínimo um conteúdo de vapor de 95%, a utilização correta de pressão e temperatura deve ser respeitada. Válvulas são utilizadas para controle de vazão do vapor, fazendo-o fluir pelas linhas principais de vapor até a turbina. Água de alimentação ou vapor condensado são utilizados para o controle da temperatura de vapor superaquecido. Um sistema emergencial de drenagem é instalado para evitar acidentes de explosões pelo contato do *smelt* com água. A drenagem utiliza linhas separadas das paredes da fornalha, de partes da caldeira e do economizador. Água é mantida na parte inferior da fornalha para o arrefecimento da tubulação do piso. Caso toda a água nessa região seja drenada, danos à tubulação podem ocorrer. A circulação de água ocorre através de diferenças de densidade entre as superfícies de aquecimento preenchidas por vapor e os *downcomers* cheios de água. No entanto, a circulação é limitada por perdas de atrito em diversas regiões. Aumento de pressão de operação da caldeira diminui a diferença de densidade e altas pressões requerem utilização de bombas para alcançar uma circulação eficiente.

A Figura 9 mostra de maneira simples como ocorre a circulação de água e vapor desde o gerador de vapor até os superaquecedores.

Figura 10 - Gerador de vapor com tubulão duplo e superaquecedores



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2

Caldeiras que já passaram por um projeto de aumento de capacidade como a CBC 3 podem apresentar dificuldades de circulação por apresentar vapor sendo formado ainda nas tubulações antes de alcançar o tubulão de vapor. Isso limita a operação da caldeira, enquanto essa dificuldade de circulação não for contornada.

2.5.4 Licor negro e cinzas

Vakkilainen (2005) explica que o licor negro é bombeado do tanque de licor negro concentrado e passa por uma tubulação que faz a injeção do mesmo para a fornalha. A função dessa tubulação é de garantir uma vazão igual para todos os injetores. Em alguns casos, as cinzas do precipitador são misturadas ao licor de teor sólido de aproximadamente 50% e enviadas ao sistema de evaporação. Esse sistema de recuperação de cinzas ajuda na operação com alto teor seco. O sistema de licor deve fazer medições de vazão, temperatura e pressão. Para o controle de temperatura utiliza-se um aquecedor de licor, que pode ser feito diretamente com vapor ou indiretamente com trocadores de calor. O sistema deve ser realizado com diversas recomendações padronizadas e de segurança, para evitar falhas no sistema e riscos de incêndio e explosão interna ou externamente. As cinzas necessitam de sistemas de transporte por roscas ou outros sistemas e seu fluxo é controlado com alimentadores rotativos. Elas podem ser manipuladas em estado seco ou diluídas

De acordo com o CBC Indústrias Pesadas S.A. (1985), o sistema de injeção de licor negro apresenta seis bicos de injeção de licor para a fornalha. A pressão de injeção varia de

$0,6 \times 10^7$ a $1,0 \times 10^7$ kgf/m²kg e temperatura de aproximadamente 125°C. As lanças e o bico são fabricados em AISI-316L ou equivalente.

2.5.5 Óleo e gás

De acordo com Vakkilainen (2005), sistemas utilizados para os procedimentos de partida e parada podem utilizar um ou mais combustíveis. Cada combustível utilizado requer seu próprio sistema fechado. Sistemas de óleo possuem sistemas de segurança internos. Cada queimador precisa de um monitoramento de chama próprio. Arranjos com válvulas duplas podem ser utilizados para garantir o fechamento da linha de óleo. Para óleo combustível pesado, é preciso diminuir sua viscosidade através de aquecedores. Para garantir atomização suficiente, ar pressurizado ou vapor são utilizados. Caso gás natural seja utilizado como combustível, um sistema de ventilação é utilizado para impossibilitar vazamentos de gás para a fornalha. A utilização de gás natural é mais interessante para os operadores da caldeira por apresentar um tempo de resposta maior durante a queima do que o óleo.

2.5.6 Licor verde

Como explicado anteriormente, licor verde é formado através da mistura de *smelt* e licor branco fraco no tanque dissolvedor. De acordo com Vakkilainen (2005), misturar matéria inorgânica fundida em água gera calor. Esse calor deixa o tanque em forma de vapor, que pode carregar partículas de licor. Para evitar formação de grande volume de gases, cinzas são utilizadas em mistura com líquido alcalino. O *smelt* que deixa a caldeira é resfriado por água a 60 °C que circula pelo sistema. Esse sistema, apesar de não muito complexo, requer grande cuidado para evitar o aprisionamento dos gases formados, levando ao aumento de pressão interna do tanque dissolvedor.

2.5.7 Equipamentos auxiliares

Existem diversos sistemas auxiliares empregados nas caldeiras de recuperação. Sistemas de limpeza de bocais dos níveis de entrada de ar, pirômetros para medição de temperatura, ventilação de ar, pré-aquecedor de vapor, entre outros.

Vakkilainen (2005) explica que o precipitador eletrostático é um sistema auxiliar de grande importância. Gases de combustão carregando cinzas fluem por superfícies coletoras.

Fios suspensos sobre superfícies onde as cinzas se acumulam são carregados negativamente (eletrodos), enquanto que as superfícies são carregadas positivamente (cátodos). Assim, as cinzas ficam eletricamente carregadas, sendo atraídas pelas superfícies onde acabam se depositando. O tanque de mistura recebe cinzas do precipitador eletrostático, dos economizadores e da caldeira, misturando-as com licor negro com teor entre 50 e 65%. As cinzas de caldeiras de recuperação são ricas em químicos reutilizáveis, principalmente sulfato de sódio. Entre 5 e 12% do fluxo de teor seco do licor negro está nas cinzas. Maiores fluxos de cinzas correspondem a maiores teores secos do licor. O licor negro do tanque de mistura era reenviado para a caldeira em sistemas antigos. Hoje, ele é enviado primeiramente para a evaporação para não enviar licor de baixo teor seco ao sistema. A mistura deve ser feita seguindo parâmetros exatos, pois se a quantidade de teor seco dentro do tanque for maior ou menor que a recomendada, pode-se ter problemas de dificuldade de retirada de licor do misturador ou problemas de incrustação na evaporação. A mistura de cinzas com licor ocorre a uma temperatura considerável, gerando formação de gases não condensáveis que devem ser retirados do tanque de maneira apropriada. A temperatura de operação do tanque de mistura é de aproximadamente 115°C e todas as suas superfícies são insuladas para evitar condensação e entupimento.

3 DADOS E INFORMAÇÕES COLETADAS

Nesta seção serão disponibilizados os dados considerados relevantes para o entendimento da situação atual da caldeira de recuperação, assim como as comparações com os dados da proposta técnica de 1985 e os dados referentes à reforma realizada em 2002. O intuito da utilização de tais dados é a comparação das condições de operação da caldeira desde a sua implantação, até a sua operação nos dias de hoje, para se identificar quais sistemas podem estar deficientes ou suficientes para a produção que se deseja alcançar no futuro.

Os componentes e processos que limitam tal produção serão analisados para se decidir entre ações de manutenção necessárias, melhorias que podem ser aplicadas ou a possível troca de componentes e processos.

3.1 DADOS DO LICOR

Na Tabela 1 foram reunidas as informações mais importantes relacionadas à composição e à qualidade do licor produzido na unidade.

Tabela 1 – Composição e dados gerais do licor negro

Dados	Unidades	1985	2002	2016
Capacidade nominal de sólidos secos	tss/d	700	1.400	1.340
Concentração de sólidos secos	%	63	72	69,45
Poder calorífico superior (PCS)	kJ/kgss	14.200	14.400	12.900
Carbono	C	37,00	38,90	32,50
Hidrogênio	H	3,30	5,50	3,30
Enxofre	S	4,20	3,04	6,10
Oxigênio	O	36,00	32,26	34,16
Nitrogênio	N	18,70	-	0,09
Sódio e potássio	Na e K	0,80	18,90	23,00
Cloro	Cl	-	1,40	0,25
Boro	B	-	-	0,50
Inertes	-	-	-	0,10

Fonte: Produção do próprio autor, baseado em CBC (1985) e CBC (2002)

Onde as unidades tss/d e kJ/kgss correspondem a tonelada de sólido seco por dia e quilojoule por quilograma de sólido seco, respectivamente. A Tabela 1 foi redigida a partir da junção dos dados coletados dos prontuários da caldeira CBC 3 de CBC Indústrias Pesadas S.A. (1985) e CBC Indústrias Pesadas S.A. (2002), implantação e *upgrade*, respectivamente, além de incluir dados aproximados da caracterização atual do licor negro. Os dados atuais

foram obtidos a partir da análise da empresa fornecedora CBC que informou que o poder calorífico atual está mais próximo de 13.000 kJ/kgss. O poder calorífico superior, ou PCS, é menor do que anteriormente, pois com a instalação do novo sistema de cozimento em 2015, o digestor passou a operar com maior eficiência, produzindo um licor final de composição diferente do anterior e menor poder calorífico. Outro fator que pode ter alterado o PCS é a diferença de operação do digestor, que não extrai gases não-condensáveis como o anterior fazia. Mesmo assim, a composição do licor negro muito provavelmente não correspondia aos dados de projeto mesmo antes da implantação do novo digestor, pois historicamente sua produção nunca alcançou os patamares estipulados correspondentes ao PCS de 14.000 kJ/kgss.

Os valores de concentração e capacidade nominal do licor foram obtidos a partir das médias de operação atual (durante o ano de 2016) e os valores de composição são obtidos através do trabalho de Vakkilainen (2005) pois utilizando esses dados é possível simular a situação atual da CBC 3 mais fielmente do que com os parâmetros de projeto. Todos os valores calculados para a situação atual da caldeira irão se basear nessa premissa de composição e dados de operação da Tabela 1, uma vez que não foi possível realizar uma análise do licor até que o presente trabalho fosse terminado.

3.2 CONDIÇÕES DE OPERAÇÃO

Na Tabela 2 foram reunidas algumas das informações de entrada e saída gerais da caldeira. Dados como poder calorífico, que define a quantidade de energia retirada do licor através da queima, pressão de operação e temperaturas de alimentação e de saída do superaquecedor são muito importantes para os cálculos relacionados à eficiência de uma caldeira. Eles demonstram se a energia que está sendo gerada internamente, através da formação de vapor, está sendo efetivamente trocada no pré-aquecimento da água de alimentação e no superaquecimento e economizador. Com tais dados é possível definir se a caldeira é eficiente do ponto de vista térmico ou do ponto de vista da formação de vapor para processos.

Na fábrica analisada, a primeira preocupação está na geração de vapor para processos, pois entende-se que o primeiro cliente a ser atendido é a produção interna. Após os processos, toda a geração de energia realizada é utilizada para minimizar os gastos com a compra de energia da concessionária, assim, se for possível aliar a produção de vapor necessária à

unidade com uma eficiente geração de energia, a fábrica acaba se tornando muito mais competitiva no mercado, com custos de produção menores e alta qualidade de produção.

Tabela 2 – Principais informações de projeto e operação em 2016 da caldeira CBC 3

Dados	Unidades	1985	2002	2016
Capacidade nominal de sólidos secos	tss/d	700	1.400	1.340
Produção bruta de vapor	t/h	105,6	218,0	185,47
Pressão do vapor na saída do superaquecedor	MPa	5	5	4,71
Temperatura do vapor na saída do superaquecedor	°C	420	420	430,08
Temperatura da água na entrada do economizador	°C	120	120	118,40

Fonte: Produção do próprio autor, baseado em CBC (1985) e CBC (2002)

Assim como a Tabela 1, os dados de 2016 preenchidos na Tabela 2 se baseiam na premissa de utilização dos dados provenientes do trabalho de Vakkilainen (2005) e também da utilização da planilha fornecida em Vakkilainen (2006) para cálculo de produção de vapor, que se equipara com a produção real observada. Além disso, as informações de capacidade, pressão e temperatura foram obtidas através dos dados de operação de 2016. Deve-se enfatizar que a produção de vapor de 185,47 t/h calculada para 2016 é o valor que se espera obter com as informações de processos da caldeira; no entanto, a produção observada real é muito menor, e essa diferença será explicada no item abaixo, além de outras informações.

3.3 GARGALOS

Há diversos tipos de gargalos na CBC 3 que dificultam seu aumento de produção. Além de ser uma caldeira que já está em operação há aproximadamente 30 anos, ela já passou por uma grande operação de modernização em 2002 e dificilmente seria possível realizar outra renovação que não tivesse um custo alto para a empresa, tanto em capital de contratação de serviços e novos componentes quanto em tempo de parada para a realização da renovação. Além das dificuldades relacionadas às trocas de componentes após um *upgrade* que já dobrou sua capacidade, também é preciso considerar a idade avançada da caldeira, pois ao se aproximar dos 30 anos de operação, uma caldeira de recuperação necessita de trocas completas de sistemas internos.

A maior dificuldade a se considerar para qualquer atividade de aumento de produção da caldeira CBC 3 é o fato de ela já ter alcançado seu limite de circulação. Esse limite é relacionado com a temperatura e pressão de saturação da água que sobe pela tubulação da fornalha após sair do tubulão de água. A água nessa região está a aproximadamente 5 MPa e

250°C e está no limite de passagem para o estado gasoso. Se o limite é ultrapassado, vapor passa a circular nessa região, gerando erosão interna da tubulação, o que pode causar grandes problemas para o funcionamento da caldeira e se algum dos tubos for furado nessa situação, pode haver vazamento de água dentro da caldeira, levando a grandes problemas de segurança e até mesmo o perigo de explosão. Outra limitação que dificulta melhorias efetivas em caldeiras é a área de fornalha, pois torna-se difícil queimar quantidades cada vez maiores de licor para o aumento de produção desejado, sabendo-se que é preciso um controle apurado das condições do leito e do ar de combustão, principalmente primário e secundário, responsáveis por manter a forma e altura e também uma boa condição de redução no leito.

Além do limite de circulação, outro grande impacto na caldeira CBC 3 é a dificuldade atual com manutenção dos três precipitadores P5, P6 e P7. Como a temperatura de orvalho nos precipitadores é próxima de 140°C, deve-se manter a temperatura dos gases acima desse valor. Os valores médios mensais foram compilados na Tabela 3.

Tabela 3 – Temperaturas nos precipitadores da caldeira CBC 3

Data	Temperatura do gás de saída P5	Temperatura do gás de saída P6	Temperatura do gás de saída P7
	°C	°C	°C
jun/15	147,491	116,288	166,305
jul/15	152,516	116,716	162,884
ago/15	151,614	110,089	160,256
set/15	152,544	105,667	160,297
out/15	146,296	105,056	155,068
nov/15	142,740	100,522	142,054
dez/15	148,891	98,836	149,019
jan/16	151,632	91,408	150,439
fev/16	154,344	86,212	151,961
mar/16	148,662	89,694	151,145
abr/16	142,703	91,619	137,901
mai/16	132,684	80,371	136,244
jun/16	123,766	71,175	136,724
jul/16	133,954	79,366	133,081

Fonte: Produção do próprio autor

Analisando-se os parâmetros registrados entre junho de 2015 e julho de 2016 (período entre duas Paradas Gerais), percebe-se que cada precipitador está em uma condição diferente. Os precipitadores P5 e P7 passaram a operar a temperaturas abaixo de 140°C a partir de abril de 2016, sendo que entre junho e abril eles se mantinham acima de 140°C. Ainda mais preocupante é o P6, que vem operando com problemas durante todo o período analisado,

demonstrando o que ocorre em um precipitador quando não receber manutenção. O principal causador da deterioração do equipamento foi a infiltração de oxigênio por diversos furos que não receberam manutenção, fazendo com que a estrutura interna fosse afetada. O mal funcionamento dos precipitadores não afeta a produção diretamente, já que sua função é basicamente limpar os gases de combustão a caminho da chaminé, evitando altos níveis de emissões para a atmosfera. Ainda assim, com graves problemas nos precipitadores, torna-se necessário direcionar cada vez mais atenção para mantê-los em operação e isso custa caro. O tempo e capital gastos para a manutenção desses equipamentos acaba sendo significativo e poderia ser melhor utilizado de outras maneiras. Além disso, muitas vezes torna-se necessário reduzir a carga da caldeira, diminuindo sua produção, para que a quantidade de emissões não ultrapasse os limites estabelecidos.

Na Tabela 4 estão alguns dados relativos à concentração média do licor negro ao longo do ano, que assim como várias outras variáveis acabou diminuindo, principalmente a partir de março.

Tabela 4 – Concentração média mensal do licor negro

Data	Concentração média do licor negro
	%
jul/15	72,080
ago/15	71,586
set/15	70,935
out/15	71,927
nov/15	69,060
dez/15	70,715
jan/16	70,514
fev/16	70,431
mar/16	70,768
abr/16	68,560
mai/16	68,886
jun/16	68,907
jul/16	69,298
ago/16	70,375

Fonte: Produção do próprio autor

Observando os dados de concentração do licor negro, percebe-se que entre julho de 2015 e março de 2016 a concentração média mensal do licor se manteve acima de 70% na maior parte do tempo e a partir de março passou a valores abaixo de 70%. A concentração de licor é um fator importante na produção de uma caldeira. Injetar uma menor concentração de

licor significa injetar mais água na fornalha que irá absorver calor diminuindo a eficiência da caldeira. Para corrigir essa deficiência seria necessário atuar diretamente na evaporação, pois ela é a maior responsável por esse fator, logo nesse caso o gargalo está fora da caldeira propriamente dita.

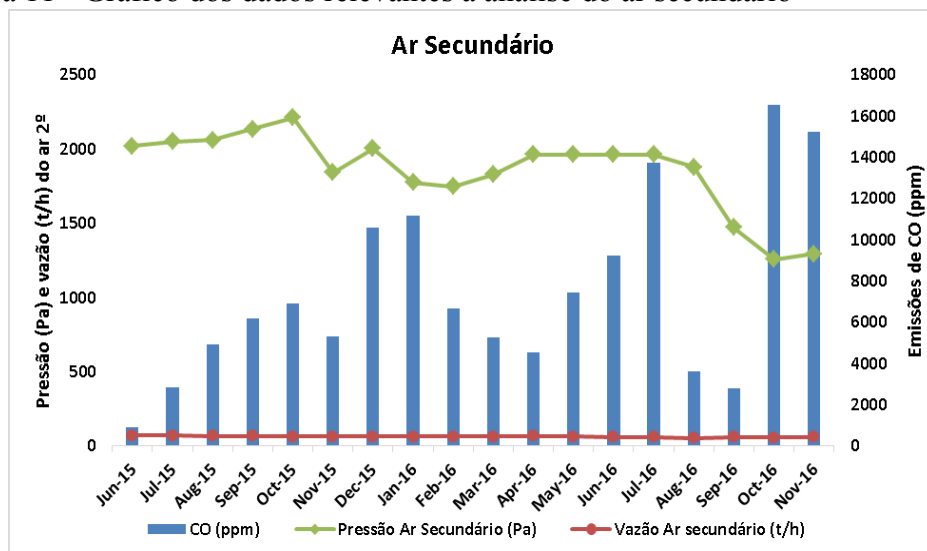
A partir de agosto de 2016, após o período de Parada Geral para manutenção, percebeu-se que os aquecedores do ar secundário estão obstruídos, possivelmente desde março de 2016. A sua obstrução causou perda de carga na tubulação, fazendo com que a pressão de injeção do ar secundário diminua. Essa pressão é responsável pela penetração do ar secundário dentro da fornalha, que deve realizar a combustão do licor e manter o leito em bom estado. Como isso não estava ocorrendo efetivamente, é possível que boa parte dos problemas de operação recentes da caldeira tenham influência desse fator. A Tabela 5 apresenta os parâmetros de processo do ar secundário e a Figura 10 ilustra esses dados em um gráfico.

Tabela 5 – Principais dados para análise do ar secundário

Data	Pressão do ar Secundário	CO na saída do Economizador	Vazão do ar secundário
	Pa	ppm	t/h
jun/15	2018.369	919,640	73,249
jul/15	2050.027	2845,361	71,494
ago/15	2061.145	4930,605	69,271
set/15	2132.416	6170,772	67,664
out/15	2210.612	6934,309	66,090
nov/15	1843.077	5329,403	64,685
dez/15	2001.788	10584,756	65,907
jan/16	1774.217	11171,600	66,573
fev/16	1746.48	6653,339	64,437
mar/16	1828.612	5265,669	66,600
abr/16	1961.33	4562,894	67,066
mai/16	1961.33	7466,231	65,181
jun/16	1961.33	9251,177	62,009
jul/16	1961.33	13745,281	61,713
ago/16	1878.634	3602,397	53,881
set/16	1470.998	2797,213	60,773
out/16	1255.839	16537,750	59,085
nov/16	1295.131	15216,726	62,421

Fonte: Produção do próprio autor

Figura 11 - Gráfico dos dados relevantes à análise do ar secundário



Fonte: Produção do próprio autor

Observando-se a Figura 10, a linha superior representa a pressão do ar secundário. Pode-se observar que entre março e setembro o valor de pressão se manteve constantemente em 1961,3 Pa, indicando que o sensor de pressão não estava funcionando corretamente e, para evitar problemas no sistema de *software* de controle da caldeira, teve seu valor congelado. Também pode-se perceber que após a Parada Geral, em agosto de 2016, os valores passaram a ser registrados. Esses valores estão muito abaixo da pressão de projeto e demonstram a necessidade de correção do sistema. A linha inferior indica a vazão de ar que, apesar de não diminuir significativamente, apresentou várias quedas ao se analisar os valores por hora e não apenas a média mensal. As barras representam as emissões de CO, em ppm, que aumentou significativamente com o passar do tempo. Os valores em agosto e setembro estão incorretos, pois contêm muitos dados fora da faixa normal. Como a pressão é muito menor do que a necessária, não há uma grande mistura dos gases, pois o ar injetado a baixa pressão não penetra como necessário, dificultando a combustão e levando a altos níveis de monóxido de carbono.

Por fim, com as dificuldades de operação recentes da CBC 3, a produção de vapor da caldeira também diminuiu, indo de valores acima de 160 t/h até valores próximos e abaixo de 140 t/h, como observado na Tabela 6. Cabe aqui ressaltar que a estimativa de produção da caldeira, de acordo com os dados de projeto de 2002, deveria ser maior do que 200 t/h.

Tabela 6 – Média mensal da produção de vapor da caldeira CBC 3

Data	Vapor Principal
	t/h
jun/15	160,035
jul/15	164,610
ago/15	160,347
set/15	161,882
out/15	159,224
nov/15	140,938
dez/15	152,773
jan/16	159,134
fev/16	157,920
mar/16	154,878
abr/16	140,806
mai/16	138,387
jun/16	132,463
jul/16	140,536

Fonte: Produção do próprio autor

Como foi comentado na seção 3.2 do presente trabalho, a geração de vapor estimada para a CBC 3 seria de 185,47 t/h, sendo que mesmo no início da produção pós-parada geral de 2015 praticamente não passava da média de 160 t/h. Os gargalos identificados na planta e na caldeira, como dificuldades de operação na evaporação, nos precipitadores e no sistema de ar secundário, são fatores que afetam muito a produção e eficiência da caldeira e devem ser corrigidos.

4 PROPOSTAS PARA AUMENTO DE EFICIÊNCIA

Após a análise dos dados históricos coletados, pode-se mais facilmente analisar quais as formas mais eficientes de atuar para o aumento de produção da caldeira. Como a caldeira de recuperação química realiza um dos processos mais importantes dentro da fábrica, não foi possível alterar sua operação para a obtenção de dados reais do aumento de eficiência esperado com as alterações aqui propostas, então serão utilizadas referências bibliográficas de pesquisas realizadas em diversas caldeiras para mostrar o que poderia ser alcançado na unidade estudada. Além disso, durante a realização desse trabalho, a maior parte dos gargalos identificados ainda não foram tratados, logo as melhorias buscadas não seriam possíveis até que a caldeira esteja em um melhor estado de operação.

4.1 MODIFICAÇÃO DE PARÂMETROS DE PROCESSO

Uma das modificações mais simples que pode ser feita para se conseguir melhorias de eficiência em uma caldeira é a alteração de dados de processo para se alcançar uma melhor condição de trabalho e produção para a caldeira. Mudanças de temperatura da água de alimentação, ar de combustão e licor negro, assim como formas de recuperar o calor dos gases de combustão são algumas das técnicas utilizadas para se aumentar a eficiência e produção de uma caldeira.

A Tabela 7 apresenta com alguns dos valores atuais (2016) e modificados pela proposta demonstrando o aumento de produção possível. Devido a dificuldades de obtenção de alguns dados importantes, especialmente de caracterização do licor negro que não foi realizada desde 2002 e muito provavelmente sofreu mudanças com a instalação do novo digestor em 2015, foi utilizada a planilha de Vakkilainen (2006) para a realização dos cálculos. Os valores na coluna de 2016 são valores de operação, com a composição estimada conforme o trabalho de Vakkilainen (2005) para as condições de 2016 e futura.

Tabela 7 – Dados estimados e calculados entre 2016 e produção futura

(continua)

Dados	Unidades	2016	Futuro
PCS licor	kJ/kgss	13.000	13.000
Carbono	%	32,50	32,50
Hidrogênio	%	3,30	3,30
Nitrogênio	%	0,09	0,09

Tabela 7 – Dados estimados e calculados entre 2016 e produção futura

(conclusão)

Dados	Unidades	2016	Futuro
Enxofre	%	6,10	6,10
Sódio	%	20,00	20,00
Patássio	%	3,00	3,00
Cloro	%	0,25	0,25
Boro	%	0,50	0,50
Oxigênio	%	34,16	34,16
Inertes	%	0,10	0,10
Concentração do licor	%	69	72
Redução de enxofre	%	90	90
Balanco de massa			
Ar	g/kgss	4.451,76	4.451,76
Licor negro	g/kgss	1.448,28	1387,89
Smelt	g/kgss	384,16	384,16
Gases de combustão	g/kgss	5.565,50	5.505,11
Temperaturas			
Licor Negro	°C	127	135
Ar para fornalha	°C	150	190
Gases de combustão	°C	147	147
Água de alimentação	°C	118	135
Balanco de calor			
Entrada	kJ/kgss	12.407,70	12.739,40
Perdas	kJ/kgss	3.312,10	3.305,80
Total	kJ/kgss	9.065,60	9.433,50
Eficiências			
Rendimento PCI		73,3	74,1
Rendimento PCS		63,9	65,5
Rendimento redução PCI		87,2	87,6
Rendimento efetivo		88,9	89,2
Geração de vapor			
Razão vapor / sólido seco	kg/kgss	3,26	3,50
Vapor total	t/h	184	198

Fonte: Produção do próprio autor, baseado em CBC (1985) e Vakkilainen (2006)

Na Tabela 7 foi mantida a composição do licor negro estimada de 2016 e a redução de enxofre em 90%, o único parâmetro alterado foi a concentração do licor, voltando ao valor de projeto e também decidiu-se aumentar a temperatura do licor negro injetado na fornalha de 127 °C para 135 °C. As temperaturas do ar de combustão injetado na fornalha pelos injetores de ar primário, secundário e terciário passariam de 150°C para 190°C e a água de alimentação de 118 °C para 135 °C. Esses parâmetros foram testados e oferecem um aumento razoável na eficiência da caldeira assim como sua produção de vapor, que deve aumentar para corresponder com o consumo em processo da fábrica. Além disso, foi possível realizar o

balanço de massa e de energia correspondente para as duas situações. Com a possibilidade de alteração do novo cozimento, espera-se que a composição e/ou PCS do licor negro possa sofrer alterações, podendo aumentar a produção de vapor final.

A maior dificuldade de realização das mudanças explicadas aqui seria a dificuldade relacionada ao limite de circulação da caldeira, no entanto, existe a possibilidade de utilização de um trocador de calor para que o vapor não se forme antes de alcançar o tubulão de vapor, evitando o problema de corrosão local dos tubos que chegam a ele. Além disso, considera-se que as manutenções necessárias para que a caldeira retorne às suas condições de projeto sejam realizadas previamente.

4.2 MODIFICAÇÃO DE PARTES DA CALDEIRA

Quando se fala em realizar um upgrade em uma caldeira, valores de investimento de maior ordem são necessários, o que por sua vez torna inviável tal procedimento. A troca de um equipamento, do material utilizado ou até a instalação de um sistema diferente do aplicado no momento são normalmente necessários. Caso se decida por um *retrofit* deve-se apenas recuperar um equipamento, restaurando-se sua capacidade de produção conforme o projeto original, um *upgrade* envolve valores maiores pois o investimento é realizado em novas tecnologias para sua modernização.

4.2.1 Aumento da área da fornalha

Para aumentar a produção da caldeira, é vital primeiramente o aumento da fornalha, pois a capacidade da caldeira é limitada pelas suas dimensões e pela capacidade de troca de calor com o sistema. Em 2016, a fornalha da caldeira CBC 3 tem dimensões de largura e profundidade de 8,0065 m e sua superfície de aquecimento efetiva é de 1834 m² com capacidade de 1400 tss/d. Para alcançar a capacidade de 1700 tss/d, a equação 1 foi utilizada:

$$\text{HHRR} = (m_{ss} \cdot \text{PCS}) / A \quad (1)$$

Onde, HHRR (kW/m²) é a taxa de calor liberado, m_{ss} (kg/h) corresponde à vazão de sólidos secos, PCS (kJ/kgss) está relacionado com o poder calorífico superior e A (m²) é a área da fornalha.

De acordo com Green e Hough (1992), HHRR deve ser um valor entre 2522 kW/m² e 2837 kW/m², apesar de muitas caldeiras operarem em 3468 kW/m². Valores de HHRR abaixo da faixa apresentam dificuldade de controle da temperatura do leito, levando a baixos valores

de eficiência de redução, instabilidade do controle do leito e altos índices de TRS (teor residual de enxofre) e SO_2 . Acima da faixa, a caldeira passa a apresentar flexibilidade de aumento de capacidade futura limitada. É por essa razão que algumas caldeiras apresentam valores maiores, por já terem passado por *retrofit* ou *upgrade* com trocas de tecnologias para aumento de capacidade no passado. Na CBC 3, o HHRR atual é de aproximadamente 3285 kW/m². Utilizando-se os valores projetados para 1700 tss/d e diminuindo-se o HHRR para aproximadamente 3152 kW/m², necessita-se de uma fornalha de lado 9004,69 mm, levando a um aumento de 998,19 mm em sua largura e profundidade.

Utilizando-se a capacidade da caldeira e a razão vapor / sólido seco obtida da Tabela 7, pode-se estimar a quantidade de vapor produzido com o aumento de capacidade da caldeira. Assim, com a nova capacidade de queima da caldeira de 1700 tss/d, considerando-se a razão de vapor / sólido seco atual de 3,26, pode-se produzir aproximadamente 230,92 t/h de vapor. Caso as modificações de parâmetros propostas anteriormente também sejam aplicadas e seja considerada a razão de 3,50, será possível produzir até 247,92 t/h.

Essas escolhas foram feitas, pois para se diminuir o HHRR para valores próximos de 2837 kW/m², ou seja, dentro da faixa recomendada, seria necessária uma modificação maior da área da caldeira, podendo chegar a dimensões de 10 metros em cada lado. Observando-se o espaço disponível para aumento de área da fornalha, é possível aumentar aproximadamente um metro em suas dimensões, mas não mais do que isso.

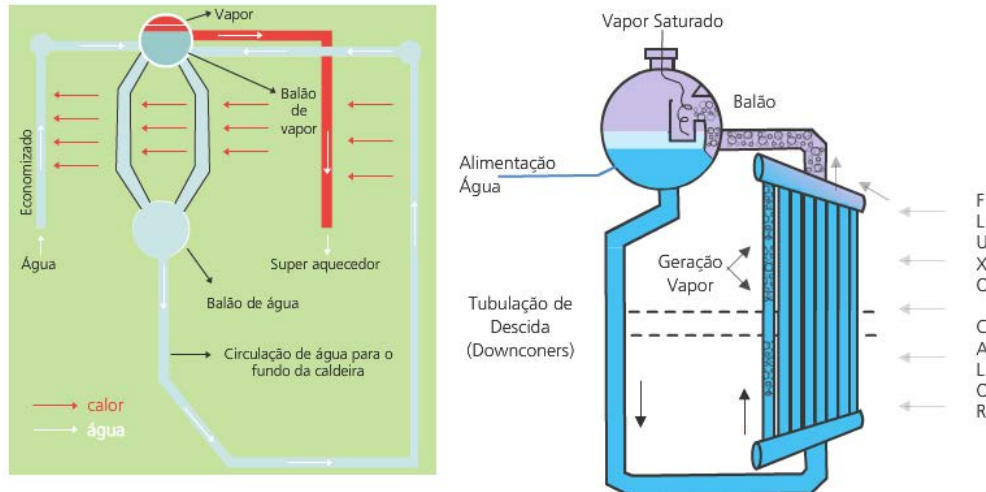
4.2.2 Modificação do tubulão de vapor – Single drum

De acordo com Vakkilainen et al. (2014), a primeira caldeira moderna com um único tubulão de vapor foi entregue em 1984 pela Götaverken para a Leaf River em Hattiesburg, Mississippi. A caldeira possuía capacidade para 1966 tss/d. Em 1990, todos os fabricantes passaram a fornecer caldeiras com tubulão único. Também de acordo com Vakkilainen (2005), há várias vantagens na utilização de um único tubulão de vapor. O sistema acaba eliminando o perigo de vazamento de água para a fornalha por ser posicionado do lado de fora da caldeira. Além disso, o ele possui uma menor quantidade de furos em sua parede, assim podendo ser fabricado com menor espessura, fato este que torna o *start-up* e o *stop-down* (operações para se ligar e desligar a caldeira) mais rápidos. A vazão de gás para o banco gerador torna-se mais suave e o arranjo das superfícies de aquecimento mais simples. A circulação de água por tubos *downcomers* separados e não aquecidos se torna mais regular. Além dos itens anteriores, a maior vantagem é que com tubulão único, ele pode ser construído

com maiores dimensões (com capacidade máxima de 2300 tss/dia em 2016), diminuindo as incrustações comuns em caldeiras com tubulão duplo e problemas com vibração.

A Figura 11 compara o sistema utilizado com tubulão duplo e único.

Figura 12 - Geradores de vapor de tubulão duplo e único



Fonte: Treino E-Suzano Recuperação 2 (2016)

Apesar de sozinha essa modificação não garantir aumento de produção para a caldeira, a possibilidade de aumento de capacidade em toneladas de sólidos secos por dia acaba tornando a alteração uma opção bastante oportuna, ajudando a aumentar a disponibilidade da caldeira e diminuindo problemas de operação com incrustações. Ao analisar a caldeira CBC 3 para obtenção de dados do que seria necessário para a realização de uma alteração desse tipo, percebeu-se que a solução, apesar de trazer muitas vantagens, apresenta alto custo e grande dificuldade de implantação. Por ser uma caldeira do tipo “suportada pelo topo”, seria necessário manter a caldeira em equilíbrio por outros meios. A troca do banco de geração torna necessário um serviço de mão-de-obra trabalhoso para desmontar o sistema de tubulão duplo e montar o novo sistema. Além da realização da troca em si, será necessário interligar o novo sistema e mantê-lo balanceado de tal modo que não exista qualquer exigência excessiva onde a estrutura pode não suportar. Como o sistema de pressão de uma caldeira representa a maior parte do custo da mesma, uma operação desse tipo se torna inviável, quando comparada com a compra de uma caldeira nova e mais eficiente.

4.2.3 Modificação do sistema de ar

Algumas das principais funções do ar primário são manter a temperatura e forma do leito, mas ele também deve atuar de tal maneira que não afete negativamente a combustão das partículas de licor sendo injetadas nem o ar secundário. De MacCallum (2013), algumas pesquisas foram realizadas em diversas caldeiras, principalmente a realizada pela Boiler Island Air Systems Inc. em um período de 15 anos, para mostrar as vantagens e desvantagens de se trabalhar com uma configuração de ar primário diferente. De MacCallum (2013), a modificação aqui proposta é a técnica de ar primário injetado por duas paredes opostas, ao invés do sistema atual que o aplica nas quatro paredes. Uma das vantagens dessa técnica é sua capacidade de ser aplicada em qualquer caldeira de recuperação em que o ar primário é injetado com uma angulação pequena em relação à horizontal, podendo também ser aplicada aos casos com maiores angulações se for possível fazer uma inserção no bico modificando sua angulação ou em casos de reconstrução da região inferior da fornalha.

Algumas das dificuldades de operação da caldeira são: excesso de *carryover* e/ou fumaça, leito da fornalha alto e baixo controle do mesmo; alto índice de excesso de ar e eficiência térmica baixa; alto teor de enxofre residual (TRS) e altas emissões de SO₂ e CO. São problemas que comumente são considerados caros para serem resolvidos, mas podem ser regulados com um controle de ar primário eficiente. O *carryover* pode ser evitado controlando-se o efeito chaminé dos gases de combustão, as dificuldades de controle do leito e sua altura são devido a baixas temperaturas do licor, assim como a baixa combustão no leito, excesso de ar é resultado de baixa mistura de gases e as emissões de SO₂, CO e o TRS são devidos à baixa temperatura do leito.

Ao se aplicar ar primário em paredes opostas, pode-se aplicá-lo a pressões de 1961,3 até 2451,7 Pa. Assim o jato de ar penetra melhor na fornalha e não é levado com facilidade pela corrente dos gases de combustão, diminuindo o *carryover*. Após testes realizados em algumas caldeiras, foi reportado que a temperatura da fornalha inferior aumentou entre 50 e 160 °C, quando comparada aos sistemas convencionais de ar primário nas quatro paredes. De acordo com MacCallum (2013), o ar primário injetado no sistema de paredes opostas aumenta a capacidade de mistura dos gases por possuírem maior momento em relação ao jato convencional. Isso leva a uma combustão mais intensa e a uma maior temperatura no leito.

O aumento da temperatura gera diversos benefícios, tais como: aumento de capacidade da caldeira, diminuição da geração de odor (baixo TRS), aumento de eficiência térmica, maior eficiência de recuperação no *smelt*, reduzida produção de *dregs*, que são rejeitos da operação

de lavagem de lama no forno de cal, entre outros. A diminuição do efeito chaminé dos gases de combustão permite que mais partículas de licor sejam queimadas no leito, fazendo com que o CO seja queimado antes de atingir o nível de ar secundário, tornando este mais efetivo.

A implementação dessa tecnologia não apresenta grande dificuldade, necessitando de uma forma de bloqueio dos bicos de injeção de ar de duas paredes, evitando que o *smelt* vaze. Além do bloqueio, é interessante que a região receba algum material refratário. De acordo com MacCallum (2015), o investimento necessário possui um *payback*, ou retorno do investimento, previsto em seis meses e um aumento de cerca de 2 a 3% na eficiência da redução pode economizar entre 300 e 400 mil dólares ao ano em uma caldeira de capacidade de 1000 t/dia.

4.2.4 Aumento dos sólidos secos do licor negro

O aumento de sólidos secos é uma das melhorias mais buscadas ao se procurar aumentar a eficiência e produção de uma caldeira de recuperação. Isso ocorre pois, ao se aumentar a porcentagem de sólidos secos do combustível, uma quantidade menor do calor gerado torna-se necessária para a etapa de secagem da água presente no combustível. Assim, maior a quantidade de calor aproveitado para geração de vapor final. Além disso, esse aumento também faz com que a vazão de gases de combustão diminua. Na realidade, o aumento de produção de vapor ocorre por haver um aumento na eficiência de geração de vapor. Como há menor quantidade de água no licor, torna-se mais fácil realizar o pré-aquecimento do mesmo. Além dos benefícios relacionados com a eficiência energética, outras mudanças no processo da caldeira ocorreram com o avanço das tecnologias de queima de sólidos secos. Por exemplo, segundo Vakkilainen et al. (2014), a fornalha e a operação dos gases de combustão foram modificadas drasticamente. Os sistemas de injeção de licor e o controle do leito também ficaram mais fáceis dessa maneira.

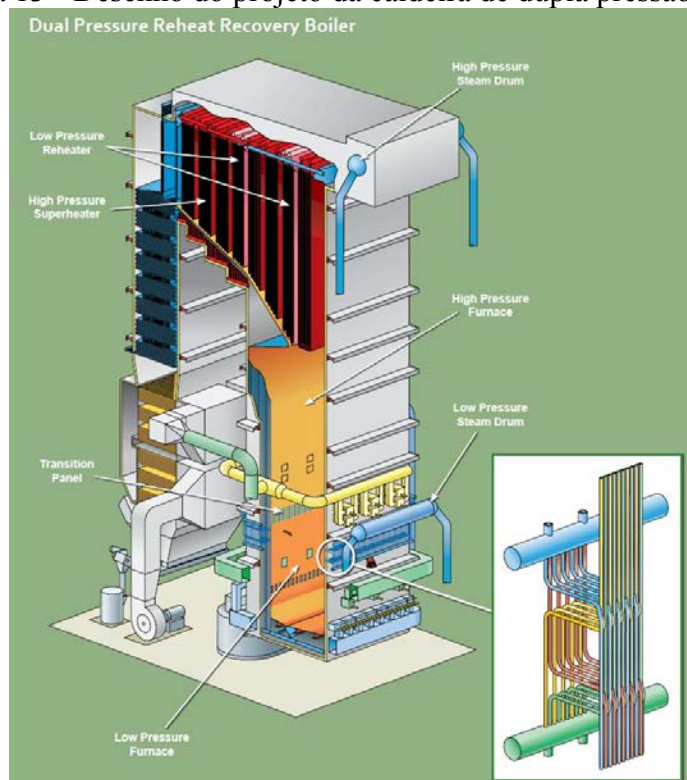
De acordo com Vakkilainen (2005), ao se trabalhar com maiores concentrações de sólidos secos mantém-se no balanço de massa o fluxo de ar de combustão e o fluxo de licor. Como uma quantidade menor de água é injetada junto do licor na fornalha, o fluxo de gases de combustão também irá diminuir. O fluxo de *smelt* se mantém e assume-se que essa alteração sozinha não irá alterar o grau de redução, apesar da maior vazão de vapor gerada, o vapor utilizado nos sopradores não se altera.

4.3 CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO QUÍMICA COM DUPLA PRESSÃO

Essa é uma tecnologia relativamente nova, criada pela *Babcock & Wilcox* e apresenta grandes benefícios e avanços relacionados à operação de caldeiras. Ela é descrita em Hicks, Stirgwolt e Monacelli (2009). A dificuldade de provar sua efetividade dá-se pelo fato de, por enquanto, só ter sido aplicada em caldeiras de força, apesar de todo o projeto já ter sido preparado para caldeiras de recuperação química e, por ser uma inovação recente do modelo já conhecido de caldeiras de recuperação, ainda há alguma resistência em sua aplicação.

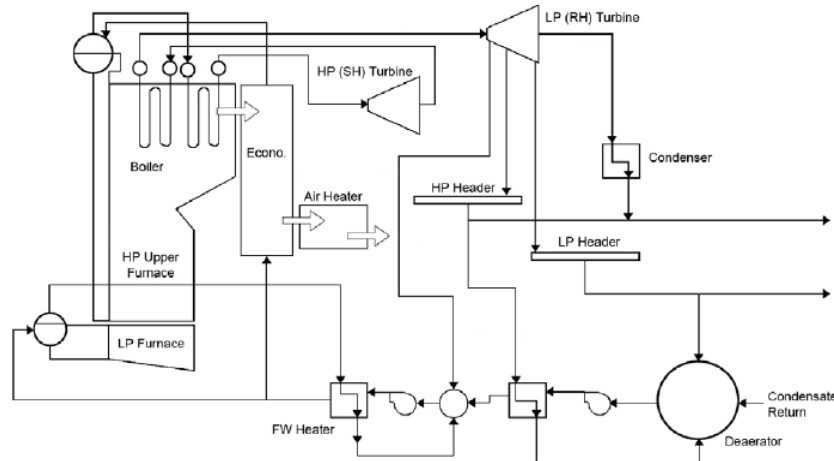
A Figura 12 representa esse tipo de caldeira com ciclo de reaquecimento, mostrando o painel de separação entre a fornalha inferior e superior. A Figura 13 apresenta o diagrama do ciclo de reaquecimento utilizado nesse modelo de caldeira.

Figura 13 - Desenho do projeto da caldeira de dupla pressão



Fonte: Babcock & Wilcox Enterprises (2009)

Figura 14 - Diagrama da configuração do ciclo de reaquecimento



Fonte: Hicks, Stirgwolt e Monacelli (2009)

A motivação para o desenvolvimento desse tipo de aplicação foi a capacidade de aproveitar a grande capacidade de geração de energia elétrica com os ciclos de vapor de fábricas de celulose. Partindo-se da premissa de alto custo de energia elétrica para a maioria dos países e a necessidade cada vez maior de utilização de energia renovável, a geração de energia em uma fábrica de papel e celulose deve suprir ao máximo as necessidades de processo (vapor) e energia (eletricidade), minimizando-se a compra de energia da concessionária.

Na unidade analisada, a CBC 3, que opera a 5 MPa e 420°C, está em uma condição de trabalho relativamente baixa. Por ter sido instalada em 1987, ela já não suporta operação em condições aceitáveis por muito tempo, sendo necessário realizar um *retrofit*, *upgrade* ou instalação de nova caldeira. Como a unidade estudada tem o objetivo de aumentar sua produção de celulose, será necessário aumentar a capacidade das caldeiras de recuperação ou substituí-las. Atualmente já é necessário comprar aproximadamente 67% da energia utilizada pela unidade, no futuro a energia comprada será ainda maior. Um dos fatores que serão necessários para levar ao aumento de produção de vapor para processo e suprir as necessidades de energia das máquinas seria a operação em maiores pressões e temperaturas, aumentando-se a capacidade de queima da caldeira para se gerar mais vapor. Tendo maior quantidade de vapor torna-se interessante gerar mais energia para se tornar menos dependente da concessionária.

De acordo com Hicks, Stirgwolt e Monacelli (2009), para suprir as necessidades de vapor e energia, algumas fábricas utilizam caldeiras que funcionam à pressão de 10 MPa e temperatura de 500 °C, muitas vezes com alta capacidade de queima de sólidos secos. Uma das maiores dificuldades em construir caldeiras que operem nessas condições é a necessidade de utilizar materiais mais avançados para suportar as condições de trabalho da fornalha e evitando problemas de corrosão que poderiam interferir no tempo de disponibilidade da caldeira. Nessas condições, a tecnologia patenteada pela *Babcock & Wilcox* em Hicks, Stirgwolt e Monacelli (2009) se torna interessante. O sistema utiliza dupla pressão que separa a fornalha em duas regiões, a inferior que trabalha a baixa pressão, evitando a utilização de materiais muito avançados e caros e a superior que atua a altas pressões e temperaturas e utiliza o sistema de reaquecimento para a geração de energia mais eficiente.

A fornalha é limitada de acordo com o material utilizado, e suporta pressões e temperaturas até um certo limite, a partir do qual o nível de corrosão torna a operação da caldeira insegura. A Figura 14 mostra o ponto em que o aumento de pressão de trabalho da caldeira leva a altos índices de corrosão, necessitando materiais mais nobres para a fabricação da caldeira, no lugar do aço carbono. O eixo vertical representa a perda de metal em milímetros ao ano e o eixo horizontal representa a pressão em libras por polegada quadrada.

Figura 15 - Ponto onde a corrosão passa a ser crítica



Fonte: Hicks, Stirgwolt e Monacelli (2009)

Observa-se que a partir da pressão de 6,2 MPa o nível de corrosão se torna muito alto e o sistema convencional de reaquecimento se torna ineficaz. A divisão da fornalha em duas regiões, mantendo a região inferior a uma pressão abaixo de 6,2 MPa permite que seja possível utilizar aço carbono e controlar a corrosão com mais facilidade. Já a região superior da fornalha pode ser mantida a pressões necessárias para o ciclo com reaquecimento. Para

uma boa eficiência do ciclo, utiliza-se o vapor de baixa pressão da fornalha inferior para aquecimento da água de alimentação, convertendo sua energia em vapor de alta pressão para utilizar na turbina a vapor com gerador elétrico acoplado ao eixo para vapor de alta pressão superaquecido. A grande quantidade de aquecimento à baixa pressão da água de alimentação demanda o uso de aquecedores de ar para manter a temperatura de saída dos gases baixa e manter uma boa eficiência da caldeira. Por apresentar temperatura mais baixa no lado ar do aquecedor do que a temperatura tradicional da água de alimentação, torna-se possível alcançar menores temperaturas do gás de combustão de saída, aumentando-se a eficiência da caldeira. Esse sistema também permite que o vapor de baixa pressão não seja necessário para aquecimento do ar, sendo utilizado apenas na água de alimentação. Além de melhor eficiência de ciclo, haverá mais vapor para ser utilizado no condensador.

Ainda de acordo com Hicks, Stirgwolt e Monacelli (2009), esse sistema tem capacidade de produzir mais potência elétrica do que um ciclo a 10,7 MPa e 496 °C aplicado em avançadas caldeiras norte-americanas. Para separar a fornalha em duas partes, utiliza-se um painel de transição patenteado pela Babcock & Wilcox em Hicks, Stirgwolt e Monacelli (2009) que já é aplicado em caldeiras há 40 anos. A região superior da fornalha irá operar a pressões subcríticas podendo passar de 17,2 MPa na saída do superaquecedor. O sistema utilizado seria o mesmo padrão das caldeiras de utilidade. O superaquecedor teria temperatura máxima de 496 °C, permitindo a utilização de materiais convencionais. Como serão utilizados valores maiores de temperatura de água e ar, a temperatura final de saída de gases aumentará naturalmente. É por essa razão que para o aumento de eficiência do ciclo deve-se recuperar parte desse calor aquecendo o ar de combustão, diminuindo ou eliminando a utilização de vapor de baixa pressão para esse aquecimento. Tipicamente a temperatura na saída do economizador seria de 200 °C, e a temperatura da água de alimentação seria 140 °C e o ar seria aquecido a 150 °C.

Resumidamente, essa tecnologia utilizando ciclo de reaquecimento apresenta materiais comuns e baratos na composição da fornalha, resistindo às condições de operação iguais às da CBC 3, mas funciona com maior eficiência do que as caldeiras normais, produzindo maior energia. A B&W apresentou um estudo de caso em Hicks (2011) mostrando o aumento de produção de energia de uma fábrica que passou de 29 MW para 72 MW, mantendo pressão e temperaturas em patamares mais baixos para não ser necessário alterar o sistema de baixa pressão anterior.

5 SOLUÇÕES FINAIS

Para selecionar a melhor opção a ser aplicada na caldeira CBC 3, devem-se definir as prioridades para a fábrica. O mais interessante é que a solução seja a mais simples possível para evitar investimentos significativos e tempos de parada para implantação que obrigassem a planta a ficar sem produzir por muito tempo. Levando isso em consideração, a primeira atitude a ser tomada seria solucionar os problemas atuais da planta.

Primeiramente seria necessário corrigir o problema de queda de concentração de sólidos secos na planta de evaporação e desobstruir o aquecedor de ar secundário, para que a perda de carga não seja tão significativa, melhorando a mistura de gases e diminuindo a emissão de CO. Essas duas ações já terão capacidade de melhorar a produção da caldeira para patamares normais de operação. Também seria importante realizar manutenção nos precipitadores para evitar que a equipe continue tendo que diminuir a queima da caldeira para que as emissões não ultrapassem valores indesejáveis. Sem a realização dessas correções na planta, não será possível garantir a produção e disponibilidade da caldeira, pois torna-se cada vez mais necessário diminuir a carga de queima da caldeira para evitar altos índices de emissões ou de sobrecarregar outras áreas da fábrica. Além disso, será necessário garantir que o limite da caldeira esteja dentro dos padrões de produção, pois se o vapor passar a se formar antes do tubulão de vapor pode ocorrer vazamento de água na caldeira, criando uma situação de alto risco para a operação.

Com as operações descritas podemos retornar o funcionamento estabelecido em projeto. Assim, a primeira solução, e a mais simples, seria a alteração de alguns parâmetros de operação como discutido no item 4.1, podendo aumentar a produção de vapor até aproximadamente 200 t/h, aumentando a produtividade, ou razão de geração de vapor por quilograma de sólido seco queimado, de 3,26 para 3,50. Uma possibilidade para contornar a dificuldade com o limite de circulação da caldeira seria instalar um trocador de calor para não ultrapassar o limite de circulação da mesma. Fazendo o controle local da temperatura, seria possível garantir a formação de vapor no momento correto. Apesar de ser a solução mais simples, sem necessitar de grande investimento, não é capaz de acompanhar os planos de aumento de produção de celulose da fábrica para os próximos anos, mas irá elevar a capacidade de produção da caldeira para valores não alcançados nos últimos anos de operação.

A segunda solução seria uma mistura de opções. Para aumentar a capacidade de queima de sólidos secos seria necessário aumentar a área da fornalha como explicado no item 4.2.1,

combinado com o item 4.2.3, modificando a introdução de ar primário na caldeira. Para essa opção ser aceita seria necessário realizar testes para garantir que a operação da caldeira atinja os valores almejados. Uma das vantagens de combinar essas duas opções é a possibilidade de, ao modificar a fornalha, poder fazê-la de tal forma que apenas duas paredes apresentem injetores de ar primário, diminuindo a quantidade de injetores sobressalentes e acabando com a necessidade de bloqueio dos injetores dessas paredes, que já não existiriam nesse novo projeto. Outra vantagem é o fato de a CBC 3 já estar se aproximando do período de troca de painéis de tubulação da fornalha, assim ela poderia não simplesmente ser levada de volta à situação de projeto, mas receber um *upgrade* geral, aumentando sua produção e eficiência.

Por necessitar de maior investimento e modificações mais expressivas no projeto da caldeira, que já tem 30 anos, ao invés de aplicar o ciclo de reaquecimento a dupla pressão nela mesma, seria melhor implantar uma caldeira completamente nova com esse projeto. A instalação de nova caldeira também levaria muito menos tempo do que a desmontagem e montagem dos sistemas atuais e futuros. No entanto, essa opção seria a mais cara por precisar provar tecnicamente que funciona e também precisar de uma área completamente nova para sua instalação na unidade, tornando necessário instalar novas linhas de água e vapor até a nova localização. Além disso, a falta de referências desse tipo de caldeira de recuperação química a torna um investimento arriscado. Assim, apesar de apresentar a tecnologia mais interessante entre as estudadas nesse projeto, a instalação de caldeira de recuperação química com reaquecimento a dupla pressão não foi a solução escolhida.

6 CONCLUSÃO

O ciclo de recuperação química é muito importante para as fábricas de papel e celulose e ajuda a viabilizar o processo como um todo. Assim, caldeiras de recuperação química devem operar da melhor maneira possível, sem paradas, por 15 meses, sendo que o período de Parada Geral costuma levar de 10 a 20 dias, dependendo das necessidades da fábrica. A caldeira estudada já tem idade avançada e está próxima do período de manutenção programada para que possa continuar em operação, representando uma boa oportunidade para além de trocar as partes programadas, realizar modernizações para aumento de capacidade e produção.

Como a solução escolhida não considerou apenas o aspecto técnico, mas também a viabilidade econômica, a melhor opção aparente foi o aumento de área da fornalha com mudança do sistema de ar primário. Também seria possível ajustar os parâmetros como pressão e temperatura de alguns processos para alcançar a melhor eficiência possível, mas não foi possível simular esses valores nesse trabalho. Para uma maior certeza dos efeitos que cada alteração poderia levar para a caldeira, seria muito interessante realizar o estudo da composição do licor negro e utilizar um *software* de simulação que levasse em consideração o projeto e estado atual da caldeira. Dessa maneira seria possível simular as alterações de configurações de ar primário para averiguar sua eficácia antes de realizar testes reais.

Os estudos de vários tipos de soluções diferentes para os problemas de uma caldeira de recuperação química são muito complexos e envolvem muitos processos, tornando necessário obter muitos dados e parâmetros de entradas e saídas da caldeira. Nem todas as informações necessárias foram obtidas para a realização do estudo, logo ele precisou ser mais baseado na teoria e nas informações disponibilizadas pelos fornecedores e não em cálculos próprios, exceto aqueles realizados com a utilização de uma planilha para cálculo estimado dos parâmetros. Ainda assim, foi possível entender a fundo a importância do ciclo de recuperação e quais os fatores que mais o afetam.

REFERÊNCIAS

BABCOCK & WILCOX ENTERPRISES. **Dual Pressure Reheat Recovery Boiler**. 2009. Disponível em <<http://www.babcock.com/library/Documents/e1013208.pdf>> Acesso em 05/12/2016

CBC INDÚSTRIAS PESADAS S.A. **Manual de instruções do aumento de capacidade da caldeira de recuperação química MR-E de 960 para 1400 tss/d**. São Paulo: CBC, 2002.

CBC INDÚSTRIAS PESADAS S.A. **Proposta técnica nº S-C/CAL-P-275/85 Revisão A - Especificação técnica de uma caldeira de recuperação química CER – 700 tss/d**. São Paulo: CBC, 1985.

GREEN R. P.; HOUGH G. **Chemical Recovery in the Alkaline Pulping Processes**. 3rd. ed. Atlanta: TAPPI PRESS, 1992. 208 p.

HICKS T. E. **Technical paper BR-1858 Integrating a Reheat Steam Cycle Power or Recovery Boiler into na Existing Mill**. 2011. Disponível em <<http://www.babcock.com/library/Documents/BR-1858.pdf>> Acesso em 05/12/2016

HICKS, T. E.; STIRGWOLT W. R.; MONACELLI J. E. **Technical Paper BR-1830 Recovery Boiler Reheat Steam Cycle**. 2009. Disponível em <<http://www.babcock.com/library/Documents/BR-1830.pdf>> Acesso em 05/12/2016

MACCALLUM, C. **First maximize then optimize the reduction efficiency in a kraft recovery boiler**. 2015. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/292434856_FIRST_MAXIMIZE_THEN_OPTIMIZE_THE_REDUCTION_EFFICIENCY_IN_A_KRAFT_RECOVERY_BOILER>. Acesso em 04/12/2016

MACCALLUM, C. **How partially-interlaced primary air works and improves recovery boiler operation**. 2013. Disponível em <http://www.wcblrbac.org/files/9914/0553/8602/2013_MacCallum_HowPIPAworksToImproveRBoperation_WesternBLRBAC_Text.pdf>. Acesso em 04/12/2016

TREINO E-SUZANO PAPEL **Processo de celulose e recuperação – Produto papel Suzano**. Disponível em <<http://www.e-suzano.com.br/siga/scorm/content/28/conteudo/swfs/mod3.html>> Acesso em 05/12/2016

TREINO E-SUZANO RECUPERAÇÃO 1 **Produção do papel - Introdução**. Disponível em <<http://www.e-suzano.com.br/siga/scorm/content/159/index.html?m=1>> Acesso em 05/12/2016

TREINO E-SUZANO RECUPERAÇÃO 2 **Produção do papel – Processo de celulose e recuperação**. Disponível em <<http://www.e-suzano.com.br/siga/scorm/content/159/index.html?m=2>> Acesso em 05/12/2016

VAKKILAINEN, E. K. **Kraft recovery boilers – Principles and practice.** 2005 Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/279871546_Kraft_recovery_boilers_-_Principles_and_practice> Acesso em 04/12/2016

VAKKILAINEN, E. K. **Recovery boiler performance testing. Material and energy balance.** 2006. Finnish Recovery Boiler Committee, Report 5/2006 4.12.2006, 55 p.

VAKKILAINEN, E. K. et al. **Continuous development of recovery boiler technology – 50 years of cooperation in Finland.** 2014. Disponível em <https://www.researchgate.net/publication/273456424_Continuous_development_of_recovery_boiler_technology_-_50_years_of_cooperation_in_Finland> Acesso em 04/12/2016