

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**NAYSSA MARTINS RIBEIRO**

**ANÁLISE DE UMA INSTALAÇÃO DE VAPOR EM UMA INDÚSTRIA DE  
PAPEL E CELULOSE**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**PATO BRANCO**

**2016**

NAYSSA MARTINS RIBEIRO

**ANÁLISE DE UMA INSTALAÇÃO DE VAPOR EM UMA INDÚSTRIA  
DE PAPEL E CELULOSE**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Mecânica da Coordenação de Engenharia Mecânica – COEME – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Câmpus Pato Branco, como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro.

Orientadora: Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Júnior

PATO BRANCO

2016

## FOLHA DE APROVAÇÃO

### Análise de uma instalação de vapor em um indústria de papel e celulose

Nayssa Martins Ribeiro

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação apresentado no dia 02/12/2016 como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheiro Mecânico, do curso de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Mecânica (DAMEC) da Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Câmpus Pato Branco (UTFPR-PB). O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora julgou o trabalho **APROVADO**.

---

Prof. Dr. Jean-Marc Stephane Lafay  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Paulo Cezar Adamczuk  
(UTFPR)

---

Prof. Dr. Luiz Carlos Martinelli Junior  
(UTFPR)  
Orientador

---

Prof. Dr. Bruno Bellini Medeiros  
Responsável pelo TCC do Curso de Eng. Mecânica

\*A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso de Engenharia Mecânica

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas aquelas que acreditaram no meu potencial e me incentivaram nessa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por seu amor e graça infinita.

À minha família por todo o incentivo e suporte durante os anos de minha vida, sempre mostrando o caminho para transformar os meus sonhos em realidade.

Ao meu pai Nélio, por seu amor imenso, seu cuidado e por sempre acreditar em meu potencial.

À minha mãe Irene, pelas palavras certas nos momentos mais difíceis e pelo exemplo de ser uma mulher forte.

À minha irmã Nayara, por ser minha companheira em todos os meus planos de vida.

À minha tia Iracema, por ser a minha segunda mãe e pelo seu cuidado.

Às minhas primas Milayne e Jacqueline, por todo o amor e carinho em todos os momentos da minha vida.

Aos meus amigos que conquistei, pois sem vocês a vida não teria muita graça.

Ao meu orientador Prof. Luiz Carlos Martinelli Júnior, por todo o suporte prestado durante os anos da minha graduação, pelas oportunidades oferecidas, pela paciência, pelo conhecimento transmitido e pelo exemplo de profissional e ser humano.

## EPÍGRAFE

*No escuro de quem eu fui,  
não tinha nada  
Veio Cristo,  
tudo se fez diferente  
Tiago Arrais*

## RESUMO

RIBEIRO, Nayssa M. Análise de uma instalação de vapor em uma indústria de papel e celulose. 2016. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

No atual cenário nacional, a busca por eficiência e redução de perdas e custos no processo é necessário e fundamental para o crescimento e manutenção das empresas. Este trabalho apresenta uma análise da eficiência energética de um sistema de geração de vapor e um dimensionamento de uma linha de distribuição em uma empresa no ramo de papel e celulose no Brasil. Foi aplicado o princípio de um balanço térmico, através do método direto e indireto, para avaliar a produção de vapor, detectando deficiências do funcionamento operacional através da avaliação dos parâmetros energéticos. Para o dimensionamento da linha foi utilizado o cálculo de perda de carga para encontrar o melhor diâmetro, e o isolamento térmico, também foi feita uma distribuição de purgas.

**Palavras-chave:** Celulose. Papel. Vapor. Caldeira. Balanço térmico.

## ABSTRACT

RIBEIRO, Nayssa M. Análise de uma instalação de vapor em uma indústria de papel e celulose. 2016. 71f. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Pato Branco, 2016.

In the current national scenario, the search for efficiency and reduction of costs and losses in the process are necessary and fundamental for the growth and maintenance of the companies. This paper presents an analysis of the energy efficiency of a steam generation system and a sizing of a distribution line of a company in the cellulose and paper industry in Brazil. The principle of thermal balance, through the direct and indirect method, was applied to evaluate the steam production, detecting functioning deficiencies through the evaluation of energy parameters. For the dimensioning of the calculation line used to calculate the pressure loss for the best diameter, for thermal insulation, also for the purge distribution.

**Keywords:** Cellulose. Paper. Steam. Boiler. Thermal balance.



## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 – Representação simplificada esquemática do processo Kraft de produção de papel e celulose . . . . .	12
Figura 2 – Representação esquemática de uma caldeira de recuperação . . . . .	18
Figura 3 – Purgador para drenagem de linhas de vapor . . . . .	31
Figura 4 – Pontos de colocação de purgadores para drenagem de linhas de vapor.....	32
Figura 5 – Desenho da linha de 11kgf/cm <sup>2</sup> . . . . .	37
Figura 6 – Exemplo de um tela da Caldeira de Força . . . . .	39
Figura 7 – Exemplo de um tela da linha do licor negro . . . . .	40
Figura 8 – Diagrama de Sankey da caldeira de Recuperação . . . . .	45
Figura 9 – Diagrama de Sankey da caldeira de força . . . . .	47
Figura 10 – Coeficiente de excesso de ar na combustão do Licor Negro . . . . .	50
Figura 11 – Coeficiente de excesso de ar na combustão de biomassa . . . . .	50
Figura 12 – Isométrico linha de 11kgf/cm <sup>2</sup> . . . . .	51
Figura 13 – Isométrico linha de 11kgf/cm <sup>2</sup> para Máquina de Papel . . . . .	53
Figura 14 – Isométrico linha de 11kgf/cm <sup>2</sup> para Celulose . . . . .	54

## LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Valores usuais do coeficiente de excesso de ar Fonte . . . . .	28
Tabela 2 – Dados da caldeira de recuperação . . . . .	41
Tabela 3 – Composição química e percentagem em massa dos compostos que constituem o smelt . . . . .	41
Tabela 4 – Composição química e percentagem em massa dos compostos que constituem o smelt . . . . .	41
Tabela 5 – Composição das cinzas da caldeira de recuperação ( valores médios mássicos) . . . . .	42
Tabela 6 – Dados da caldeira de força . . . . .	42
Tabela 7 – Poder Calorífico do Combustível . . . . .	42
Tabela 8 – Características químicas da cinza da biomassa . . . . .	43
Tabela 9 – Perdas da caldeira de recuperação . . . . .	45
Tabela 10 – Dados do economizador . . . . .	46
Tabela 11 – Dados do superaquecedor . . . . .	46
Tabela 12 – Perdas na caldeira . . . . .	47
Tabela 13 – Dados do economizador . . . . .	48
Tabela 14 – Dados do superaquecedor . . . . .	48
Tabela 15 – Coeficientes de excesso de ar da caldeira de Recuperação . . . . .	49
Tabela 16 – Coeficientes de excesso de ar da caldeira de força . . . . .	49
Tabela 17 – Dados gerais da linha . . . . .	51
Tabela 18 – Velocidade . . . . .	52
Tabela 19 – Variação de Pressão nas linhas . . . . .	52
Tabela 20 – Lã de rocha - Temperatura 200 °C a 249 °C . . . . .	53

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	11
1.1 Justificativa.....	13
1.2 Objetivos .....	13
1.2.1 Objetivo geral .....	13
1.2.2 Objetivos específicos.....	13
2 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICOS.....	15
2.1 Indústria de papel e celulose.....	15
2.1.2 Produção de papel .....	15
2.2 Geradores de Vapor .....	17
2.2.1 Caldeira de Recuperação .....	18
2.2.2 Caldeira de Força .....	21
2.3 Eficiência na geração e distribuição de vapor .....	23
2.3.1 Balanço Energético.....	24
2.3.2 Consumo ótimo de combustível .....	30
2.3.3 Excesso de ar.....	30
2.4 Dimensionamento de tubulação .....	31
2.5 Purgadores.....	33
2.6 Isolamento térmico .....	36
3 METODOLOGIA.....	39
3.1 informações do sistema.....	39
3.1.1 Fábrica em estudo.....	39
3.1.1 Demanda de vapor .....	41
3.1.2 Linha de capor em estudo .....	41
3.2 Coleta de dados .....	43
3.2.1 Caldeira de recuperação .....	44
3.2.2 Caldeira de força .....	46

4 RESULTADOS .....	47
4.1 balanço energético .....	47
4.1.1 Caldeira de recuperação .....	47
4.1.2 Caldeira de força .....	49
4.1.3 Excesso de Ar .....	50
4.2 dimensionamento da tubulação.....	53
5 PROPOSTA .....	57
5.1 Conservação e gerenciamento de energia.....	57
6 CONCLUSÃO.....	59
ANEXO A – DESENHO DA LINHA ORIGINAL DE 11KGF/CM <sup>2</sup> .....	67
ANEXO B – NOVO DESENHO DA LINHA DE 11KGF/CM <sup>2</sup> PARA MÁQUINA DE PAPEL.....	68
ANEXO C – novo Desenho da linha de 11kgf/cm <sup>2</sup> para celulose.....	69

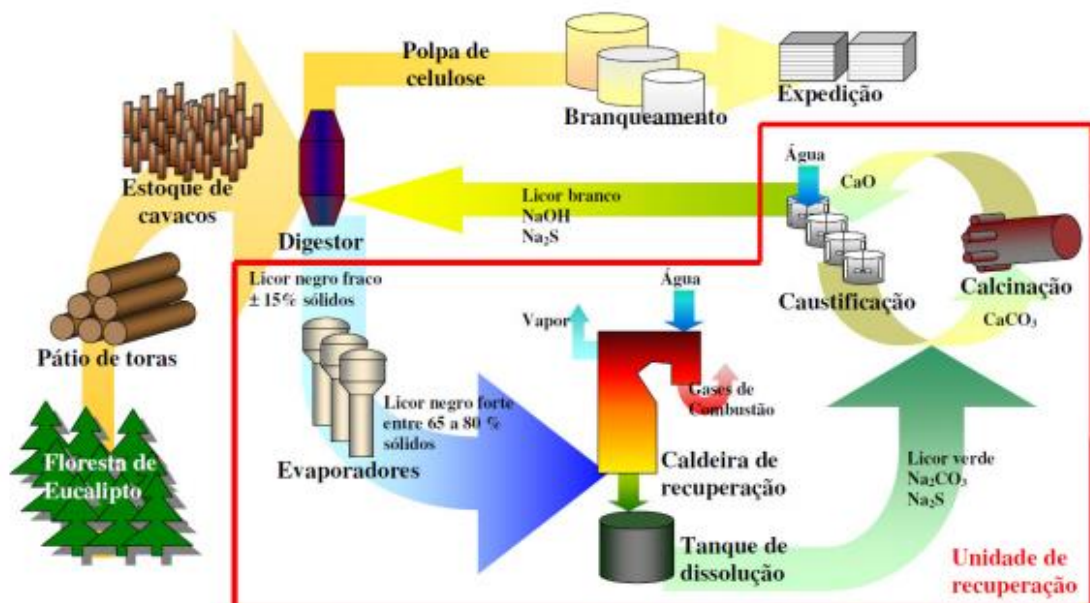
## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil se desenvolveu ao longo destes anos e atualmente se destaca como produtor de celulose no mercado de celulose de eucalipto. Nos últimos anos, este segmento vem crescendo significativamente, conjuntamente com a demanda mundial de celulose. De acordo com os dados da Associação Brasileira de Celulose e Papel - Bracelpa (2010), o Brasil é o quarto maior produtor de celulose e primeiro maior produtor de celulose de eucalipto. E segundo dados estimados pela Bracelpa (2011), em torno de 95% das toneladas de celulose produzidas no Brasil em 2011 proveem do processo químico Kraft.

Normalmente uma indústria de papel e celulose se divide em dois setores de produção distintos, um sendo responsável pela produção da polpa de celulose e papel e o outro é o de recuperação e utilidades, que possuem funções como: Recuperar e regenerar compostos químicos; Fornecer água, vapor, energia elétrica e ar comprimido para todo o processo; Tratar os efluentes.

Para Ferreira (2007), a interação destas duas unidades faz com que o processo empregado nesse tipo de indústria possa ser considerado fechado. A figura 1 representa de forma simplificada um processo Kraft.

**Figura 1 - Representação simplificada esquemática do processo Kraft de produção de papel e celulose**



Fonte: FERREIRA, 2007

O setor de papel e celulose possui uma grande preocupação com a conversão de energia e que algumas práticas para que isso ocorra é fortemente usado, como o uso de co-geração de energia, principalmente utilizando turbinas a gás e vapor; caldeiras de recuperação para recuperar químicos; recuperação de ar úmido e entre outras (BARBELI, 2008). Bachmann (2009), ressalta que a indústria sempre deu importância ao consumo energético dos processos devido à sua relevância como componente de custo e que recentemente, ela também passou a ser vista pelo seu aspecto ambiental. Com isso, a gestão energética atual tem buscado tanto o menor custo quanto o uso de insumos e tecnologias que causem os menores impactos sociais ou ambientais.

A geração de vapor é a principal fonte de energia para todo o processo nesse setor, ele pode ser usado de diversas formas como em processos de fabricação e beneficiamento; na geração de energia elétrica; na geração de trabalho mecânico; no aquecimento de linhas e reservatórios de óleo combustível; e na prestação de serviços. Por exemplo, no processo de fabricação e beneficiamento desse setor, o vapor é utilizado no cozimento de madeira nos digestores, na secagem com cilindros rotativos, na secagem de cola, na fabricação de papel ondulado, na geração de energia elétrica através de turbinas a vapor.

O setor de papel e celulose é um grande consumidor de energia, seja de eletricidade ou de vapor no processo, e tem empregado em suas plantas sistemas de cogeração, principalmente pelo processo Kraft (FILHO, et al. 2009). Gallego (2004) afirma que o sistema de cogeração geralmente usado é composto de caldeiras de biomassa, responsáveis pela queima de cavacos, cascas e resíduos de madeira, e de caldeiras de recuperação química, responsáveis pela queima do licor negro.

O presente trabalho está dividido entre seis capítulos. O capítulo 1 abrange a introdução do trabalho, a justificativa da escolha do tema e os objetivos do trabalho. O capítulo 2 contém a revisão de literatura sobre o tema, envolvendo definições sucintas sobre a indústria de papel e celulose, e os processos que englobam o tema do trabalho nesse setor de produção. O capítulo 3 aborda a metodologia empregada neste trabalho e a caracterização da indústria em estudo. O capítulo 4 envolve a análise dos resultados. O capítulo 5 aborda a interpretação crítica sobre este trabalho, e uma sugestão para trabalhos futuros. E, por fim, o último capítulo é destinado para as referências bibliográficas consultadas.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

As empresas de papel e celulose estão entre as maiores empresas de capital intensivo no mundo, com investimentos altos e rentáveis. Com isso, a procura de um sistema sem perdas é indispensável para o desenvolvimento nesse setor. E como o vapor é fundamental para todo o processo, usado em diversas etapas e procedimentos da produção, sua geração deve ser planejada com precisão. A forma de distribuição também deve ser estudada e analisada para se obter a forma mais eficiente, pois qualquer queda de pressão, temperatura, vazão, que são fatores fundamentais para o processo, pode interferir no resultado final do produto.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho de conclusão de curso é analisar a eficiência energética das caldeiras e da linha de vapor para obter valores quantitativos das perdas como base de uma solução de conversação e gerenciamento de energia no sistema de geração e distribuição de vapor em uma indústria de papel e celulose.

### 1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são: (i) Analisar principal linha de distribuição de vapor da fábrica em estudo; (ii) Dimensionar uma nova linha, analisando a perda de carga, isolamento e purgadores; (iii) Calcular o rendimento das caldeiras através dos Métodos Direto e Indireto; (iv) Avaliar as perdas energéticas do processo e sugerir a racionalização destas perdas.





## 2 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICOS

### 2.1 INDÚSTRIA DE PAPEL E CELULOSE

No Brasil a indústria de papel e celulose se desenvolveu de gradativamente me etapas de substituição de importações e integração produtiva, para suprir a demanda das empresas gráficas. Porém , a produção de celulose no Brasil é mais recente e a primeira empresa nesse segmento surgiu na década de 1950 (JORGE, 1993; SOARES, 1993).

O processo Kraft aqui no Brasil tem como principal matéria prima a madeira de eucalipto, mas podendo utilizar de outros tipos. A madeira passa por vários processos onde as fibras da celulose contidas nela são separadas entre si e extraídas na forma de pasta a 90% de teor de seco. Em alguns tipos de papel, essa pastas passa por um processo de branqueamento. Nas diversas etapas de produção do papel e da celulose há consumo de vapor como fonte de energia térmica e alem disso sistemas de vapor, caldeiras, coletores e turbinas são utilizados não só para gerar vapor mas também para gerar energia elétrica e recuperar produtos químicos (MENDES et al, 2007).

#### 2.1.2 Produção de papel

A preparação da massa envolve 4 etapas, a primeira é a desagregação da celulose, onde a celulose é desagregada por um equipamento, chamado desagregador. Ele é nada mais do que um "liquidificador" de grandes proporções. A segunda etapa é a refinação, que consiste em submeter as fibras de celulose a uma reação de corte, esmagamento ou fibrilação. A fibrilação aumenta a superfície da fibra em contato com o meio, que é a água. O grau de refinação varia em função das características do papel que pretende fabricar (PIOTTO, 2003).

A terceira etapa é a preparação da receita, onde a pasta entra em um tanque de mistura, onde a celulose é misturada com os demais componentes, que fazem parte da receita do papel. Essa etapa pode ser contínua ou em batelada. E por fim, é a etapa de depuração, onde ocorre a limpeza da mistura de celulose com os demais componentes da receita e a retirada de corpos estranhos, sujeiras, bolos

de massa ou fibras enroladas que são indesejáveis para a aparência e finalidade da folha de papel (PIOTTO, 2003).

Com o fim da preparação da massa, ou seja, depois de passar na última etapa o sistema de depuração, ela alcança a máquina de papel. A máquina de papel é constituída por 5 partes distintas (PIOTTO, 2003): Caixa de entrada que tem a função de distribuir de forma mais uniforme possível a suspensão de fibras sobre a tela formadora. No interior da caixa existe um ou mais cilindros rotativos perfurados, que têm a função de uniformizar a suspensão, evitando a aglomeração de fibras em flocos, que prejudicam a uniformidade da folha de papel ou sua aparência, ou seja, sua má formação; Mesa plana é o local onde ocorre a formação da folha. É formada por uma mesa com suporte e colunas de aço, sobre o qual corre a tela formadora, apoiada sobre elementos desaguadores, rolo de cabeceira, rolo de sucção e rolos guias. A tela formadora é feita de plástico ou metal e tem a malha bastante fechada. As fibras ficam retidas na tela ao caírem, e a água passa através dela, escoando em calhas apropriadas. Esta água é reutilizada na preparação da massa que alimenta a máquina, pois é rica em partículas de fibras e cargas.

A Prensa, após sair da mesa plana, a folha de papel já está formada, porém pé constituída de 80% a 85% de água. As prensas possui a finalidade de retirar parte dessa água. Ela é formada por 2 rolos cilíndricos, sendo que o rolo superior de material mais duro, por exemplo granito e o inferior de borracha ou ebonite. Normalmente, as máquinas de papel têm 2 ou 3 prensas, que trabalham com feltro especial, agulhado, que auxilia no caminho da folha. No ponto de encontro entre os dois rolos é feita a prensagem do papel e feltro e com isso água contida no papel é transferida para o feltro; Secador, onde ocorre a secagem final da folha de papel e realiza-se a cura das resina adicionadas. Essa etapa é composta por inúmeros cilindros secadores, que dependem diretamente do tipo e tamanho da máquina. Os secadores são cilindros de aços com superfície polida e trabalham com pressão de vapor, e a água evaporada do papel é extraída por coifas especiais. E entre os cilindros secadores, para a condução da folha utilizam-se feltros ou telas secadoras. E por fim, a Calandra é utilizada para acertar a espessura e aspereza do papel, e na Enroladeira a folha contínua do papel vai sendo bobinada até certo diâmetro, para depois partir para os demais processos de beneficiamento.

## 2.2 GERADORES DE VAPOR

No século XVII, os grandes centros urbanos e as indústrias passaram por intensas modificações, tais como: descobertas de novas matérias-primas; evolução tecnológica dos processos produtivos; aumento do volume de produção e busca por novos mercados (SILVA, 2006). A utilização de vapor sob pressão para uso em processamentos diversos, foi uma das maiores descobertas da Revolução Industrial. Popularmente conhecidos como caldeiras, são equipamentos amplamente usados nas indústrias destinados a produção de vapor através de troca térmica entre o combustível e a água, produzindo vapor sob pressões superiores à atmosférica a partir da energia térmica de um combustível e o ar (elemento comburente), são constituídos por diferentes equipamentos que juntos permitem a obtenção de um maior rendimento térmico possível. Os vapores gerados nas caldeiras possuem dois destinos distintos (SILVA et al, 2008): Vapor saturado, no aquecimento e cozimento, entre outros; Vapor superaquecido, na geração de energia em combinação com uma turbina.

Formado na caldeira, arrasta consigo partículas de água. É o vapor úmido na temperatura de saturação, usado geralmente em aquecimento, onde partículas de água que o acompanham, não prejudicam seu uso. Originado do vapor saturado, pela introdução de mais calor ao vapor, ou seja acima da temperatura de saturação. Geralmente este vapor é utilizado para geração de energia em turbinas, onde ocorre a necessidade da eliminação da umidade, pois as partículas de água danificam a turbina. É no superaquecedor que o vapor passa de saturado a superaquecido (CUNHA, 2005; YAZAKI, 2011).

Hoje em dia, os geradores de vapor ocupam um lugar muito importante na produção industrial, pois geram vapor indispensável a muitas atividades, participando até de forma direta em alguns processos produtivos, como matéria-prima. (SILVA et al, 2008) As caldeiras podem ser classificadas em Flamotubulares e Aquatubulares. As flamotubulares são compostas por um vaso de pressão por onde passam tubos, que estão mergulhados em água e dentro de um recipiente isolado termicamente, com gases de combustão, escoando internamente. Nas aquatubulares a água escoava internamente aos tubos trocando calor com os gases de combustão que por sua vez passam por fora dos tubos. Suas principais aplicações são: produção de eletricidade; recuperação de calor; propulsão

mecânica; fonte de calor para processos industriais diversos; aproveitamento energético dos efluentes da indústria do papel (SHINTANI et al, 2006; PERA, 1990).

### 2.2.1 Caldeira de Recuperação

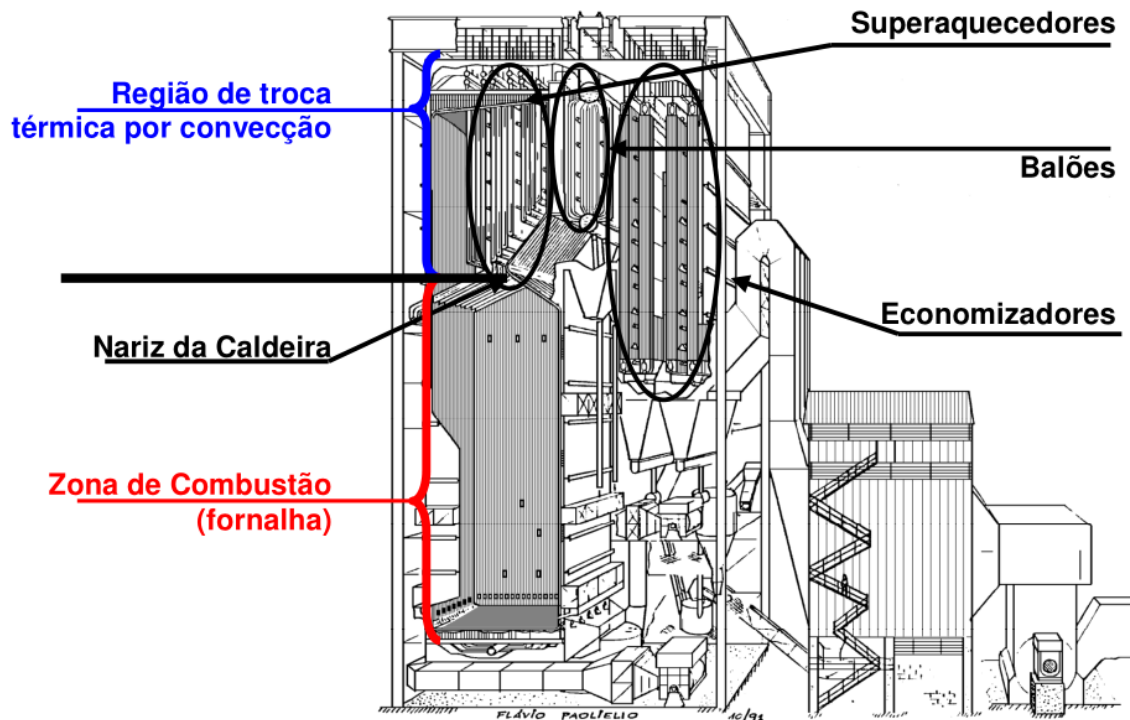
A caldeira de recuperação tem a função de incinerar a carga poluente do licor preto para minimizar impacto ambiental, gerar energia térmica, co-gerar energia elétrica, e recuperar os reagentes inorgânicos (ALMEIDA, 2006; RIBEIRO, et al. 2007). Sua utilização é largamente adotada em indústrias pesadas para a redução de custos com combustível, a exemplo siderúrgicas, plantas químicas, fábrica de celulose, entre outras (SILVA, 2014).

Cunha (2005) explica que este equipamento é ao mesmo tempo um reator químico e um gerador de vapor. O licor negro concentrado compostos por materiais orgânicos e inorgânicos é injetado na fornalha através de bicos queimadores. Sendo que a parte orgânica queima e gera calor para a produção de vapor e a parte inorgânica é extraída como um fundido.

Segundo Ferreira (2013), uma caldeira de Recuperação de licor preto possui duas regiões importantes: fornalha ou zona de combustão do licor; e parte superior da caldeira, região dos acessórios (superaquecedores, balões e economizadores) ou região de transferência de calor convectiva.

Paoliello (et al. 2002) ilustra na figura 2 um esquema representativo de uma caldeira de recuperação moderna, ressaltando suas principais regiões, o nariz da caldeira e a localização das entradas de ar e dos injetores de licor. Segundo Ferreira(2013), a estrutura denominada nariz da caldeira, delimita a fronteira entre a fornalha e a região dos acessórios.

Figura 2 - Representação esquemática de uma caldeira de recuperação



Fonte: PAOLIELLO et al, 2002

Esse tipo de caldeira normalmente é do aquatubular. A fornalha é como um reator, onde se tem a combustão do licor e a sessão de troca térmica é similar as das caldeiras convencionais, geradoras de vapor. A seção da fornalha é o local onde são admitidos o licor negro que irá ser queimado e os sistemas de ar primário, secundário e terciário, em diferentes níveis. Sua estrutura é baseada em paredes com tubulações alinhadas verticalmente e que são interligadas nas suas extremidades, sendo que na extremidade superior os coletores de vapor estão conectados e na extremidade inferior o coletor de água é ligado. Através de desvios nas tubulações, as paredes da fornalha possuem aberturas para portas de visita, sistemas de alimentação de ar, para os bicos de aspersão de licor e para os queimadores de carga e partida (ADAMS, 199; VAKKILAINEN, 2000; ALMEIDA, 2006; GUIMARÃES, 2013).

E na seção de transferência de calor, que está acima da fornalha é encontrado os sistemas de superaquecedores, convectores e de economizadores. Localizados acima do nariz da fornalha e a frente dos convectores, os superaquecedores são tubulações onde o vapor saturado do balão de vapor e, por causa do contato desta tubulação com os gases quentes de saída, terão sua temperatura e pressão elevados. Os convectores encontram-se entre os

superaquecedores e economizadores. São feixes de tubulações interligadas ao balões da caldeira, que recebem dos economizadores água aquecida e trocam calor com os gases de combustão dos superaquecedores por convecção (circulação natural). Também sendo feixes de tubulações, os economizadores tem como objetivo aquecer a água de alimentação da caldeira em contracorrente com os gases quentes, aproveitando assim ainda mais sua energia (GUIMARÃES, 2013).

A alimentação do ar de combustão, como já citado, é fornecido em três diferentes níveis. Para elevar a temperatura do ar antes de entrar na caldeira, ele passa por um sistema de aquecimento e só depois admitido nos dutos de distribuição ao redor da caldeira. O ar primário é alimentado por dutos distribuídos nas quatro paredes da fornalha, próximos à base da fornalha. Os principais objetivos dele são: moldar o formato e assentar o leito carbonizado longe das paredes da fornalha; manter a temperatura do leito adequada para acontecer as reações de combustão e redução desejadas; fornecer oxigênio para a combustão homogênea na camada externa do leito carbonizado ( FERREIRA et al. 2010; GUIMARÃES, 2013).

Semelhante ao primário, mas com menos entradas de alimentação na fornalha, o ar secundário tem mostrado uma grande influência na operação da caldeira. Suas principais funções são: definir a altura do leito; promover a oxidação do CO residual e dos gases voláteis produzidos na pirólise; e fornecer oxigênio para a combustão completa do licor preto. E o terciário tem com objetivo o fornecimento de oxigênio para completar a combustão dos gases e promover a mistura homogênea dos mesmos. Seu arranjo mais comum é de portas de entrada em paredes opostas posicionadas de forma entrelaçada (ADAMS, 1997; FERREIRA, 2013).

A injeção do licor preto (combustível da caldeira) é feito através de injetores projetados e posicionados através das quatro paredes da fornalha de forma que a inserção de licor espalhe as gotas, e que suas trajetórias sejam longas para que todas as etapas da combustão ocorram. O licor preto com uma concentração de aproximadamente 80% de sólidos secos, é injetado por bicos injetores que possuem algumas funções como: inserir o licor na profundidade ideal na fornalha; formar gotas de licor do tamanho ideal para o processo de combustão; espalhar de forma homogênea todo o licor na fornalha. (FERREIRA, 2013; GUIMARÃES, 2013). Antes de serem enviados para à atmosfera por uma chaminé, os gases gerados pela

combustão (queima do licor) passam pela parte externa dos trocadores de calor (superaquecedores, convectores e economizadores) e por fim pelo precipitador eletrostático (GUIMARÃES, 2013).

Devido a diversos fatores que influenciam o processo de transferência de calor entre os gases quentes, oriundos do processo de combustão do licor, e a água de alimentação, o vapor a ser usado em etapas subsequentes no processo, terá uma temperatura diferente do que o processo requer, logo é comum o uso de dessuperaquecedores de água no vapor superaquecido como elementos finais de controle (LINDSLEY, 2005).

### 2.2.2 Caldeira de Força

Esse tipo de caldeira tem como principal objetivo complementar a geração de vapor para a produção de celulose e energia elétrica da fábrica. Para isto, utiliza como principal combustível a biomassa, que é uma mistura de resíduos de madeira que foram rejeitados para a produção de celulose e resíduos de serrarias fornecedoras(CUNHA, 2005)

Por apresentar fracos desempenhos ambientais e energéticos na maioria dos processos de combustão, é necessário o uso de novos combustíveis para incrementar uma maior eficiência, de reduzir custos e diminuir os níveis de emissão de poluentes tem despertado o interesse pelo desenvolvimento de novas tecnologias de combustão. Na indústria as tecnologias mais usadas são: sistemas de grelha e leito fluidizado. O sistema de grelha foram os primeiros a ser utilizados, e são os mais indicados quando se pretende processar combustíveis com elevados teores de umidade e cinzas. Eles podem proporcionar uma distribuição mais homogênea de combustível e uma alimentação de ar primário perfeitamente distribuída ao longo de toda a grelha. Estes sistemas podem ser refrigerados de forma a evitar a escorificação e a aumentar o tempo de vida útil dos equipamentos (LOO et al, 2008; PINTO, 2011).

Os sistemas de leito fluidizado são a melhor escolha de tecnologia para converter combustíveis alternativos em energia, devido à sua flexibilidade em relação ao tipo de combustível que pode ser admitido e à possibilidade de desenvolver uma operação eficiente e limpa(SCALA et al, 2004). Este tipo de

tecnologia possui dois princípios de funcionamento distintos: leito fluidizado circulante e leito fluidizado borbulhante. O primeiro utiliza partículas que são encaminhadas junto com o gás de combustão para um ciclone, durante o processo, e nesse ciclone elas são separadas do gás, para serem novamente encaminhadas para o fundo da fornalha. Devido a grande turbulência existente durante a combustão, há uma maior uniformidade da temperatura ao longo de toda a fornalha, o que permite um controle maior do processo e dos estágios de ar e ainda a manutenção de todas as paredes da câmara de combustão, minimizando as perdas. E o segundo sistema é normalmente composto por areia, que fica situada no fundo da fornalha onde é injetado o ar primário, sendo o ar secundário injetado na zona superior da câmara de combustão (PINTO, 2011).

O operação de um leito fluidizado se dá pelo fenômeno de fluidização, ou seja, pela suspensão das partícula num gás. A qualidade da fluidização do leito depende de vários fatores, como por exemplo: o tamanhos das partículas, razão de densidade fluido/sólido, geometria da fornalha, tipos de sólidos usados e a suscetibilidade de aglomeração dos sólidos do leito (KUNII et al, 1991). Durante um processo de fluidização, pode-se obter diferentes comportamentos das partículas conforme as velocidades de ar usadas. Os diferentes comportamentos das partículas entre os vários tipos de operação relacionam-se com a velocidade do ar e a concentração de partículas na diferentes regiões do sistema (TARELHO, 2001):

A - Leito fixo: Velocidades de ar de fluidização são baixas, sem perturbar o leito;

B - Mínima fluidização: Com um aumento de velocidade, o leito expande-se ligeiramente e quando a força ascendente do ar iguala o peso do leito;

C - Fluidização borbulhante: Com velocidades superiores é mantida a velocidade mínima de fluidização, neste regime o ar escoar-se através do leito sob a forma de bolhas;

D - *Slugging*: A bolhas crescem para um tamanho que ocupa toda a área de secção da fornalha. Ocorre em sistemas mais pequenos, com profundidade suficiente e com uma velocidade de gás elevada.

E - Fluidização Circulante: O leito é constituído por duas fases: fase emulsão e fase de bolha. Para velocidades próximas ou superiores à velocidade terminal das partículas do leito, as partículas são arrastadas para o *freeboard* e por vezes para o exterior da fornalha.



Para a eficiência do processo de combustão em um leito fluidizado depende de diversos fatores operacionais. O uso em excesso de ar durante o processo é uma deles, pois é um parâmetro necessário para assegurar uma combustão completa. Por isso deve-se manter um equilíbrio, principalmente sabendo que a mistura entre combustível e ar nunca é perfeita, sempre existindo áreas com deficiência de oxigênio (BASU, 2006). Para ter uma eficiência ótima do processo, o nível de ar é estabelecido quando as perdas, devido à combustão incompleta e ao calor perdido nos gases de exaustão, são minimizados (PINHEIRO et al, 1995).

A pressão do ar também deve ser monitorada, pois ela está relacionada diretamente com a densidade do gás, ou seja, o aumento da pressão origina um aumento da densidade do gás (YANG, 2003). Isso leva à diminuição da velocidade de fluidização e ao aumento da expansão do leito, com isso ocorre um aumento no espaço para as partículas se moverem, reduzindo as oportunidades de colisão e a ocorrência de atrito (TEIXEIRA, 2010). E segundo Yang (2003), a temperatura é outro fator que deve ser controlado no processo, pois um aumento da temperatura pode ter vários efeitos ao nível de um gás, como a diminuição da densidade, o aumento da condutividade térmica e o aumento da viscosidade, que tem uma consequência no aumento da velocidade de fluidização mínima.

Uma caldeira de biomassa é equipada com queimadores a óleo combustível, para o uso quando o fornecimento de biomassa for interrompido por situações adversas, como em casos onde a madeira está escassa. Estes queimadores penetram na fornalha via um orifício no refratário da fornalha, e o óleo combustível é injetado por um bico e placa pulverizadora, com a ajuda de jatos de vapor. Ela também possui uma série de sistemas protetores, baseados em circuitos eletrônicos com parâmetros de projeto, e que atuam protegendo a caldeira de eventuais falhas mecânicas, elétricas, instrumentais e humanas (INTERNATIONAL PAPER, 2015).

### 2.3 EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

A Eletrobras (2005) em seu documento sobre eficiência energética no uso de vapor, ressalta que o desempenho energético e a redução das perdas em uma

indústria, fazem sentido dentro de condicionantes de viabilidade econômica, ou seja, os custos associados à economia de energia devem ser cobertos com a energia economizada. E que a eficiência não é um objetivo em si mesma, mas sim apenas se justifica pelos benefícios econômicos que pode trazer.

Em uma distribuição de vapor a principal perda de energia, desde a caldeira até os pontos de utilização, ocorre por transferência de calor para o ambiente e deve ser minimizada pelo uso adequado de isolamento nas linhas de vapor. Outra perda comum, pode ser nas linhas de vapor saturado, onde a energia térmica perdida ocasiona a formação de condensado, que deve ser retirado por meio de purgadores. Logo, é muito importante que a fase de concepção e desenho do sistema de distribuição de vapor, esteja de acordo com a demanda e a perda de carga admissível, e que os purgadores sejam especificados e o melhor posicionamento para eles definido. E na manutenção dessa rede de distribuição, deve-se priorizar a conservação do isolamento, fundamental para manter a condensação do vapor em valores toleráveis e o perfeito funcionamento dos purgadores de vapor (ELETROBRÁS, 2005).

De modo geral, a eficiência energética de um sistema é a indicação do quanto um equipamento real aproxima-se de seu comportamento ideal, no qual não existem perdas. A busca para minimizar as perdas é constante, pois elas significam maiores custos. Com isso, procura-se sempre trabalhar com equipamentos de alto rendimento e manter a eficiência em um nível máximo. Logo, saber o real valor da eficiência é de extrema importância para a indústria.

### 2.3.1 Balanço Energético

Igual para qualquer grupo térmico, o balanço térmico de um gerador de vapor é representado pela igualdade entre o calor produzido e o calor gasto, obedecendo às leis fundamentais da termodinâmica (PINHEIRO et al, 1995).

O procedimento utilizado neste trabalho é baseado no livro "Eficiência Energética no Uso de Vapor" desenvolvido pela Eletrobrás (2005), e com algumas adaptações encontradas na literatura, englobando pontos de perdas diferentes que também devem ser consideradas.

### 2.3.1.1 Método Direto

É dada pelo quociente entre a energia produzida pela caldeira na forma de vapor e o consumo de energia do combustível. A energia do vapor pode ser definida pelo produto entre a vazão em massa de vapor e o ganho de entalpia observado na água, em sua transformação de água de alimentação em vapor (ELETROBRÁS, 2005).

$$\eta_{MD} = \frac{\dot{m}_v(h_v - h_a)}{\dot{m}_c PCI} \quad (2.1)$$

Onde,

$\eta_{MD}$  - eficiência pelo método direto

$\dot{m}_v$  - vazão mássica de vapor [kg/s]

$h_v$  - entalpia do vapor produzido [kJ/kg]

$h_a$  - entalpia da água de entrada [kJ/kg]

$\dot{m}_c$  - vazão mássica de combustível [kg/s]

PCI - poder calorífico do combustível [kJ/kg]

### 2.3.1.2 Método Indireto

Para determinar o rendimento bruto da caldeira, esse método utiliza a soma das perdas da caldeira. A perda total de calor é obtida pelo somatório das perdas por transferência de calor e pelas perdas associadas aos fluxos que deixam a caldeira, com exceção do fluxo de vapor. Produz um resultado mais preciso que o método direto, uma vez que as perdas representam aproximadamente 10% do calor disponível (ELETROBRÁS, 2005; PINHEIRO et al, 1995).

Considerando a caldeira como o volume de controle, pelo balanço de energia temos,

$$Q_{entra} = Q_{sai} \quad (2.2)$$

E

$$Q_{comb} + Q_{ar} = Q_{útil} + Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 + Q_7 \quad (2.3)$$

onde,

- $Q_{comb}$  - considerado equivalente ao PCI do combustível [kW];
- $Q_{ar}$  - Calor do ar [kW];
- $Q_{útil}$  - calor efetivo gasto para a geração de vapor [kW];
- $Q_1$  - perdas pela chaminé [kW];
- $Q_2$  - perdas de calor devido a combustão química incompleta [kW];
- $Q_3$  - perdas pelo combustível não queimado [kW];
- $Q_4$  - perdas pela umidade do combustível [kW];
- $Q_5$  - perdas por purgas [kW];
- $Q_6$  - perdas associadas à temperatura das cinzas [kW];
- $Q_7$  - perdas por radiação e convecção [kW].

#### 2.3.1.2.1 Calor do ar

O calor fornecido pelo o ar,

$$Q_{ar} = \dot{m}_{ar} * c_{par}(T_{ar} - T_{\infty}) \quad (2.4)$$

onde,

$\dot{m}_{ar}$ - vazão mássica de ar [kg/s]

$c_{par}$  - calor específico do ar [kJ/kg °C]

$T_{ar}$ - Temperatura do ar [°C]

$T_{\infty}$  - Temperatura de referência adotada [°C]

#### 2.3.1.2.2 Perdas por chaminé

A perda de calor com os gases de escape é bastante grande e interfere é uma das que mais interferem no rendimentos da caldeira.

$$Q_1 = \left[ \sum \dot{m}_i * c_{pi} \right] * (T_g - T_{\infty}) \quad (2.5)$$

onde,

$i$  - representa cada gás gerado na combustão

$\dot{m}_i$ -vazão mássica do componente  $i$  formado na combustão [kg/s]

$c_{pi}$  - calor específico médio entre as temperaturas  $T_g$  e  $T_1$  [kJ/kg °C]

$T_g$ - temperatura dos gases na chaminé [°C]

$T_{\infty}$  - temperatura de referência adotada [°C]

Pela conservação da massa, tudo que entra de ar e combustível deve sair, não se misturando com a água de alimentação. E como calor específico dos gases de combustão não difere muito do calor específico do ar, pode-se alterar a equação (2.5) para (STROBEL,2015),

$$Q_1 = (\dot{m}_{ar} + \dot{m}_c) * c_{par} * (T_g - T_\infty) \quad (2.6)$$

em que,

$\dot{m}_{ar}$ - vazão mássica do ar [kg/s];

$\dot{m}_c$ - vazão mássica do combustível [kg/s];

$c_{par}$  - calor específico médio do ar entre as temperaturas  $T_g$  e  $T_\infty$  [kJ/kg°C].

### 2.3.1.2.3 Perdas pelo combustível não queimado

Para o cálculo desse tipo de perda, é normal adotar a análise da quantidade de carbono sem queimar nas cinzas. Com isso, a perda associada ao combustível não convertido presente nas cinzas pode ser estimada por,

$$Q_{2,1} = \dot{m}_{cub} * PCI_C \quad (2.7)$$

onde,

$\dot{m}_{cub}$  - vazão mássica de carbono presente nas cinzas [kg/s]

$PCI_C$  - é o poder calorífico inferior do carbono [33780 kJ/kg]

Na queima de licor negro, é gerado o "smelt", um fundido inorgânico, para calcular a perda de calor dele, usa-se

$$Q_{2,2} = \dot{m}_{smelt} * c_{psmelt} (T_{smelt} - T_\infty) \quad (2.8)$$

onde,

$\dot{m}_{smelt}$  - vazão mássica do smelt [kg/s]

$c_{psmelt}$  - calor específico do smelt [kJ/kg°C]

$T_{smelt}$  - Temperatura do smelt [°C]

$T_\infty$  - Temperatura de referencia [°C]

#### 2.3.1.2.4 Perdas devido a combustão química incompleta

Teoricamente, essa perda não deveria acontecer, pois deve ser fornecido ar em excesso para garantir a combustão completa do combustível,

$$Q_3 = \frac{(\dot{m}_{ar} + \dot{m}_c)}{\rho_g} (126CO + 108H_2 + 358CH_4) \quad (2.9)$$

onde,

$\dot{m}_{ar}$  - vazão mássica de ar para a combustão [kg/s]

$\dot{m}_c$  - vazão mássica de combustível [kg/s]

CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub> - porcentagem volumétrica de gases secos na chaminé

Os valores ligados a cada símbolo de gases representam o poder calorífico de cada um em kJ/m<sup>3</sup>.

#### 2.3.1.2.5 Perdas pela umidade do combustível

Todo combustível tem uma porcentagem de umidade que é vaporizada e deixa a caldeira na forma de vapor superaquecido. Considerando que sua temperatura é igual à dos gases resultantes da combustão e sua pressão parcial como sendo 10kPa (LIMA, 2003), tem-se

$$Q_4 = \dot{m}_u (h_v - h'_a) \quad (2.10)$$

onde,

$\dot{m}_u$  - vazão mássica da umidade do combustível [kg/s]

$h_v$  - entalpia do vapor superaquecido [kg/kJ]

$h'_a$  - entalpia do líquido saturado na temperatura de admissão do ar [kJ/kg]

#### 2.3.1.2.6 Perdas por purgas

Esta relacionada à perda de energia causada pelo fluxo de água retirada na purga, realizada para manter a concentração de sais na água da caldeira em níveis toleráveis, dado pela seguinte equação:

$$Q_5 = \dot{m}_p * c_{pa} (T_p - T_\infty) \quad (2.11)$$

Onde,

$\dot{m}_p$  - vazão média de água purgada [kg/s]

$c_{pa}$  - calor específico da água no estado líquido [kJ/kg $^{\circ}$ C];

$T_p$  - temperatura de saturação da água na pressão da caldeira [ $^{\circ}$ C].

#### 2.3.1.2.7 Perdas associadas à temperatura das cinzas

Na queima do combustível, a saída de cinzas implica perdas que devem ser calculadas para cada caso específico. Podemos calcular esse valor pela equação 2.12.

$$Q_6 = \dot{m}_R * 1770 \quad (2.12)$$

em que,

$\dot{m}_R$  - vazão mássica de cinza [kg/s];

1170 - valor médio aproximado da entalpia sensível das cinzas [kJ/kg].

#### 2.3.1.2.8 Perdas por radiação e convecção

Segundo a ELETROBRÁS (2005) em seu livro “**Eficiência Energética no uso de vapor**”, a determinação das perdas por radiação e convecção pelo costado das caldeiras é bem complexa, devido às medições necessária. Logo, para estas perdas é adotado uma variação entre 1% a 4% da energia fornecida. O valor da energia fornecida pode ser considerada, como sendo igual ao poder calorífico inferior do combustível.

#### 2.3.1.2.9 Perdas totais

Com a determinação das perdas que pode ocorrer, a eficiência de uma caldeira pelo método indireto é dado por

$$\eta_{MI} = 1 - \frac{\sum Perdas}{q_d} \quad (2.13)$$

### 2.3.2 Consumo ótimo de combustível

Para calcular as energias trocadas entre o combustível e água no interior da fornalha, considera-se o calor de saída, ou seja, a diferença de entalpia entre a água e o vapor, à mesma temperatura. O calor consumido pela água para a conversão em vapor é calculado por,

$$Q_s = \dot{m}_v(h_v - h_a) \quad (2.14)$$

Em que,

$\dot{m}_v$  - vazão do vapor em [kg/s]

$h_v$  - entalpia do vapor [kJ/kg]

$h_a$  - entalpia da água [kJ/kg]

Para encontrar o consumo ótimo do combustível, pode-se utilizar a seguinte equação,

$$Comb = \frac{Q_s}{PCI} \quad (2.15)$$

### 2.3.3 Excesso de ar

Uma combustão necessita de uma quantidade de ar estequiométrica, conhecida de ar teórico. Mas para que ela ocorra completamente é necessário um quantidade excessiva de ar, de maneira a manter um teor suficiente de oxigênio até o final da chama, a tabela 1, representa os valores usuais do coeficiente de excesso de ar, em relação ao tipo de combustível queimado (PINHEIRO et al, 1995).

O coeficiente de excesso de ar ( $\alpha$ ) é a razão entre a quantidade total de ar utilizada na combustão ( $V_{ar}$ ) e a quantidade de ar estequiométrica ( $V_{ar}^o$ ).

$$\alpha = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^o} \quad (2.16)$$

É uma forma de expressar a relação ar/combustível, o valor do coeficiente de excesso de ar pode ser calculado a partir da análise da composição volumétrica dos produtos de combustão,

$$\alpha = \frac{\%CO_{2esquiométrico}}{\%CO_2} \quad (2.17)$$

Ou



$$\alpha = \frac{20,9}{\left[20,9 - \left(\%O_2 - \frac{\%CO}{2}\right)\right]} \quad (2.18)$$

Sendo um fator determinante da eficiência da combustão, pois ele controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Logo, um grande excesso de ar é indesejável, pois diminui a temperatura da chama e aumenta as perdas de calor devido a entalpia dos gases efluentes, reduzindo assim a eficiência térmica da caldeira e diminuir o comprimento da chama. Mas se o excesso de ar for baixa pode resultar em uma combustão incompleta e na formação de CO, fuligem e fumaça, e também possibilitar a acumulação de combustível não queimado, o que pode causar um risco de explosão.

**Tabela 1 – Valores usuais do coeficiente de excesso de ar Fonte**

<b>Combustível</b>	<b>Tipo de fornalha ou queimador</b>	$\alpha$
Carvão Pulverizado	Aquatubular completa	1,15 – 1,20
	Aquatubular parcial fundo seco	1,15 – 1,40
Carvão Britado	Fornalha ciclone	1,10 – 1,15
Carvão	Grelha fixa	1,30 – 1,60
	Grelha vibratória	1,30 – 1,60
	Grelha rotativa	1,15 – 1,50
	Grelha fixa alimentação por baixo	1,20 – 1,50
Óleo Combustível	Queimadores de óleo tipo registro	1,05 – 1,15
	Queimadores multicomcombustível	1,05 – 1,20
Resíduo Ácido	Queimadores chama plana a vapor	1,10 – 1,15
Gás Natural	Queimadores tipo registro	1,05 – 1,10
Gás Coqueira	Queimadores multicomcombustível	1,07 – 1,12
Gás Alto-forno	Queimadores de boca intertubos	1,15 – 1,18
Madeira	Grelha	1,20 – 1,25
Bagaço	Todas as fornalhas	1,25 – 1,35
Licor Negro	Fornalhas recuperação Kraft e Soda	1,05 – 1,07

**Fonte: Adaptado de CONSIDINE, 1977**

## 2.4 DIMENSIONAMENTO DE TUBULAÇÃO

Zattoni (2008) define tubo como um conduto fechado, oco, geralmente circular destinado ao transporte de fluidos. E tubulação como sendo o conjunto de tubos, conexões, válvulas e acessórios formando uma linha para a condução de fluidos.

As tubulações de vapor, são normalmente submetidas à pressões de projeto e a uma variação significativa de temperatura. Com isso, estão sujeitas a dilatações e contrações, devido a troca térmica sofrida durante o processo, exigindo assim uma análise da flexibilidade da rede, como o uso de juntas de expansão. Para evitar corrosões e ferrugem, as tubulações devem preferencialmente ser de aço

carbono ou cobre. Além disso, o uso de isolamento térmico é indispensável, pois por exemplo, garante por perdas mínimas de calor por radiação( TELLES, 1999).

O dimensionamento de uma tubulação para transporte de vapor deve possuir um diâmetro que esteja de acordo com a sua vazão. Pois, uma tubulação subdimensionada, a velocidade é intensificada podendo ocasionar um maior desgaste, um risco maior de falta de vapor, golpes de ariete e cavitação. Por outro lado, um superdimensionamento no diâmetro encarece o projeto com materiais e isolamentos, e também podem aumentar a formação de condensado. Então é fundamental um equilíbrio no projeto de tubulações (DAUMICHEN, 1975).

Existem dois critérios para o dimensionamento de tubulações: velocidade ou perda de carga. Os cálculos com base na velocidade consideram o volume específico do vapor e a área da tubulação. Porém esse tipo de dimensionamento não considera a extensão da tubulação, que quanto mais longa for, menor será a pressão disponível no ponto de consumo. Com isso, para atingir o máximo aproveitamento do vapor, o uso do método da perda de carga no dimensionamento de tubulações de vapor é mais indicado, pois fornece dados de pressão em qualquer ponto da tubulação (IBP, 1975).

Adotando um diâmetro base para o começo dos cálculos, o seguinte passo é calcular a velocidade do fluido utilizando a seguinte equação,

$$Q = \rho * v * A \quad (2.19)$$

onde,

Q - vazão do fluido [kg/s];

$\rho$  - densidade do fluido [kg/m<sup>3</sup>];

A - área da tudo [m<sup>2</sup>];

v - velocidade do fluido [m/s].

Uma velocidade mais alta implica em uma perda maior por atrito com aumento de erosão da parede do tubo e um aumento do ruído. O fluxo de vapor em um tubo carrega uma perda de pressão devido ao atrito vapor/parede, o que é bastante evidente na queda de pressão ao longo do tubo.

A equação 2.20 é a perda de carga de Darcy-Weisbach, é a mais precisa e utilizada.

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^3}{2g} \quad (2.20)$$

onde,

$h_f$  - perda por atrito

$f$  - fator de atrito de Darcy-Weisbach [adimensional]

$L$  - comprimento da tubulação [m]

$v$  - velocidade do fluido no interior do tubo [m/s]

$g$  - aceleração da gravidade do tubo [m/s<sup>2</sup>]

$D$  - diâmetro interno do tubo [m]

Para o fator de atrito foi utilizado a equação de Sousa Cunha-Maques de 1999,

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left[ \frac{k}{3,7 D} - \frac{5,16}{Re} * \log_{10} \left( \frac{k}{3,7 D} - \frac{5,09}{Re^{0,87}} \right) \right] \quad (2.21)$$

onde,

$f$  - fator de atrito;

$Re$  - número de Reynolds [adimensional];

$k$  - rugosidade equivalente da parede do tubo [m];

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (2.22)$$

no qual,

$D$  - diâmetro interno do tubo [m];

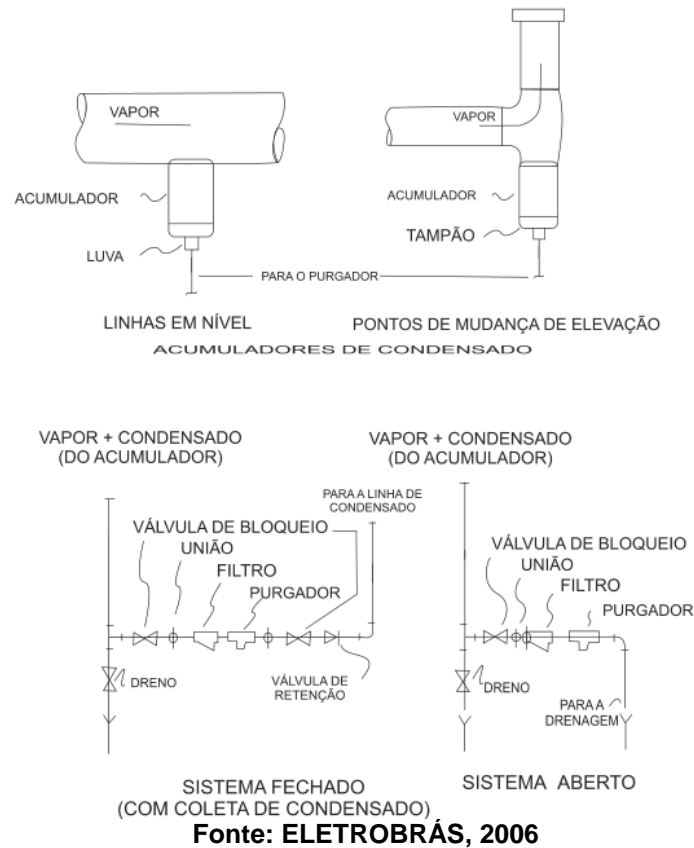
$\mu$  - viscosidade dinâmica do vapor [m<sup>2</sup>/s].

## 2.5 PURGADORES

O emprego de purgadores se dá em dois casos típicos (ELETROBRAS, 2005): Eliminação do condensado formado nas tubulações de vapor em geral; e Reter vapor nos aparelhos de aquecimento a vapor, deixando sair apenas o condensado.

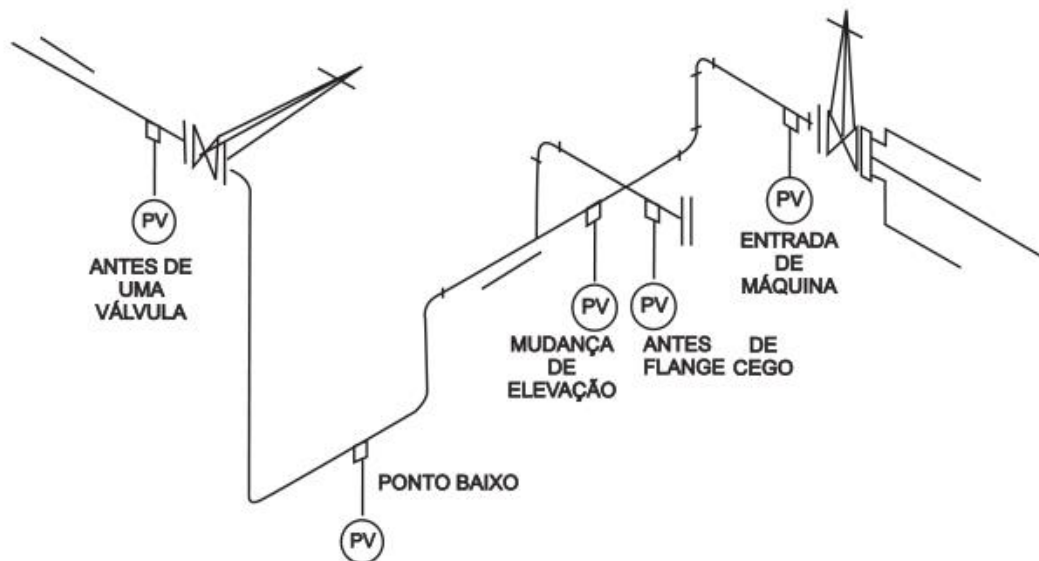
Quando os purgadores são instalados em uma derivação da tubulação, sua função é de drenar a linha de vapor. Essa derivação deve sair do fundo do acumulador de condensado (*drip-pocket*) que é instalada na parte inferior da tubulação de vapor, pois o condensado deve ser capaz de correr por gravidade para dentro do acumulador. A tubulação de entrada de um purgador deve estar ligada diretamente ao fundo do acumulador. A figura 3, representa a instalação de um purgador de drenagem (ELETROBRAS, 2005).

**Figura 3 – Purgador para drenagem de linhas de vapor**



Os principais fatores que influenciam na decisão de qual purgador utilizar são (NOGUEIRA, 2005): Pressão e temperatura do vapor na entrada do purgador; Natureza da instalação e finalidade do purgador; Pressão e temperatura do condensado; Pressão na descarga do purgador; Quantidade de condensado a ser eliminado; Ação corrosiva ou erosiva do vapor ou condensado; Facilidade de manutenção; Os purgadores de drenagem de condensado devem ser colocados obrigatoriamente nos seguintes pontos da extensão da tubulação de vapor, como mostra a figura 4 (ELETROBRAS,2005).

**Figura 4 – Pontos de colocação de purgadores para drenagem de linhas de vapor**



Fonte: ELETROBRÁS, 2006

Os pontos de colocação de purgadores segundo a Eletrobrás (2005) são: Em todos os extremos (sentido do fluxo) fechados com tampões, flanges cegos, entre outros; Em todos os pontos baixos, e todos os de aumento de elevação, colocados na elevação mais baixa; Trechos em nível deve ser colocado um purgador em cada 100 m a 250 m, e quanto mais baixa for a pressão do vapor, mais purgadores deve-se colocar na linha; Antes de válvulas de bloqueio, válvulas de retenção, válvulas de controle e válvulas redutoras de pressão, nesse caso os purgadores são empregados para eliminar o condensado que se forma quando a válvula estiver fechada; Próximo a entrada de qualquer máquina de vapor, para evitar a penetração de condensado na máquina.

Existem três tipos de purgadores que diferem entre si principalmente pela forma de acionamento. São classificados em: Termostáticos, mecânicos e termodinâmicas (TELES, 1999).

Os termostáticos são acionados pela diferença de temperatura entre o vapor e o condensado, sensibilizado por um elemento termostático. Para o condensado ser eliminado da linha, ele deve estar abaixo da temperatura de saturação, ou seja, os purgadores vão reter esse condensado até que perca todo o seu calor sensível (TELLES, 1999; PALACIOS, 2010).

Os purgadores mecânicos operam pela diferença de densidade entre o vapor e o condensado. Essa diferença ocasiona a movimentação de um elemento em um determinado sentido, atuando sobre o orifício de descarga. Existem o purgador mecânico de boiá livre, de boiá e alavanca, de balde aberto e de balde invertido (TELLES, 1999; PALACIOS, 2010).

Já os purgadores termodinâmicos são baseados no princípio de variação de pressão estática e dinâmica de Bernoulli, em função da velocidade. Para operar uma válvula, eles utilizam a diferença de energia cinética entre o vapor e o condensado, isso ocorre em um disco que bloqueia a passagem com a alta velocidade do evaporado e abre com a baixa velocidade do condensado (TELLES, 1999; PALACIOS, 2010).

## 2.6 ISOLAMENTO TÉRMICO

Segundo Incropera (et al, 2008), a transferência de calor por condução térmica ocorre devido a diferença de temperatura entre o meio externo e a temperatura do vapor. A quantidade de calor transferido é função do gradiente de temperatura do ambiente, da espessura da tubulação e da sua constante de condutividade térmica.

Em uma linha de vapor com temperaturas diferentes da ambiente, sempre ocorrerá trocas de calor o que afeta a temperatura do fluido e resulta em uma perda de energia do mesmo. Para reduzir esse fenômeno, normalmente é empregado uma camada de material de baixa condutividade térmica sobre as superfícies de troca. Eles são compostos por inúmeros espaços microscópicos com ar, formando uma barreira à transmissão de calor (MILCENT, 2006; SARTORELLI, 2009).

O isolamento térmico também auxilia na segurança do trabalho, pois reduz a temperatura da superfície exterior da tubulação o que diminui o risco de acidentes. Em relação ao conforto térmico de um ambiente, o isolamento ajuda na redução da irradiação de calor nos espaços de trabalho (U.S DEPARTMENT OF ENERGY, 2000).

É de extrema importância que todas as superfícies que podem perder calor sejam isoladas, incluindo tubulações, válvulas, flanges, conexões e entre outras. A falta de isolamento térmico ou isolamento deficiente ocasiona queima

desnecessária do combustível e a formação de uma grande camada de condensado, afetando a qualidade do vapor (IBP, 1975).

Algumas características que o isolante deve ter(MILCENT,2006): Resistência às temperaturas as quais será submetido; Não toxidez; Facilidade de aplicação; Resistência mecânica.





### 3 METODOLOGIA

Visando identificar as perdas energéticas ligados ao modo operacional atual, este trabalho busca propor uma solução primária para a racionalização do vapor e minimizar os desperdícios de energia. O desenvolvimento deste trabalho consistiu das seguintes etapas:

A - Identificação do processo: Objetivo dessa etapa foi identificar o sistema de geração e distribuição de vapor, levantando os pontos a ser estudados. Para este trabalho foi escolhido como foco de estudo, a caldeira de recuperação, a caldeira de força e uma linha de distribuição de vapor de 11  $kgf/cm^2$ ;

B - Coleta de dados: Nesta etapa o objetivo foi obter informações temporais no sistema de armazenamento de dados históricos do sistema, levando as grandezas mais importantes para avaliação energética do sistema;

C - Balanço energético: O objetivo dessa etapa foi a análise do rendimento das caldeiras pelo método direto e indireto. E quantificar as perdas dos sistemas.

D - Análise da linha de 11  $kgf/cm^2$  para Celulose e Máquina de Papel: Nesta etapa foi identificar o melhor diâmetro em relação a perda de carga, a melhor localização dos purgadores e o melhor isolamento para a nova linha proposta. E sugerir novos pontos de purgadores para a linha existente.

E - Proposta de solução: Nessa etapa foi proposta uma solução de gerenciamento e geração e distribuição de vapor.

#### 3.1 INFORMAÇÕES DO SISTEMA

##### 3.1.1 Fábrica em estudo

A fábrica de papel e celulose em estudo opera em 4 níveis de vapor diferentes: 63, 42, 11 e 2  $kgf/cm^2$ . Cada nível de vapor possui seu respectivo coletor, que são vasos de pressão com a função de armazenamento e distribuição. O vapor é produzido através de duas caldeiras que operam continuamente para gerar a quantidade necessária de vapor para a fábrica, a Caldeira de Recuperação e a Caldeira de Força.

A Caldeira de Recuperação tem capacidade de queimar 850 toneladas por dia de sólidos secos, gerando 145 ton/h de vapor a 63  $kgf/cm^2$  e apresenta uma configuração aquatubular. Essa caldeira tem como objetivos: recuperar químicos utilizados no processo de fabricação de papel, gerar vapor para alimentar Turbo Geradores e outros departamentos da fábrica. Seu combustível é o licor negro com uma porcentagem de 72% de sólidos. A caldeira de recuperação conta com três entradas de ar, a do ar primário, secundário e terciário. E também existem 28 sopradores para forçar a retirada das partículas que ficam nos gases de combustão em quatro pontos de abertura, no superaquecedor, no convector, no economizador I, no economizador. O vapor retirado no processo é enviado para os superaquecedores. Esta região tubular está posicionada mais próxima a fornalha, fazendo com que o vapor passe de saturado para superaquecido. Após esse superaquecimento, o vapor é enviado para o coletor de vapor de 63  $kgf/cm^2$ . Do coletor, o vapor é enviado para as demais áreas das fábricas, passando por válvulas redutoras de 42, 11 e 2  $kgf/cm^2$ , elas adequam o vapor a necessidade de cada área.

A Caldeira de Força apresenta uma capacidade nominal de geração de vapor de 140 ton/h, e uma pressão de 63  $kgf/cm^2$ . Utiliza como combustível biomassa, material sólido composto por casca de madeira e cavacos. É uma caldeira que utiliza areia para a formação de um leito fluidizado e possui uma configuração aquatubular. A biomassa, é composta basicamente por rejeitos de madeira, como cavacos e cascas do processo de descascamento e picagem, e da compra de terceiros deste material. Existem duas entradas de ar, o ar primário é responsável pela fluidização do leito e início da combustão, e ar secundário, atuando como finalizador da combustão. Por ser abastecida com um combustível sólido, ocorre uma grande geração de cinzas na caldeira. As cinzas são arrastadas junto com os gases de combustão. Parte delas caem, por força da gravidade e perda de velocidade, na passagem dos gases pelos pré aquecedores de ar e economizadores. Roscas fazem o transporte delas até o Silo de cinza. Para garantir a retirada do particulado sólido restante, os gases são encaminhados para o precipitador. Ao sair dos superaquecedores, o vapor vai para o coletor de 63  $kgf/cm^2$ . Para posteriormente ir para as áreas de demanda, passando por válvulas redutoras para adequar o vapor à necessidade requerida.

### 3.1.1 Demanda de vapor

Os principais usos do vapor na fábrica em estudo são:

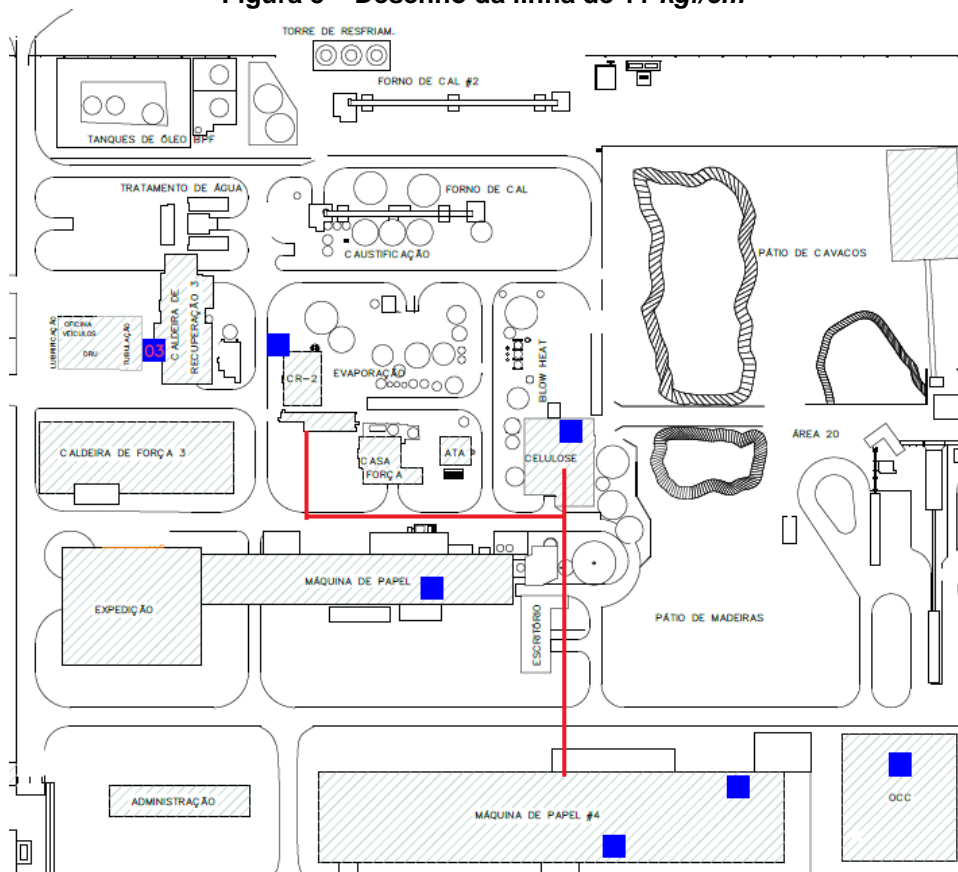
- Vapor de 63  $\text{kgf/cm}^2$ : Turbo Gerador (Produção de Energia Elétrica);
- Vapor de 42  $\text{kgf/cm}^2$ : Turbo Gerador e Termo-Compressores da Máquina de Papel;
- Vapor de  $\text{kgf/cm}^2$ : Cozimento da celulose, grupo de secadores da Máquina de Papel e operações auxiliares;
- Vapor de 2  $\text{kgf/cm}^2$ : Vapor utilizado na evaporação e concentração.

### 3.1.2 Linha de vapor em estudo

Ao sair do superaquecedor das caldeiras, o vapor vai para o coletor de 63  $\text{kgf/cm}^2$ . Para posteriormente ir para as áreas de demanda, passando por válvulas redutoras para adequar o vapor à necessidade requerida. Existem dois coletores para cada pressão de vapor.

O vapor de 11  $\text{kgf/cm}^2$  é usado principalmente no cozimento da madeira no departamento da celulose e nos secadores da máquina de papel. Existe uma linha que leva o vapor dessa pressão para os dois departamentos, como é mostrado na figura 5, no Anexo A encontra-se o desenho isométrico e a linha vermelha representa a linha de vapor em estudo.

**Figura 5 – Desenho da linha de 11  $kgf/cm^2$**



Fonte: Adaptado Empresa em estudo, 2016

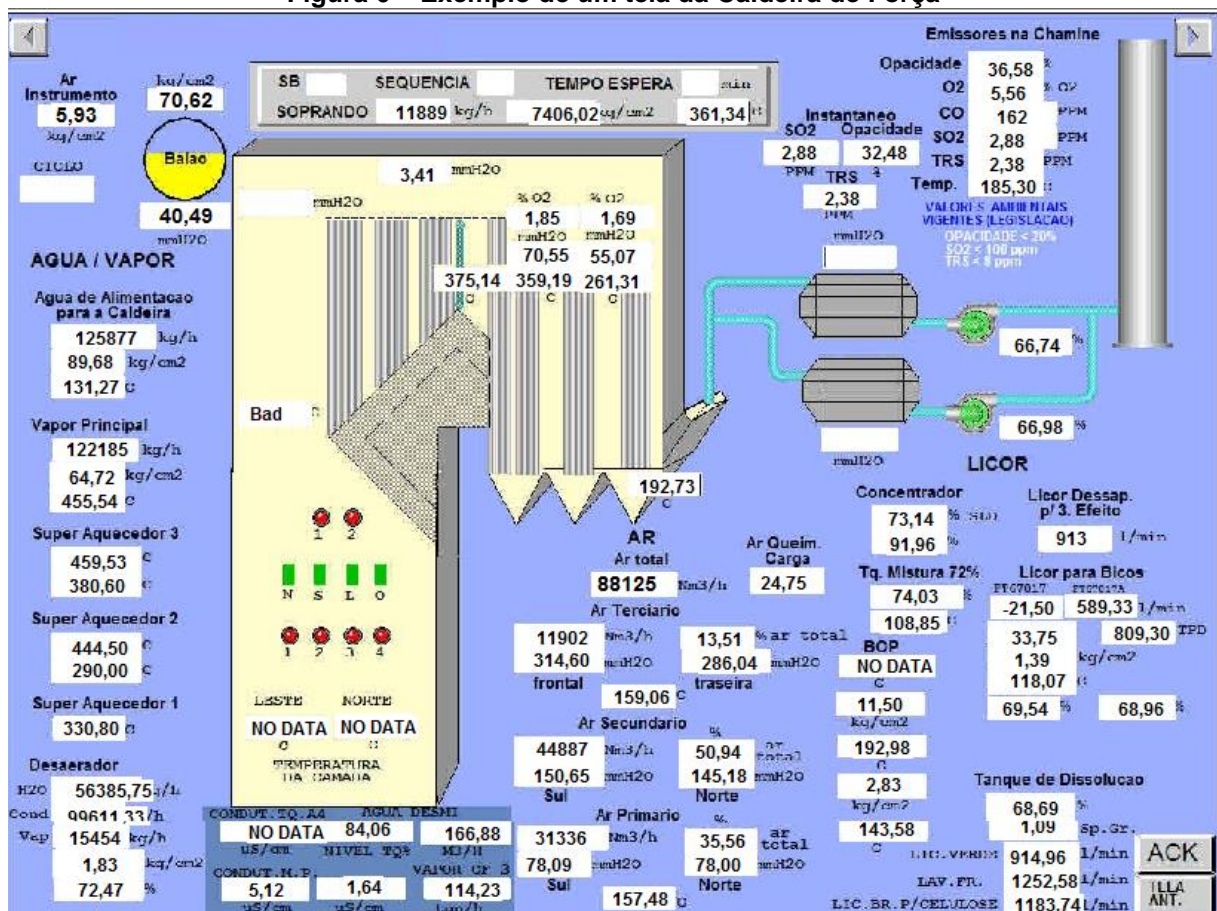
A produção de celulose é efetuada em regime de batelada, no processo de cozimento da madeira, ela é aquecida de acordo com um programa pré-determinado, no qual a temperatura é elevada gradualmente, durante 50 a 90 min, até atingir um determinado valor durante um período de tempo (CASTRO, 2009). Por ser em batelada, o processo da celulose da empresa em estudo é bem instável, muitas vezes ela reduz o consumo de vapor ou até mesmo aumenta, ocasionando variações na linha. Por ser a mesma linha de vapor, essas variações interferem na produção de papel da máquina de papel 4 causando mais uma instabilidade no processo. É fundamental para a qualidade do papel que a pressão e vazão do vapor nos secadores seja controlada e precisa, por exemplo a pressão do vapor nos secadores deve ser de 11  $kgf/cm^2$ , pois se tiver muito vapor entrando no secadores, o papel pode ficar ressecado, ou se estiver entrando pouco vapor o papel pode ficar úmido, em ambos os casos o papel será classificado como refugo e dispensado do processo.

Responsável pelo transporte do vapor aos pontos de consumo, o sistema de distribuição além de regular a entrega de vapor, deve responder as mudanças de pressão e temperatura do processo. Logo, para possuir um rendimento eficiente, o projeto de dimensionamento deve ser cuidadosamente realizado seguido de manutenções e vistorias frequentes (SILVA, 2013),

### 3.2 COLETA DE DADOS

A coleta das variáveis que englobam a produção de vapor na indústria em estudo, foi realizado através do sistema digital de controle distribuído, o SDCD, que é composto basicamente por um pacote integrado de dispositivos que se completam no cumprimento de suas principais funções, o controle e a supervisão do processo produtivo da unidade. A figura 6 é uma tela exemplo do emprego do SDCD.

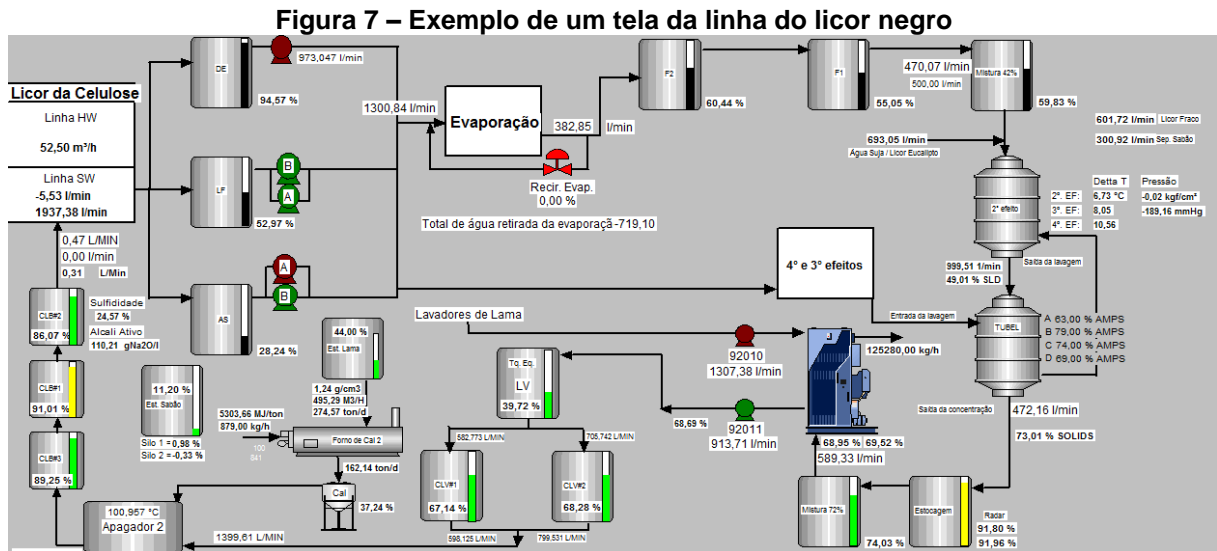
Figura 6 – Exemplo de um tela da Caldeira de Força



Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016

Todo o sistema do processo é composto por sensores e atuadores de diversos tipos, unidades remotas e outros componentes. Eles estão conectados a

diversas interfaces gráficas que são basicamente telas com figuras, animações, ícones, indicações de alarmes que representam toda a sua linha de produção, quando os equipamentos que ela possui. Ou seja, cada equipamento possui telas de controle com todas as informações necessárias para um bom funcionamento. A figura 7 é um exemplo de tela do sistema completo, do licor negro.



Todos os equipamentos, sensores, atuadores são calibrados pelo departamento especializado nesse assunto, em um tempo determinado pela norma da empresa. Todos os dados são armazenados em um banco de dados por um período de 5 anos e são identificados por uma "TAG"(etiqueta). São armazenados a unidade, a descrição e o valor de cada dados no sistema.

### 3.2.1 Caldeira de recuperação

Com o auxílio do banco de dados, os dados gerais coletados da caldeira de recuperação, são apresentados na seguinte tabela.

**Tabela 2 – Dados da caldeira de recuperação**

Pressão do vapor	64,6 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura do vapor	457,76°C
Vazão do Vapor	41,14kg/s
Vazão do com bustível (Licor Negro)	16,54 kg/s
Umidade do combustivel	31,7%
Vazão da água de alimentação	41,34 kg/s
Pressão da água de alimentação	92,2 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura da água de alimentação	132,84°C
Vazão descarga continua (Purga)	0,713 kg/s
Vazão total do ar	47,26 kg/s
Temperatura dos gases de escape	210,77°C
Vazão de smelt	7,3 kg/s
Quantidade de cinzas gerada por dia	47,2 ton

Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016

O licor negro possui um alto poder calorífico, sendo que seu PCI é da ordem de 11966,24 KJ/kg, variando de acordo com a porcentagem de reagentes químicos, celulose, hemicelulose, sais de sódio e cálcio e será superior quando o teor de lignina e extrativos forem maior (FORTUNATTO, 2014; CARDO, 1998; QUIRINO, 2005; CARDOSO, 2012).

A literatura sobre a queima de licor negro, descreve a composição química do smelt na seguinte tabela. Considerando uma temperatura de referência foi adotado  $T_{\infty}=25^{\circ}\text{C}$  e  $T=900^{\circ}\text{C}$  a temperatura do smelt.

**Tabela 3 – Composição química e porcentagem em massa dos compostos que constituem o smelt**

Componente	Vazão (kg/s)	Massa molar (kg/kmol)
Carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	5,6222	105,989
Sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )	1,5742	78,044
Sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	0,1049	142,041

Fonte: Adaptado de ZSARGUT, 2005

**Tabela 4 – Composição química e porcentagem em massa dos compostos que constituem o smelt**

Compostos	$C_p$ (kJ/kmolK)
Carbonato de sódio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ )	28,9
Sulfeto de sódio ( $\text{Na}_2\text{S}$ )	72,4
Sulfato de sódio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ )	32,8

Fonte: Adaptado de PERRY, 1999

Segundo Isenmann (2016), as cinzas da caldeira de recuperação têm na média a seguinte composição,

**Tabela 5 – Composição das cinzas da caldeira de recuperação ( valores médios mássicos)**

$\text{K}_2\text{SO}_4$	$\text{Na}_2\text{SO}_4$	$\text{NaCl}$	$\text{Na}_2\text{CO}_3$
%	%	%	%
13	61	17	9

Fonte: Adaptado de ISENMANN, 2016

### 3.2.2 Caldeira de força

Com o auxílio do banco de dados, os dados gerais coletados da caldeira de força, são apresentados na seguinte tabela.

**Tabela 6 – Dados da caldeira de força**

Pressão do vapor	62,5 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura do vapor	455,28°C
Vazão do Vapor	20,18 kg/s
Vazão do com bustível (Licor Negro)	9,17 kg/s
Umidade do combustível	11 %
Vazão da água de alimentação	41,84 kg/s
Pressão da água de alimentação	93,31 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura da água de alimentação	223,67°C
Vazão descarga continua (Purga)	0,585 kg/s
Vazão total do ar	48,65 kg/s
Temperatura dos gases de escape	138,63°C
Quantidade de cinzas gerada por dia	61,63 ton

Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016

A empresa realizou análise da biomassa e encontrou o seguinte poder calorífico que é mostrado na tabela 7.

**Tabela 7 – Poder Calorífico do Combustível**

<b>Tipo</b>	<b>PCI (kJ/kg)</b>	<b>PCS (kJ/kg)</b>
Casca de Eucalipto	8493,52	9162,96

Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016

Vogel (et al, 2003) descreve a composição das cinzas da biomassa na seguinte tabela 8.

**Tabela 8 – Características químicas da cinza da biomassa**

pH (H <sub>2</sub> O)	12,3
Umidade perdida a 75°C (%)	60,0
Carbono orgânico (g/kg)	135,1
Nitrogênio total (g/kg)	3,93
Fósforo total (g/kg)	3,50
Potássio total (g/kg)	17,48
Cálcio total (g/kg)	64,08
Magnésio total (g/kg)	7,94
Relação C/N ( C orgânico e N total)	34/1

Fonte: Adaptado de VOGEL et al, 2003



## 4 RESULTADOS

A partir dos conhecimentos apresentados nos capítulos anteriores, foram encontrados os seguintes resultados descritos.

### 4.1 BALANÇO ENERGÉTICO

#### 4.1.1 Caldeira de recuperação

Utilizando a equação 2.1 foi encontrada a eficiência da caldeira pelo método direto,

$$\eta_{MD} = 0,4054$$

$$\eta_{MD} = 40,54\%$$

Os principais poluentes da queima da biomassa para a geração de vapor, são: Particulado, CO, TRS, SO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

O calor fornecido pelo ar,

$$Q_{ar} = 7256,09 \text{ kW}$$

A tabela 9 apresenta o resultado a da aplicação do equacionamento utilizando os parâmetros coletados, evidenciando as perdas energéticas ao longo do processo,

**Tabela 9 – Perdas da caldeira de recuperação**

<b>Perdas</b>	<b>kW</b>	<b>%</b>	<b>Equação</b>
Perdas pela chaminé	11765,56	65,34	2.6
Perdas pela combustão química incompleta	3,101	0,02	2.9
Perdas pelo combustível não queimado	2634,3	14,63	2.7/2.8
Perdas pela umidade do combustível	2301,77	12,78	2.10
Perdas por purgas	180,27	1,00	2.11
Perdas associadas à temperatura das cinzas	643,5	3,57	2.12
Perdas por radiação e convecção	478,65	2,66	4% PCI
Total das perdas	18007,15	100	-----

Fonte: Autoria própria, 2016

Aplicando os dados da tabela 9 ao cálculo da eficiência através do método indireto, temos:

$$\eta_{MD} = 0,9090$$

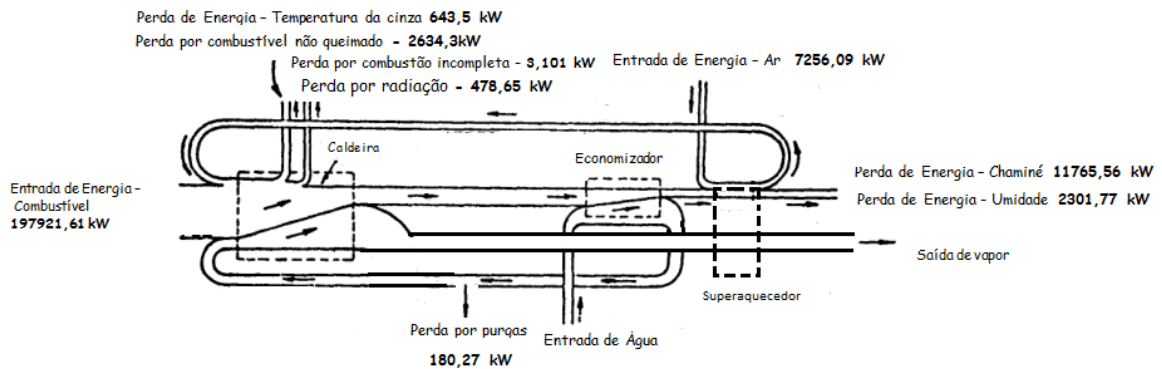
$$\eta_{MD} = 90,90\%$$

Consumo ótimo de combustível, ou seja, o necessário para não ter nenhuma perda em relação ao seu consumo é de,

$$\text{Combustível} = 6,7 \text{ kg/s}$$

A figuras 8, é o diagrama de Sankey representando o balanço energético da caldeira, englobando a entrada e suas saídas, até seu objetivo final, a geração do vapor.

**Figura 8 – Diagrama de Sankey da caldeira de Recuperação**



Fonte: Autoria própria, 2016

O balanço energético do economizador foi encontrado a partir dos seguintes dados,

**Tabela 10 – Dados do economizador**

Temperatura da água de alimentação antes do economizador	133,84°C
Temperatura da água de alimentação depois do economizador	263,26°C

Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016

$$Q_{\text{economizador}} = 24303,37 \text{ kW}$$

E o balanço energético do superaquecedor foi encontrado a partir dos seguintes dados,

**Tabela 11 – Dados do superaquecedor**

Temperatura do vapor antes do superaquecedor	177,09°C
Pressão do vapor antes do superaquecedor	9,56 Kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura do vapor depois do superaquecedor	457,76°C
Pressão do vapor depois do superaquecedor	64,6 kgf/cm <sup>2</sup>

Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016

$$Q_{\text{superaquecedor}} = 22188,04 \text{ kW}$$

#### 4.1.2 Caldeira de força

Utilizando a equação 2.1 foi encontrada a eficiência da caldeira pelo método direto,

$$\eta_{MD} = 0,503$$

$$\eta_{MD} = 50,3\%$$

Os principais poluentes da queima da biomassa para a geração de vapor, são: NO<sub>x</sub>, CO, SO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>.

O calor fornecido pelo ar,

$$Q_{ar} = 7455,68 \text{ kW}$$

A Tabela 12 apresenta as perdas energéticas, ao longo do processo para o cálculo da eficiência, utilizando o método indireto

**Tabela 12 – Perdas na caldeira de força**

<b>Perdas</b>	<b>kW</b>	<b>%</b>	<b>Equação</b>
Perdas pela chaminé	11765,56	65,34	2.6
Perdas pela combustão química incompleta	3,101	0,02	2.9
Perdas pelo combustível não queimado	2634,3	14,63	2.7
Perdas pela umidade do combustível	2301,77	12,78	2.10
Perdas por purgas	180,27	1,00	2.11
Perdas associadas à temperatura das cinzas	643,5	3,57	2.12
Perdas por radiação e convecção	478,65	2,66	4% PCI
Total das perdas	18007,15	100	-----

Fonte: Autoria própria, 2016

Aplicando os dados da Tabela 12 ao cálculo da eficiência através do método indireto, temos:

$$\eta_{MI} = 0,7971$$

$$\eta_{MD} = 79,71\%$$

Considerando que o método indireto é o mais preciso, pois engloba em seu cálculo parâmetros que interferem diretamente no processo da geração do vapor, a caldeira de biomassa apresenta uma eficiência relativamente boa.

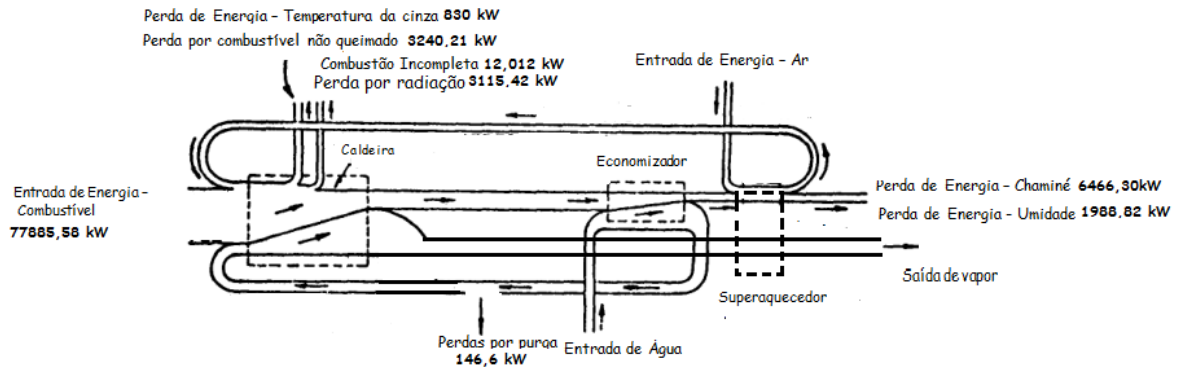
E o consumo ótimo de combustível é de,

$$\text{Combustível} = 4,61 \text{ kg/s}$$

A empresa utiliza 5 kg/s de combustível a mais do que precisa, mostrando um desperdício de fonte de energia, e recurso.

A figura 9, é o diagrama de Sankey representando o balanço energético da caldeira, englobando a entrada e suas saídas, até seu objetivo final, a geração do vapor.

**Figura 9 – Diagrama de Sankey da caldeira de força**



**Autoria própria,2016**

O balanço energético do economizador foi encontrado a partir dos seguintes dados,

**Tabela 13 – Dados do economizador**

Temperatura da água de alimentação antes do economizador	130°C
Temperatura da água de alimentação depois do economizador	225°C

**Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016**

$$Q_{\text{economizador}} = 17597,08 \text{ kW}$$

E o balanço energético do superaquecedor foi encontrado a partir dos seguintes dados,

**Tabela 14 – Dados do superaquecedor**

Temperatura do vapor antes do superaquecedor	259,4°C
Pressão do vapor antes do superaquecedor	44,5 Kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura do vapor depois do superaquecedor	455,28°C
Pressão do vapor depois do superaquecedor	62,55kgf/cm <sup>2</sup>

**Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016**

$$Q_{\text{superaquecedor}} = 10426,49 \text{ kW}$$

#### 4.1.3 Excesso de Ar

A maior perda das caldeiras é em relação a temperatura dos gases de escape da chaminé, vale lembrar que existem leis que monitoram a temperatura e a vazão desses gases. Essa perda pode ser relacionada com o excesso de ar que a empresa utiliza.

As tabelas 15 e 16 representam os valores de excesso de ar de 15 dias no mês de agosto do ano de 2016, que foram encontrados na aplicação da equação 2.19.

**Tabela 15 – Coeficiente de excesso de ar da caldeira de recuperação**

<b>Dia</b>	<b><math>\alpha</math></b>
01/Agosto	1,28
02/Agosto	1,36
03/Agosto	1,24
04/Agosto	1,51
05/Agosto	1,21
06/Agosto	1,23
07/Agosto	1,24
08/Agosto	1,25
09/Agosto	1,25
10/Agosto	1,26
11/Agosto	1,26
12/Agosto	1,26
13/Agosto	1,45
14/Agosto	1,25

**Fonte: Autoria própria, 2016**

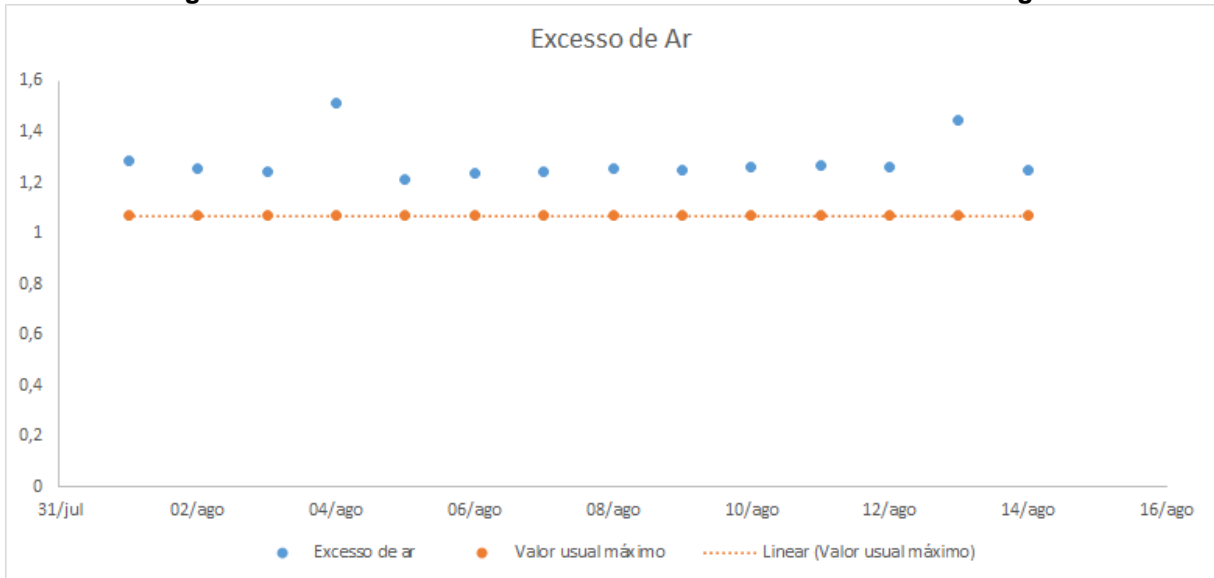
**Tabela 16 – Coeficiente de excesso de ar da caldeira de força**

<b>Dia</b>	<b><math>\alpha</math></b>
01/Agosto	1,28
02/Agosto	1,36
03/Agosto	1,24
04/Agosto	1,51
05/Agosto	1,21
06/Agosto	1,23
07/Agosto	1,24
08/Agosto	1,25
09/Agosto	1,25
10/Agosto	1,26
11/Agosto	1,26
12/Agosto	1,26
13/Agosto	1,45
14/Agosto	1,25

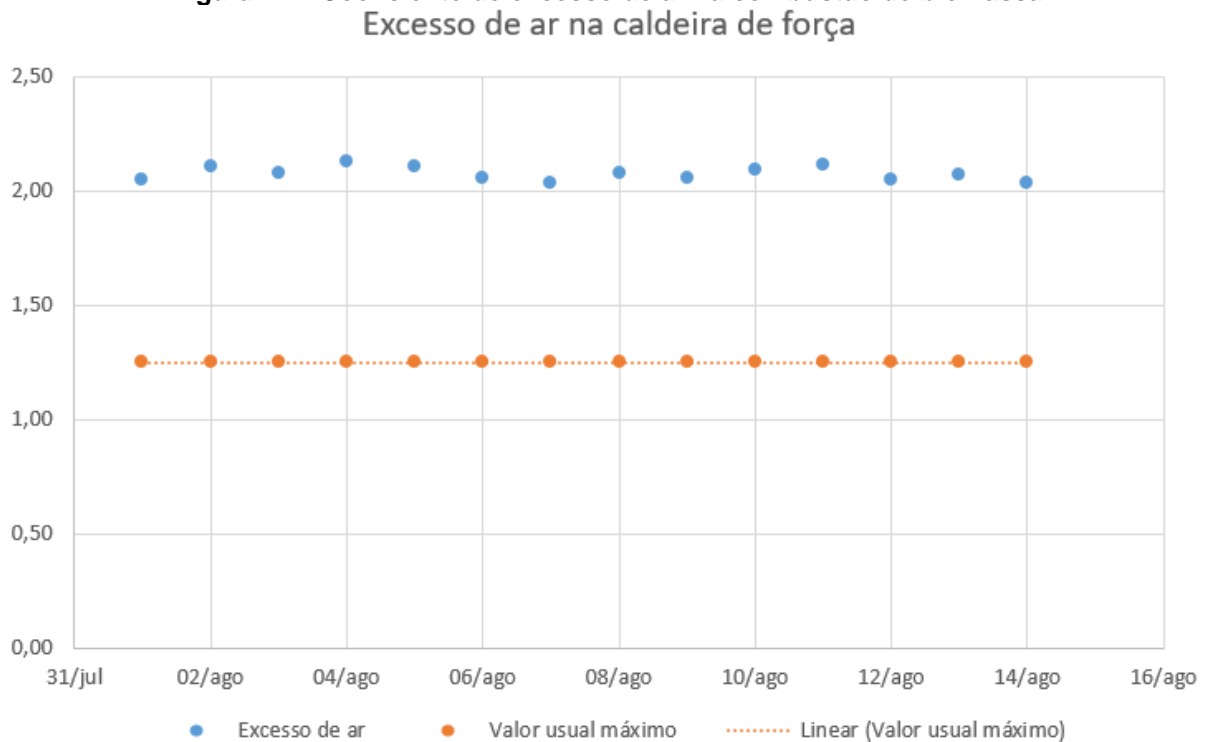
**Fonte: Autoria própria, 2016**

E as figuras 10 e 11 representa a relação entre o valor teórico do excesso de ar com o valor calculado.

**Figura 10 – Coeficiente de excesso de ar na combustão do Licor Negro**



**Figura 11 – Coeficiente de excesso de ar na combustão de biomassa**



Pinheiro (et al, 1995) afirma que o controle da combustão (razão ar/combustível) não pode ser realizado através do controle da vazão de combustível, pois a energia gerada pela caldeira depende da quantidade de combustível introduzido. Assim a única variável que poder ser regulada é a vazão de ar de

combustão. E para otimizar o excesso de ar é necessário um controle de combustão mais preciso, que pode ser realizado a partir da análise do  $O_2$  e CO nos produtos da combustão na saída da fornalha. Controlando o excesso de ar baseado na medição de CO tem uma vantagem, pois a sua formação é devido a uma quantidade de ar local insuficiente para completar a combustão, ou seja, se a combustão é completa, o nível de CO tende a zero.

## 4.2 DIMENSIONAMENTO DA TUBULAÇÃO

Para o problema proposto em relação a tubulação, foi dimensionado uma nova linha de distribuição para a celulose, pelos seguintes motivos: Menor distância; Processo mais instável; Custo do projeto baixo.

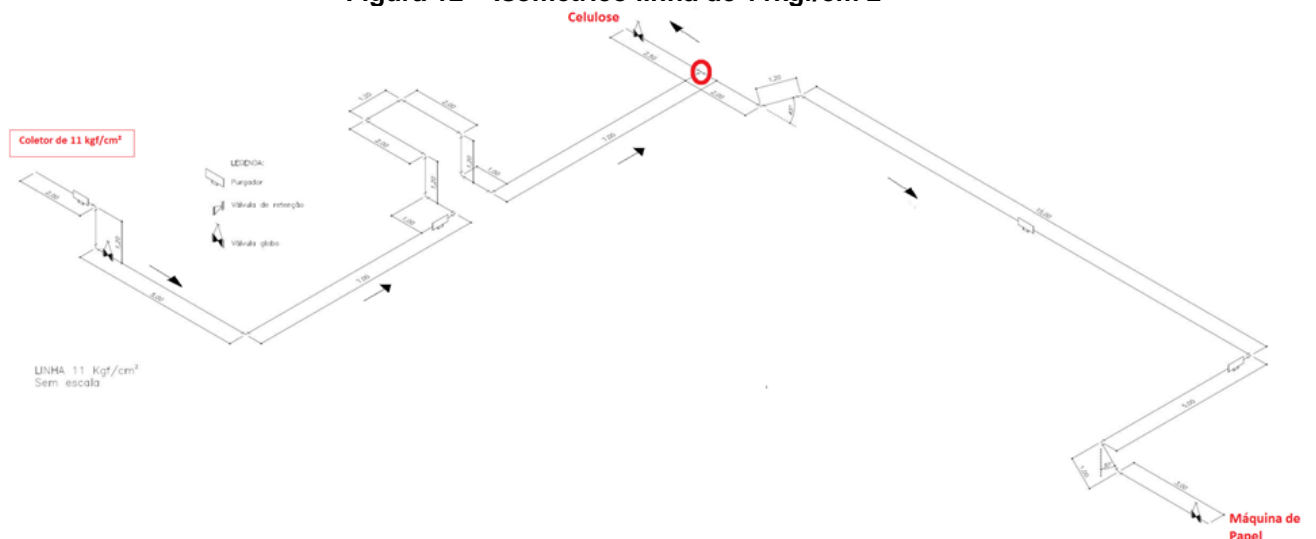
Os dados gerais retirados do banco de dados da empresa são descritos na seguinte tabela,

Vazão máxima	20 kg/s
Pressão	11 kgf/cm <sup>2</sup>
Temperatura máxima	225°C

Fonte: Autoria própria, 2016

A figura 12 é o desenho isométrico da linha de 11kgf/cm<sup>2</sup>.

**Figura 12 – Isométrico linha de 11kgf/cm<sup>2</sup>**



Fonte: Adaptado da Empresa em Estudo, 2016  
Nota: Para melhor visualização ver anexo

O dimensionamento da nova linha seguiu um caminho para a redução da perda de carga, partindo do principal componente determinante que é a velocidade de escoamento do fluido e utilizando a equação 2.19.

**Tabela 18 – Velocidade**

<b>Diâmetro (m)</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>
0,15	77,32
0,155	67,78
0,16	59,78
0,165	53,03
0,17	47,28
0,175	42,34
0,18	38,08
0,185	34,38

**Fonte: Aatoria própria, 2016**

Material utilizado foi uma Aço Inox com uma rugosidade equivalente de 0,045 mm (SCHRODER, 2011). O aço inox é altamente resistente à corrosão, possui uma resistência mecânica adequada, alta resistência a altas temperaturas, entre outros atributos. Considerando que o diâmetro que teve a velocidade mais baixa foi de 0,185 m, o diâmetro comercial adotado foi de 7 polegas.

A variação de pressão da tubulação em cada comprimento da linha foi calculado pela equação 2.20. E seus valores estão descritos na seguinte tabela.

**Tabela 19 – Variação de Pressão nas linhas**

<b>L (m)</b>	<b><math>\Delta P</math> (kPa)</b>
1	0,13
1,2	0,16
2	0,26
3	0,39
5	0,66
7	0,92
15	1,97

**Fonte: Aatoria própria, 2016**

O isolamento mais escolhido foi a Lã de Rocha, por ser um material resistente e usualmente usado nas indústrias. A tabela 20, mostra a relação entre o diâmetro da tubulação e a máxima temperatura que o fluido pode atingir dentro da tubulação, que no caso é de 225 °C.



<b>DN</b>	<b>Espessura do isolamento</b>
3 pol – 80 mm	50 mm
4 pol – 100 mm	50 mm
5 pol – 125 mm	65 mm
6 pol – 150 mm	65 mm
8 pol – 200 mm	75 mm
10 pol – 250 mm	75 mm
12 pol – 300 mm	75 mm

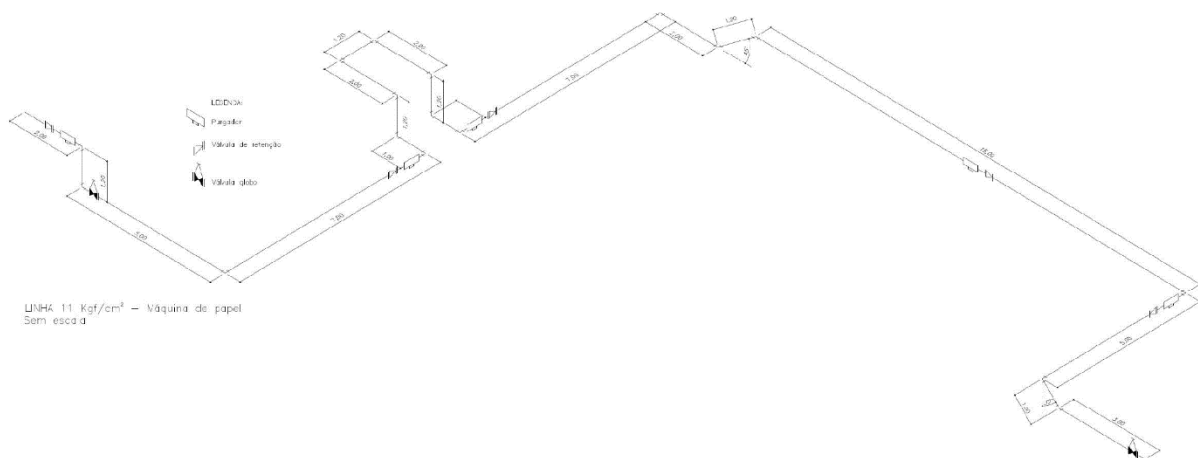
**Fonte: Adaptado de ZATTONI,2008**

A espessura da camada de lã de rocha será que 70 mm. Em conjunto com ela será utilizado uma cobertura de alumínio corrugado para proteger o isolamento e o ajuda-lo.

O purgador escolhido para as linhas de distribuição é o purgador de boia livre. A boia em si é a válvula, toda a sua superfície funciona como vedação da válvula. Isso garante uma confiabilidade superior e uma longa vida útil. Sua estrutura é de assento de três pontos, não há vazamentos de vapor (nem de ar, nem de gás) mesmo nos casos em que a carga de condensado seja tão pequena que uma vedação por água não seja possível. A combinação com uma boia de base de precisão oferece propriedades superiores de vedação e vida útil(TVL, 2016).

Como forma de solucionar o problema da variação de pressão na máquina de papel, foi proposto a divisão da linha em duas, ou seja, cada uma terá sua linha individual porém seguindo o caminho original. A figura 13 e 14 é a proposta das novas linhas de distribuição de 11kgf/cm<sup>2</sup>.

**Figura 13 – Isométrico linha de 11kgf/cm<sup>2</sup> para Máquina de Papel**



**Fonte: Autoria própria, 2016**  
**Nota: Para melhor visualização ver anexo**



## 5 PROPOSTA

### 5.1 CONSERVAÇÃO E GERENCIAMENTO DE ENERGIA

Para o crescimento da eficiência energética da empresa em meio as diversidades do processo é de suma importância o desenvolvimento de um programa sistemático de eficiência energética. Auditorias realizadas nas instalações podem mostrar oportunidades de melhoria e de aumento de eficiência dos sistemas, indicando em alguns casos, pontos de racionalização com viabilidade econômica (ELETROBRAS, 2005).

É recomendado a criação de um Programa de Conservação e Gerenciamento de Energia (PCGE), que tem como objetivo apresentar métodos e técnicas para definir objetivos e ações para melhorar a eficiência energética, eliminando desperdícios nos processos de geração, distribuição e uso do vapor. Esse programa trabalha com uma abordagem metódica dos fluxos energéticos do sistema de vapor da fábrica, apontando quem, quanto e como está sendo consumido a energia e assim, basear a implementação de um programa de uso consciente e eficiente do recurso energético (WANG, 2008; ELETROBRAS, 2006).

Segundo a Eletrobras (2005), para aplicar o programa em uma empresa é necessário seguir certas medidas: Conhecer os fluxos de energia, ou seja, todas as regras, contratos, restrições e ações que afetam esses fluxos; Conhecer todos os processos e atividades que utilizam esse tipo de energia; Acompanhar parâmetros de controle, como por exemplo, o consumo de energia (absoluto e específico), custos específicos, valores contratados, fatores de utilização da instalação; Medir os itens de controle, indicar correções, propor alterações, auxiliar na contratação de melhorias, acompanhar as melhorias. Um uso equilibrado da energia em uma empresa deve ser algo natural de ocorrer. O controle e gerenciamento da geração, distribuição e uso do vapor deve contribuir simultaneamente para a sustentabilidade da empresa e dos recursos naturais.

Algumas ações que devem ser tomadas visando o uso eficiente da energia: Treinamento da equipe: Conscientizar todas as pessoas que trabalham com essa energia; Procedimentos padronizados: Documentos que auxiliam a geração, distribuição e uso do vapor; Caminhadas de inspeções diárias: Pelo menos uma vez

por dia analisar toda a distribuição de vapor, identificando vazamentos ou possíveis falhas; Planejamento de manutenção e de engenharia, com o objetivo de continuidade do programa; Substituição de equipamentos obsoletos.

A maioria das medidas propostas dão ênfase aos aspectos em relação a educação e treinamento das pessoas, logo não possuem um custo elevado de implementação. Estudos indicam que medidas relacionadas a equipe de trabalho, por exemplo treinamentos, resultam em uma redução de consumo de energia na ordem de 5% após um ano da implementação do programa (ELETROBRAS, 2006; BATISTA, 2011).

As auditorias de energia podem ser definidas como uma vistoria completa e detalhada das condições do sistema de vapor. Com ela seria possível conhecer onde, quando e como o vapor está sendo usado, qual a eficiência dos equipamentos e onde se verificam os desperdícios, possibilitando o desenvolvimento de soluções para os problemas encontrados (KENNEDY, 2005).

Em uma auditoria de energia, Wang (2008) destaca alguns dados que devem ser levantados: Gastos de energia: Ligados ao uso, transporte e geração; Informações descritivas da estrutura física da instalação; Localização geográfica; Levantamento dos equipamentos e operações que consomem mais esse tipo de energia; Tempo de operação dos equipamentos.

É fundamental conhecer todos os sistemas de vapor da empresa e com o auxílio dessa ferramenta, junto com os dados levantados e o acompanhamento sistemático do sistema é possível controlar as perdas, desperdícios do vapor e agir com eficácia nas possibilidades de melhorias na geração e distribuição da energia.

## 6 CONCLUSÃO

Com a elevação dos preços da energia, o consumo racional é essencial para a estratégia para as fábricas de papel e celulose, pois a disponibilidade do vapor reflete diretamente no desenvolvimento da empresa. Com isso, estudos e avaliações energéticas possibilitam otimizar todo o sistema de geração e distribuição do vapor, e com isso melhor a sustentabilidade da instalação, redução dos custos na produção.

Algumas áreas-chaves de melhorias e possíveis ações para a diminuição dos desperdícios de energia na sua geração: Controlar a temperatura dos gases da chaminé, equilibrando com as normas ambientais; Minimizar excesso de ar na combustão, utilizando o necessário para auxiliar a combustão; Melhorar o tratamento de água para minimizar as descargas da caldeira, e para não causar incrustações nas tubulações e prejudicar nas trocas térmicas; Retirar ao máximo a umidade da biomassa utilizada para combustão, melhorando o sistema de evaporação do licor negro e o armazenamento da biomassa.

E na sua distribuição, deve-se melhorar nas seguintes áreas: Reparar vazamentos de vapor; Garantir o isolamento da tubulação, válvulas e acessórios; Manutenções regulares em purgadores; Purgar todo condensado, gases não condensáveis e ar nas linhas de vapor.

Tipicamente, as perdas mais significativas associadas à operação da caldeira estão na energia perdida nos gases de exaustão da chaminé, e está diretamente relacionada a temperatura desses gases e pela quantidade de excesso de ar fornecido ao processo de combustão. O excesso de ar influencia tanto a eficiência térmica quanto o nível de emissão de poluente das fornalhas. O seu controle permite otimizar a eficiência térmica das fornalhas, assegurando ao mesmo tempo uma diminuição do nível de emissão de poluentes e o cumprimento das normas ambientais.

Um dimensionamento incorreto acarreta um grande custo para a empresa pois se gasta uma maior quantidade de combustível e água, para compensar as perdas ocorridas ao longo da tubulação. O diâmetro tem uma influência direta na velocidade do fluido e na perda de carga do sistema, logo, é fundamental que a linha seja dimensionada de forma correta, afim de ter sua eficiência elevada e um menor

custo de operação da caldeira. Em tubulações para transportar vapor nessa condições, a velocidade excessiva pode ocasionar corrosão e ruídos.

O projeto dessa nova linha de distribuição de vapor, foi validado através de cálculos de perda de carga para diversos diâmetros, o que possibilitou recomendação da tubulação mais adequada. O isolamento térmico recomendado para este projeto foi escolhido baseado em bibliografias e sua dimensão baseada em tabelas de fornecedores especializados.

## REFERÊNCIAS

ADAMS, T. N. **Kraft Recovery Boilers**. Tappi Press, Atlanta - Georgia USA, 1997.

ALMEIDA, G. M. **Deteção de situações anormais em caldeiras de recuperação química**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2006.

BACHMANN, D. L. **Benchmarking energético na indústria de celulose e papel**. Revista O PAPEL. p.72-76. Julho de 2009.

BARBELI, M. C. **Indústria de papel e celulose: Estudo da arte das tecnologias de co-geração de energia**. Revista da ciências exatas e tecnologias. vol. III, nº3, p. 107-122, 2008

BASU, P. **Combustion and Gasification in Fluidized Beds**. Taylor and Francis Group, Canadá, 2006.

BATISTA, O. E. **Gestão energética industrial: Uma abordagem frente à inteligência empresarial**. Monografia (Graduação). Engenharia Elétrica - Ênfase em Sistemas de Energia e Automação, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

BRACELPA - **Associação Brasileira de Celulose e Papel. Relatório estatístico 2011/2012**. Disponível em:  
<http://www.bibliotecaflorestal.ufv.br/handle/123456789/7743>. 2011.

BREWSTER, J. **Economic impact of modern kraft recovery boilers**. International Chemical Recovery Conference, p. 9-14, 2007

CASTRO, H. F. **Processos Químicos Industriais II - Papel e Celulose**. Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de Lorena - EEL. 2009.

CONSIDINE, D. M. **Energy Technology Handbook**. McGraw-Hill, 1977.

CUNHA, E. J. **Análise da influência das variáveis da caldeira de recuperação química no sistema de abate do material particulado da indústria de celulose e papel**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Itajubá 2005.

DAUMICHEN, R. V. H. **Curso sobre distribuição de vapor**. Instituto de Petróleo, 1975.

DIAS, S. P. M. **Otimização da rede de vapor**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Química, 2012.

ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Eficiência energética no uso de vapor**. Rio e Janeiro: Eletrobrás, 2005.

ELETROBRAS - CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Conservação de energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações**. PROCEL EDUCAÇÃO - Universidade Federal de Itajubá. UNIFEI FUPAI. Itajubá, 2006.

FERREIRA, D. J. O. **Análise de escoamento de gases em uma caldeira de recuperação química via fluidodinâmica computacional**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Engenharia Química da UFMG, Belo Horizonte 2007.

FERREIRA, D. J. O.; CARDOSO, M.; PARK, S. W. **Gas flow analysis in a kraft recovery boiler**. *Fuel*, vol 91. p. 789-798, 2010.

FERREIRA, D. J. O. **Modelagem de caldeira de caldeira de recuperação química Kraft**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2013.

FILHO, G. D. M.; CARDOSO, M.; ALMEIDA, G. M. **Monitoramento quantitativo e qualitativo do vapor gerado em uma caldeira de recuperação química**. VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Uberlândia, Minas Gerais, Brasil 2009.

FORTUNATTO, A. C. **Alternativas para o aproveitamento do licor negro da indústria de papel e celulose**. Monografia (Especialização) - Curso de Especialização em Gestão Ambiental e Negócios no Setor Energético do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo 2014.

GALLEGO, A. G. **Modelagem computacional e análise termodinâmica de sistemas de geração de potência utilizando gaseificação de licor negro**. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2004.

GUIMARÃES, M. A. **Novo método para determinação da quantidade de recirculação de cinzas nas caldeiras de recuperação**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 2013.



IBP - **Instituto Brasileiro de petróleo**. *Curso sobre distribuição de vapor*. Rio de Janeiro, 1975.

INCROPERA, F. P.; **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6ª edição. LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. Rio de Janeiro, 2008.

INTERNATIONAL PAPERS DO BRASIL. **Caldeira de Biomassa: Autossuficiência energética e sustentabilidade do negócio**. Prêmio FIESP - Mérito Ambiental, Mogi Guaçu, 2015.

ISENMANN, A. F. **Química a partir de recursos renováveis**. 3ª edição. Timóteo, Minas Gerais, 2016.

JORGE, M. M. **Competitividade da indústria de celulose**. Estudo da competitividade da indústria brasileira. Campinas: FINEP/MCT/FECAMP/UNICAMP-IE/UERJ-IEI, 1993.

KENNEDY, W. J.; CAPEHART, B. L.; TURNER, W. C. **Guide to energy management**. 5ª ed. Lilburn: The Fairmont Press, 2005.

KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization Engineering**. Butterworth-Heinemann, Boston, 1991.

LINDSLEY, D. **Power-plant control and instrumentation - The control of boilers and HRSG systems**. The Institution of Electrical Engineers, Londres, 2005.

LOO, S. V.; KOPPEJAN, J. **The handbook of biomass combustion and co-firing**. Earthscan, Londres, 2008.

MENDES, M. L. D.; d'ANGELO, J. V. H. **Estudo exergético do sistema de vapor de uma indústria de celulose**. Departamento de Engenharia de Sistemas Químicos, Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP. Campinas, 2007.

MILCENT, P. F. **Noções de isolamento térmico de tubulações**. 2ª Ed. Universidade Federal do Paraná - Departamento de Engenharia Química, 2006.

PALACIOS, J. L. **Técnicas de gestión energética en sistemas de vapor**. Laboratorio de energias alternativas y eficiencia energética - Escuela Politécnica Nacional. Quito, 2010.

PAOLIELLO, F. A.; ALVEZ, A. C.; MAESTRI, E.; FELICISSIMO NETO, J.; ASPGREN, L. P. **Guide for recovery boiler inspection**. CSBR - Safety Committee in (Chemical) Recovery Boiler of Brazil. ABTCP, 2002.

PERA, H. **Geradores de vapor**. Editora Fama, 2ª Edição, 1990

PERRY, R. H.; GREEN, D. W.; MALONEY, J. O. **Perrys chemical engineers handbook**. 7ª edição. McGraw-Hill Companies. 1999

PINHEIRO, P. C. C.; VALLE, R. M. **Controle de combustão: Otimização do excesso de ar**. II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica, Rio de Janeiro. Anais.. Automação Industrial São Paulo: ABIQUIM, Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, p. 157-162, 1995.

PINTO, J. C. F. **Características da cinza de combustão de biomassa em leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado) - Departamento de Ambiente e Ordenamento, Universidade de Aveiro, Aveiro - Portugal 2011.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na indústria de celulose e papel - Estudo de Caso**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2003.

POTRICH, L. B. **Modelagem da queima do carbono na caldeira de recuperação 2 da Klabin Monte Alegre por rede neural artificial**. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação "Stricto Sensu" em Engenharia Química da Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo - Brasil 2014.

RIBEIRO, M. **Tecnologias de automação na ALUNORTE**. IV Workshop - Rede de Instrumentação e Controle. 29 a 30 de setembro, 2011.

RIBEIRO, R. N.; MUNIZ, E. S.; LAMARQUE, L. H. F.; MEHTA, R. K.; PARK, S. W. **Automação e sistemas de segurança em caldeiras de recuperação química**. Intech Brasil BLRBAC, nº95. p.7-22, 2007.

SARTORELLI, R. J.; NASCIMENTO JUNIOR, C. M. **Geração de energia por meio de vapor**. Coletânea de trabalhos - Qualidade de energia e tecnologias de uso final, n.2, p.13-17, 2009.

SCALA, F.; CHIRONE, R. **Fluidized bed combustion of alternative solid fuels**. Experimental Thermal and Fluid Science, nº28, p.691-699, 2004.

SCHRODER, F. C. **Levantamento em campo da rugosidade equivalente de tubos metálicos**. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, Campinas, 2011.

SHINTANI, C. H.; YASUDA, F. **Estudo da utilização do biodiesel na geração de vapor para a agroindústria**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Escola politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2006.

SILVA, F. R.; ALBUQUERQUE, J. A.; GATIBONE, L. C.; MARANGONI, J. M. **Cinza de biomassa florestal: Alterações nos atributos de solos ácidos do planalto catarinense e em plantas de eucalipto**. Scientia Agraria, Curitiba, v.10, n.6, p.475-482, Nov./Dec. 2009

SILVA, R. L. A. **Estudo sobre os procedimentos para elaboração de um plano de controle de emergência na indústria química**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa, 2006.

SILVA, R. L. A.; SOARES, P. R. F. T.; SILVA, A. K. B. **Análise de Risco utilizando a ferramenta FMEA em um gerador de vapor**. XXVIII Encontro Nacional De Engenharia de Produção - A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável, Rio de Janeiro 2008.

SILVA, R. S. **Uso de caldeira de recuperação em navios de apoio Offshore**. Monografia (Graduação) - Curso de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro 2014.

SOARES, S. J. M. **Competitividade da indústria de papel** **Estudo da competitividade da indústria brasileira**. Campinas: FINEP/MCT/FECAMP/UNICAMP-IE/UERJ-IEI, 1993.

SZARGUT, J. **Exergy method. Technical and Ecological Applications**. WIT Press, 2005.

TARELHO, L. A. C. **Controle de emissões gasosas poluentes resultantes da combustão de carvão em leito fluidizado**. Tese(Doutorado) - Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal, 2001.

TEIXEIRA, E. R. **Propriedades de leitos usados na combustão de biomassa em leito fluidizado**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia do Ambiente da Universidade de Aveiro. Aveiro - Portugal, 2010.

TELLES, P. C. S. **Tubulações industriais**. 9ª edição. Rio de Janeiro: S.A, 1999.

TVL - Uma empresa especializada em vapor. **Purgador de bóia livre para vapor.** Disponível em: <http://www.tlv.com/global/BR/product-solutions/free-float-steam-trapsfor-main-lines.html>

U.S. Department of Energy. **Steam Trap Performance Assessment.** Washington, DC:Advanced Manufacturing Office, 2000.

VAKKILAINEN, E. **Recovery boiler - Papermaking Scienci and Technology Chemical Pulping.** Tappi Press, Finlândia 2000.

VOGEL, H. L. M.; SCHUMACHER, M. V.; SILVA, J. V. M.; ROSS, G. P. D.; MOREIRA, E. S. **Utilização de cinza de caldeira de biomassa como fonte de nutrientes em Acacia mearnsii De Wild.** Congresso Florestal Brasileiro. Oportunidades e Desafios do Século XXI. São Paulo, 2003.

WANG, L. **Food efficiency and management in food processing facilities.** Londo: CRC Press, 2008.

YANG, W. C. **Handbook of fluidization and fluid-particle systems.** Marcel Dekker, Berkeley, 2003.

YAZAKI, V. N. **Estudo de falhas por fadiga em caldeiras.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá 2011.

ZATTONI, C. C. **Materiais para Tubulação.** São Paulo: FATEC-SP, 2008

### ANEXO A – DESENHO DA LINHA ORIGINAL DE 11KGF/CM<sup>2</sup>

