Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

# Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica kraft

Carolina Kravetz

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2018

Carolina Kravetz
Engenheira Florestal

# Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica kraft

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **FRANCIDES GOMES DA SILVA JÚNIOR**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestra em Ciências, Programa: Recursos Florestais. Opção em: Tecnologia de Produtos Florestais

Piracicaba
2018

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação**
**DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP**

Kravetz, Carolina

Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica kraft / Carolina Kravetz. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

72 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"

1. Biomassa 2. Caldeira de biomassa 3. Caldeira de recuperação 4. Eficiência energética 5. Energia 6. Licor negro 7. Parâmetros I. Título

# AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer à Deus por esta oportunidade e por me dar forças todos os dias para prosseguir na caminhada.

Agradecer imensamente meus pais, Rosangela e Alexandre, minha prima/irmã Giovana, e meu companheiro Pedro Vitor, pelo apoio, amor, dedicação incondicional que têm por mim. Como também à toda minha família que está sempre presente em minha vida.

À Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" que me acolheu por mais um período especial de minha vida e me contemplou com diversas oportunidades. Em especial, ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais do qual pertenci.

Ao Professor Francides Gomes da Silva Júnior, pelas oportunidades e orientação durante este trabalho.

À Empresa brasileira do setor de celulose e papel que disponibilizou os dados para a execução deste trabalho.

Ao Professor José Otávio Brito que desde a graduação tem me dado suporte e orientação, muito obrigada por sua amizade e confiança.

À Glauco Joubert Stape, pela amizade e ensinamentos de diversos conceitos, essenciais para a conclusão deste trabalho.

À Giovana Oliveira, pela sua dedicação ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Florestais, apoio em todas as situações e amizade, muito obrigada.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo suporte financeiro.

À equipe do Laboratório de Química, Celulose e Energia – LQCE, pelo aprendizado, apoio e amizade, Ana Cláudia, Camila, Glauco, Isabela, Lucas, Marina, Regina, Renato, Ananias, Artur, Francisco, Juliana, Maiara, Wesley.

De forma especial aos Grupos de Oração Universitário da ESALQ, estas pessoas foram essenciais na minha vida e me ajudaram a superar todas as dificuldades, muito obrigada Alisson, Tamires, Barbara, Barbara, Bruna, Flaviane, Izabel, Izabela, Josilane, Lenise, Márcio, Mariana, Mariana, Marina, Thainá e Rebeca.

# SUMÁRIO

**RESUMO** ..... **5**

**ABSTRACT** ..... **6**

**LISTA DE FIGURAS** ..... **7**

**LISTA DE TABELAS** ..... **9**

**LISTA DE ABREVIATURAS** ..... **10**

**LISTA DE SÍMBOLOS** ..... **11**

**1. INTRODUÇÃO** ..... **13**

**2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA** ..... **15**

2.1. A ENERGIA NO BRASIL ..... 15
2.2. A ENERGIA NO SETOR DE CELULOSE E PAPEL ..... 16
*2.2.1. A matriz energética do setor de celulose e papel* ..... *17*
2.3. CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO QUÍMICA ..... 19
*2.3.1. Características do licor negro* ..... *20*
2.4. CALDEIRA DE FORÇA OU CALDEIRA DE BIOMASSA ..... 21
*2.4.1. Características da biomassa* ..... *22*
2.5. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA ..... 24
2.6. PARÂMETROS QUE AFETAM O DESEMPENHO DAS CALDEIRAS ..... 25

**3. OBJETIVOS** ..... **27**

3.1. OBJETIVO GERAL ..... 27
3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS ..... 27

**4. MATERIAIS E MÉTODOS** ..... **29**

4.1. AMBIENTE DE ESTUDO ..... 29
4.2. LEVANTAMENTO DE DADOS DO PROCESSO ..... 29
*4.2.1. Dados referentes às caldeiras* ..... *29*
*4.2.2. Dados referentes à biomassa e licor negro* ..... *30*
4.3. ANÁLISE DE RESULTADOS ..... 30
*4.3.1. Cálculo de eficiência* ..... *30*
*4.3.2. Diagrama de dispersão* ..... *32*
*4.3.3. Correlação de Pearson* ..... *32*
*4.3.4. Estimativa de produção de vapor* ..... *32*
*4.3.5. Maximização da produção de vapor* ..... *33*

**5. RESULTADOS E DISCUSSÃO** ..... **35**

5.1. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DAS CALDEIRAS ..... 35
5.2. ANÁLISE DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO ..... 38
*5.2.1. Diagrama de dispersão* ..... *38*
*5.2.2. Correlações estatisticamente significativas* ..... *42*
*5.2.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor* ..... *43*
5.3. ANÁLISE DO LICOR NEGRO ..... 46
*5.3.1. Diagrama de dispersão* ..... *46*
*5.3.2. Correlações estatisticamente significativas* ..... *47*
*5.3.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor* ..... *48*
*5.3.4. Maximização da produção de vapor* ..... *50*
5.4. ANÁLISE DA CALDEIRA DE BIOMASSA ..... 51
*5.4.1. Diagrama de dispersão* ..... *51*
*5.4.2. Correlações estatisticamente significativas* ..... *55*
*5.4.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor* ..... *56*
5.5. ANÁLISE DA BIOMASSA ..... 59
*5.5.1. Diagrama de dispersão* ..... *59*
*5.5.2. Correlações estatisticamente significativas* ..... *60*
*5.5.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor* ..... *61*
*5.5.4. Maximização da produção de vapor* ..... *61*

**6. CONCLUSÕES** ..... **63**

**REFERÊNCIAS** ..... **65**

**APÊNDICES** ..... **69**

# RESUMO

## Estudo do desempenho energético das caldeiras da indústria de polpa celulósica kraft

A importância da energia gerada pelo setor de celulose e papel têm crescido no mercado brasileiro, pois com a crise hídrica que tem causado transtornos financeiros aos diversos setores da economia, muitas empresas têm optado por ter a geração de energia como um novo plano de negócio. Desta forma, para que esta produção cresça são necessários investimentos nessa área. Por isso, é essencial conhecer o processo, bem como os parâmetros envolvidos na produção de energia. Com a finalidade de ampliar os conhecimentos da área de energia dentro do setor de celulose e papel, este trabalho teve como objetivo identificar a relação dos parâmetros das caldeiras de recuperação e biomassa, bem como de seus combustíveis, afim de determinar sua influência na produção de vapor. Para isso, foram utilizados os valores dos parâmetros das caldeiras de recuperação e biomassa, entre eles: consumo de combustível, vazões de ar, temperaturas da água de alimentação e do vapor gerado, como também os valores das características químicas e físicas do licor negro, incluindo poder calorífico superior, teor de sólidos totais, teor de orgânicos e inorgânicos, e da biomassa, densidade aparente, poder calorífico superior, umidade e teor de cinzas. Os parâmetros e as características dos combustíveis foram disponibilizados por uma empresa do setor de celulose e papel do Brasil. Para análise e discussão dos dados foram feitos cálculos de eficiência energética, análise de diagramas de dispersão, correlação de Pearson, elaboração de modelos matemáticos para estimativa de produção de vapor e a determinação dos valores ideais dos parâmetros dos combustíveis, para produção máxima de vapor. A partir das análises de eficiência energética, a caldeira de recuperação manteve uma média de 86%, enquanto que a caldeira de biomassa obteve uma média de 51%. Dentre os modelos matemáticos analisados para a predição da produção de vapor, apenas o modelo utilizando parâmetros da caldeira de recuperação foi estatisticamente significativo. Os valores recomendados dos parâmetros dos combustíveis estavam entre os valores que foram efetivamente praticados pela empresa, durante o período do estudo. Por esta razão, houveram valores que estiveram abaixo do que é recomendado pela literatura.

Palavras-chave: Biomassa, Caldeira de biomassa, Caldeira de recuperação, Eficiência energética, Energia, Licor negro, Parâmetros

## ABSTRACT

### Study of energy performance of boilers from kraft pulp industries

The importance of the energy generated by the pulp and paper sector has grown in the Brazilian market, because the water crisis has caused financial distress to the various sectors of the economy, and then many companies have chosen to have the power generation as a new business plan. In this way, for this production to grow, investments in this area are necessary. Therefore, it is essential to know the process as well as the parameters involved in energy production. With the purpose of increasing the knowledge of the energy area within the pulp and paper sector, this work aimed to identify the relation of the parameters of recovery and biomass boilers, as well as their fuels, in order to determine their influence in the production of steam. In order to do this, the values of the parameters of the recovery and biomass boilers were used, among them: fuel consumption, air flows, feed water and steam temperatures, as well as the values of the chemical and physical characteristics of the black liquor, including higher calorific value, total solids content, organic and inorganic content, and of biomass, apparent density, higher calorific value, moisture and ash content. The parameters and characteristics of fuels were made available by a Brazilian pulp and paper company. In order to analyze and discuss the data were made energy efficiency calculations, dispersion diagrams analysis, Pearson correlation, mathematical models for estimation of steam production and determination of the ideal values of the fuel characteristics for maximum steam production. From the energy efficiency analyzes, the recovery boiler maintained an average of 86%, while the biomass boiler obtained an average of 51%. Among the mathematical models analyzed for the prediction of steam production, only the model using parameters of the recovery boiler was statistically significant. The recommended values of the fuel parameters were among the values that were effectively practiced by the company during the study period. For this reason, there were values that were below what is recommended in the literature.


Keywords: Biomass, Biomass boiler, Black liquor, Energy, Energy efficiency, Parameters, Recovery boiler

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA (EPE, 2017A). ..... 15
FIGURA 2. SÉRIE HISTÓRIA DA MATRIZ ENERGÉTICA DO SETOR DE CELULOSE E PAPEL. ADAPTADO DE EPE (2017B). ..... 18
FIGURA 3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO ..... 36
FIGURA 4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA CALDEIRA DE BIOMASSA ..... 37
FIGURA 5. GRÁFICO DE DISPERSÃO: CONSUMO DE LICOR NEGRO X VAZÃO DE VAPOR ..... 38
FIGURA 6. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEMPERATURA DA ÁGUA X VAZÃO DO VAPOR ..... 38
FIGURA 7. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEMPERATURA DOS GASES DE SAÍDA X VAZÃO DO VAPOR ..... 39
FIGURA 8. GRÁFICO DE DISPERSÃO: PRESSÃO DO VAPOR X VAZÃO DO VAPOR ..... 39
FIGURA 9. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEMPERATURA DO VAPOR X VAZÃO DO VAPOR ..... 39
FIGURA 10. GRÁFICO DE DISPERSÃO: VAZÃO DA ÁGUA X VAZÃO DO VAPOR ..... 40
FIGURA 11. GRÁFICO DE DISPERSÃO: VAZÃO DE AR PRIMÁRIO X VAZÃO DO VAPOR ..... 40
FIGURA 12. GRÁFICO DE DISPERSÃO: VAZÃO DE AR SECUNDÁRIO X VAZÃO DO VAPOR ..... 40
FIGURA 13. GRÁFICO DE DISPERSÃO: VAZÃO DE AR TERCIÁRIO X VAZÃO DO VAPOR ..... 41
FIGURA 14. GRÁFICO: RESÍDUOS X AJUSTES DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO ..... 44
FIGURA 15. GRÁFICO: RESÍDUOS X ORDEM DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO ..... 45
FIGURA 16. GRÁFICO: PROBABILIDADE DE DISTRIBUIÇÃO NORMAL DOS RESÍDUOS DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO ..... 45
FIGURA 17. GRÁFICO DE DISPERSÃO: PODER CALORÍFICO SUPERIOR X VAZÃO DE VAPOR ..... 46
FIGURA 18. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEOR DE SÓLIDOS TOTAIS X VAZÃO DE VAPOR ..... 46
FIGURA 19. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEOR DE INORGÂNICOS X VAZÃO DE VAPOR ..... 47
FIGURA 20. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEOR DE ORGÂNICOS X VAZÃO DE VAPOR ..... 47
FIGURA 21. GRÁFICO: RESÍDUOS X AJUSTES DAS CARACTERÍSTICAS DO LICOR NEGRO ..... 49
FIGURA 22. GRÁFICO: RESÍDUOS X ORDEM DAS CARACTERÍSTICAS DO LICOR NEGRO ..... 49
FIGURA 23. GRÁFICO: PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS DAS CARACTERÍSTICAS DO LICOR NEGRO ..... 50
FIGURA 24. GRÁFICO DE DISPERSÃO: CONSUMO DE BIOMASSA X VAZÃO DE VAPOR ..... 52
FIGURA 25. GRÁFICO DE DISPERSÃO: VAZÃO DE AR PRIMÁRIA X VAZÃO DE VAPOR ..... 52
FIGURA 26. GRÁFICO DE DISPERSÃO: VAZÃO DE AR SECUNDÁRIO X VAZÃO DE VAPOR ..... 52
FIGURA 27. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEMPERATURA DA ÁGUA X VAZÃO DE VAPOR ..... 53
FIGURA 28. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEMPERATURA DO VAPOR X VAZÃO DO VAPOR ..... 53
FIGURA 29. GRÁFICO DE DISPERSÃO: TEMPERATURA DOS GASES DE SAÍDA X VAZÃO DE VAPOR ..... 53
FIGURA 30. GRÁFICO DE DISPERSÃO: PRESSÃO DO VAPOR X VAZÃO DO VAPOR ..... 54
FIGURA 31. GRÁFICO: RESÍDUOS X AJUSTES DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE BIOMASSA. 57
FIGURA 32. GRÁFICO: RESÍDUOS X ORDEM DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE BIOMASSA ... 58

FIGURA 33. GRÁFICO: PROBABILIDADE NORMAL DOS RESÍDUOS DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE BIOMASSA ..... 58
FIGURA 34. GRÁFICO DE DISPERSÃO: PODER CALORÍFICO SUPERIOR X VAZÃO DE VAPOR ..... 59
FIGURA 35. GRÁFICO DE DISPERSÃO: DENSIDADE APARENTE X VAZÃO DE VAPOR ..... 59
FIGURA 36. GRÁFICO DE DISPERSÃO: UMIDADE X VAZÃO DE VAPOR ..... 60
FIGURA 37. GRÁFICOS DE DISPERSÃO: TEOR DE CINZAS X VAZÃO DE VAPOR ..... 60

# LISTA DE TABELAS

TABELA 1. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO LICOR NEGRO. ..... 20
TABELA 2. COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA MADEIRA. ..... 23
TABELA 3. ANÁLISE DESCRITIVA REFERENTE À CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO. ..... 35
TABELA 4. ANÁLISE DESCRITIVA REFERENTE AO LICOR NEGRO. ..... 35
TABELA 5. ANÁLISE DESCRITIVA REFERENTE À CALDEIRA DE BIOMASSA. ..... 36
TABELA 6. ANÁLISE DESCRITIVA REFERENTE À BIOMASSA. ..... 36
TABELA 7. DETERMINAÇÃO DO VALOR *P* PARA A ASSOCIAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO ..... 43
TABELA 8. DETERMINAÇÃO DO VALOR *P* PARA OS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS ..... 44
TABELA 9. DETERMINAÇÃO DO VALOR *P* PARA A ASSOCIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO LICOR NEGRO ..... 48
TABELA 10. DETERMINAÇÃO DO VALOR *P* DA CARACTERÍSTICA SIGNIFICATIVA DO LICOR NEGRO ..... 48
TABELA 11. DETERMINAÇÃO DO VALOR *P* PARA A ASSOCIAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE BIOMASSA ..... 56
TABELA 12. DETERMINAÇÃO DO VALOR P DOS PARÂMETROS SIGNIFICATIVOS DA CALDEIRA DE BIOMASSA ..... 57
TABELA 13. DETERMINAÇÃO DO VALOR *P* PARA AS ASSOCIAÇÕES DAS CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA ..... 61
TABELA 14. DETERMINAÇÃO DO VALOR P COM A CARACTERÍSTICA SIGNIFICATIVA DA BIOMASSA ..... 61
TABELA 15. VALORES DE ENTALPIA DO VAPOR D'ÁGUA ..... 69
TABELA 16. VALORES DE ENTALPIA DA ÁGUA ..... 69
TABELA 17. RELAÇÃO DE PEARSON ENTRE OS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO. ..... 70
TABELA 18. RELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DO LICOR NEGRO. ..... 71
TABELA 19. RELAÇÃO DE PEARSON ENTRE OS PARÂMETROS DA CALDEIRA DE BIOMASSA ..... 71
TABELA 20. RELAÇÃO DE PEARSON ENTRE AS CARACTERÍSTICAS DA BIOMASSA. ..... 72

## LISTA DE ABREVIATURAS

SENAI – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

EPE – Empresa de Pesquisa Energética

ELETROBRAS – Centrais Elétricas Brasileiras S.A.

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

# LISTA DE SÍMBOLOS

$NaOH$ – hidróxido de sódio

$Na_2S$ – sulfeto de sódio

$Na_2CO_3$ – carbonato de sódio

$CaO$ – óxido de cálcio

$H_2O$ - água

$Ca(OH)_2$ – hidróxido de cálcio (cal hidratada)

$CaCO_3$ – carbonato de cálcio

$SO_2$ – óxido de enxofre

TRS – total reduced sulfur (ERS)

$NO_X$ –óxido de nitrogênio

$CO$ – monóxido de carbono

MWh – megawatt hora

TWh – terawatt hora

GWh – gigawatt hora

MJ/kg – megajoule por kilograma

$kg/m^3$ - kilograma por metro cúbico

tss/dia – tonelada de sólidos secos por dia

t/dia – tonelada por dia

t/h – tonelada por hora

ºC – grau Celsius

PCS – poder calorífico superior

PCI – poder calorífico inferior

# 1. INTRODUÇÃO

O processo kraft é o mais utilizado pelas indústrias produtoras de polpa celulósica de todo o mundo. Este processo se iniciou em 1879, com o químico alemão Carl Dahl e foi difundido devido as suas vantagens, como a produção de fibras menos degradadas, flexibilidade na utilização de espécies, cozimentos mais curtos e a recuperação dos reagentes químicos utilizados no processo (FERREIRA, 2013; SENAI, 2013).

O processo kraft consiste na remoção da lignina utilizando uma solução aquosa de hidróxido de sódio (NaOH) e sulfeto de sódio ($Na_2S$), chamado licor branco. A associação destes dois componentes químicos permite que a eliminação da lignina seja mais seletiva do que nos demais processos químicos de polpação, já que o sulfeto preserva os carboidratos (celulose e hemiceluloses).

No geral, o processo de polpação kraft inicia-se no digestor, onde são adicionados os cavacos de madeira e o licor branco. Nesta etapa são vários os parâmetros de controle, como temperatura, tempo e pressão. Ao final a polpa produzida passa por etapas de lavagem, afim de que esta fique livre do licor negro formado durante este processo. A polpa celulósica segue na linha de fibras para as etapas de depuração, branqueamento, secagem e expedição. O licor negro, por sua vez, passa pelo processo de recuperação química, o qual consiste nos evaporadores, caldeira de recuperação, tanque de caustificação e forno de cal.

A recuperação dos reagentes químicos é realizada para que estes sejam reutilizados na constituição do licor branco de cozimento. Nesta etapa, há a geração de energia na forma de vapor e energia elétrica, as quais são empregadas no processo produtivo da celulose.

Contudo, a caldeira de recuperação, em muitas situações, não é capaz de suprir as necessidades energéticas da indústria. Por esta razão, as indústrias de celulose também utilizam a caldeira de biomassa para a complementação de energia mediante o uso de resíduos florestais como cascas, cavacos e resíduos da colheita.

Muitas indústrias de celulose já são caracterizadas como autossuficientes, outras unidades chegam a produzir energia elétrica excedente, a qual pode ser devolvida à rede do sistema elétrico nacional, possibilitando um abatimento da conta final de consumo destas empresas. Por outro lado, as unidades integradas de celulose e papel ainda precisam de energia do sistema nacional, devido à alta demanda energética do processo produtivo do papel.

Algumas unidades industriais produtoras de celulose têm considerado a energia elétrica como um novo produto. Onde visava-se apenas a produção de polpa celulósica, há indústrias do setor que hoje têm investido na produção desta forma de energia. Além disso, diante das incertezas

sobre a demanda futura de celulose, a competitividade deste setor estará vinculada à diversidade nos produtos gerados, aplicando o conceito de biorefinaria e realizando os múltiplos aproveitamentos da biomassa em rotas tecnológicas distintas (ALMEIDA, 2013).

A energia elétrica é um dos insumos mais importantes e com o custo mais elevado para o setor industrial. Com as crises hídricas recorrentes, o preço desta energia no mercado tem oscilado frequentemente e tem sido necessário a ativação de termelétricas, o que encarece o custo da energia para o consumidor. O setor de celulose e papel, por sua vez, possui grande vantagem sob as demais indústrias, já que este possui a geração de energia como consequência de seu processo produtivo.

O processo de produção de energia nas indústrias deste setor encontra-se consolidado, porém, para alavancar este produto no mercado como um negócio competitivo e lucrativo da empresa faz-se necessário à busca por melhorias nesta produção.

Uma forma de melhoria é através da eficiência energética, a qual consiste na relação entre a quantidade de energia disponibilizada e a quantidade de energia que é introduzida pelo combustível. Para que haja ganhos na eficiência energética e reduções de custo significativos para a empresa, é necessário entender o funcionamento das variáveis do processo, estudando o desempenho energético das unidades industriais.

As melhorias no processo podem estar ligadas aos parâmetros das caldeiras, como também relacionado às características dos combustíveis. No caso das indústrias de celulose, a matriz energética é, majoritariamente, composta pelo licor negro (subproduto do próprio processo produtivo) e pela biomassa (resíduos florestais).

Para que o setor de celulose e papel seja reconhecido como um produtor de energia limpa, há a necessidade de estudos que reconheçam os parâmetros que são essenciais, bem como os seus valores ideais, para obter uma produção de energia expressiva. Dessa forma, a produção ganhará destaque no setor energético brasileiro.

Deste modo, a partir da descrição da importância da energia para o setor de celulose e papel e também da necessidade de entender as relações entre os parâmetros do processo produtivo de energia, este trabalho teve como finalidade identificar os principais parâmetros que influenciam a geração de vapor das indústrias de polpa celulósica kraft a partir das caldeiras de recuperação e biomassa.

# 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, serão expostos os conceitos de energia, onde serão discutidas duas principais formas: elétrica e térmica (vapor), bem como os parâmetros de sua produção em uma indústria de polpa celulósica kraft. Em primeiro lugar, será abordado o conceito de energia na perspectiva brasileira, demonstrando principalmente a matriz energética a partir de dados do EPE. Em seguida, será discutido a matriz energética do setor de celulose e papel e o processo de funcionamento dos equipamentos responsáveis pela produção de energia. Finalmente, será discorrido acerca dos parâmetros envolvidos nesta produção, com o objetivo de explicitar a influência destes no desempenho energético das caldeiras de uma indústria de polpa celulósica.

## 2.1. A energia no Brasil

O Brasil é um dos maiores consumidores de energia elétrica do mundo e figura no grupo de apenas 23 países que são responsáveis pelo consumo de 75% de toda energia produzida globalmente (CERNE, 2017). Em 2016, a oferta interna de energia elétrica no país foi de 619,7 TWh, dos quais 31,5% foram consumidos pelo setor industrial, 21,4% pelo residencial, 14,4% pelo comercial, além do consumo dos setores público, energético, agropecuário e transportes (EPE, 2017a). Na Figura 1, esta apresentada a matriz energética brasileira no ano de 2016.

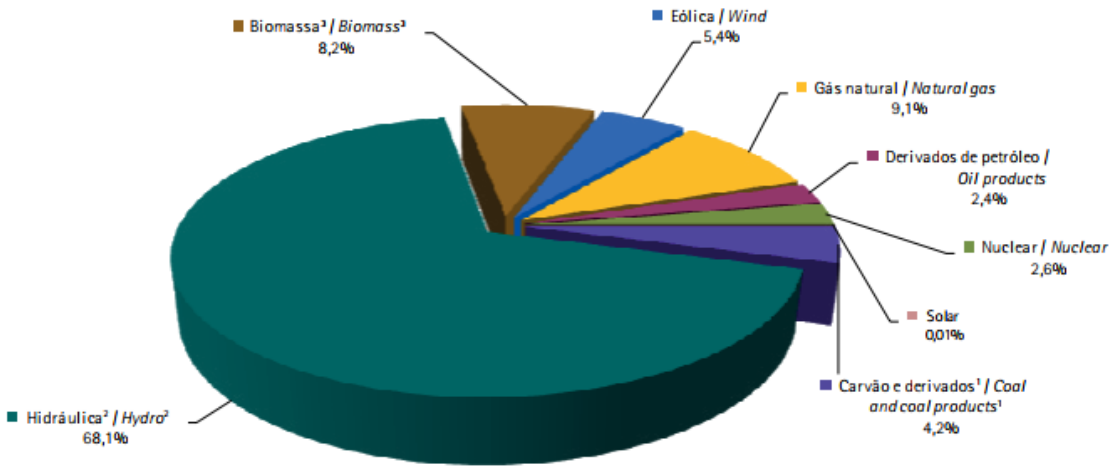


**Figura 1.** Matriz energética brasileira (EPE, 2017a).

Na Figura 1 é possível identificar que a energia no país é gerada principalmente por usinas hidrelétricas, a qual corresponde a 68,1%, seguido por gás natural com 9,1% e biomassa com 8,2%.

O Brasil é reconhecido internacionalmente pela sua capacidade de geração de energia através de fontes renováveis e, de acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia (2026), do Ministério de Minas e Energia, é estimado que a geração de energia a partir destas fontes seja de 87% até 2026.

Mesmo que a perspectiva para o futuro seja de investimentos em projetos hidrelétricos e na expansão da oferta de energia eólica e biomassa (ALMEIDA, 2013), a utilização de usinas termelétricas tem crescido em ritmo acelerado (FOELKEL, 2015). Este crescimento está incidindo na elevação do custo da energia que chega ao consumidor.

Deste modo, o preço da energia elétrica aos consumidores tem aumentado consideravelmente, em 2010 as indústrias tinham um custo de R$ 237,97 por MWh (EPE, 2013); em 2016, o valor estava 65% maior, R$ 392,83 por MWh (EPE, 2017b). Além disso, um dos principais problemas da produção de energia no Brasil são as perdas que ocorrem nos sistemas de produção, as quais são majoritariamente relacionadas à etapa de distribuição. De toda energia elétrica produzida no país, 16,1% é perdida, o que corresponde a 99,7 TWh. Esta energia perdida abasteceria um ano de consumo das residências das regiões Sudeste, Sul e Centro-Oeste, de acordo com os dados de 2016 (EPE, 2017a; EPE, 2017b).

Para o setor industrial, a energia elétrica é um dos principais insumos, representando 40% dos gastos (GANDRA, 2016). Logo, visando diminuir estes custos, as indústrias brasileiras dos setores de celulose e papel, siderurgia, açúcar e álcool e química, produzem energia para consumo próprio. Durante o ano de 2016, estes autoprodutores produziram o equivalente a 98,5 TWh, onde 55,5 TWh foram consumidos pela própria unidade geradora e o restante injetados na rede de distribuição nacional (EPE, 2017a). De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, o preço médio da energia elétrica produzida por biomassa foi de R$198,94 por MWh em abril de 2018.

## 2.2. A energia no setor de celulose e papel

A indústria de celulose kraft além de produzir a polpa celulósica, é também capaz de gerar energia na forma de vapor e energia elétrica, em um processo conhecido como cogeração. Os equipamentos utilizados para geração de energia são os mesmos encontrados em uma usina termelétrica, assim esta área da indústria pode ser classificada como tal. Inclusive em 2006, o setor de celulose e papel, foi responsável por 20% da capacidade instalada de unidades termelétricas autoprodutoras da indústria brasileira (BERNI et al, 2010).

Os principais equipamentos responsáveis pela produção de energia térmica nesta indústria são as caldeiras. Estas consistem, basicamente, de um trocador de calor que trabalha com pressão

superior à pressão atmosférica e produz vapor através da energia térmica disponibilizada por uma fonte de combustível (ELETROBRÁS, 2005).

O vapor produzido pelas caldeiras de biomassa e de recuperação química é enviado aos turbos geradores. Nas turbinas de condensação a energia mecânica contida no vapor é transformada em energia elétrica. Já, nas turbinas de contrapressão o vapor de alta pressão é transformado em baixa/média pressão e utilizado em diversas etapas do processo produtivo de polpa celulósica kraft, como nas etapas de cozimento, lavagem da polpa, concentração do licor negro, recuperação dos reagentes químicos e secagem da celulose. No caso de unidades industriais integradas para a produção de papel, grande parte da energia é gasta nas máquinas de papel, as quais são as maiores consumidoras (ALMEIDA, 2013).

Com o alto consumo de energia e as oscilações de preço do mercado, as indústrias do setor de celulose têm optado por investir nestes processos de cogeração. O foco do setor é se tornar autossuficiente, diminuindo a sua dependência de energia do sistema nacional. Algumas empresas já estão tendo sucesso nestes investimentos, produzindo energia excedente que é comercializada em leilões.

Em 2016, o setor de celulose e papel produziu 14.408 GWh, dos quais 12.031 GWh foram produzidos através do licor negro e 840 GWh a partir de lenha e carvão vegetal (EPE, 2017a). Estas fontes de combustível antes de serem as mais utilizadas pelo setor, passaram por transformações ao longo das décadas.

### 2.2.1. A matriz energética do setor de celulose e papel

Afim de demonstrar as transformações que ocorrem com relação as fontes de combustíveis utilizadas na produção de energia no setor de celulose e papel, na Figura 2 é apresentada a série histórica (1970-2016) da matriz energética do setor.

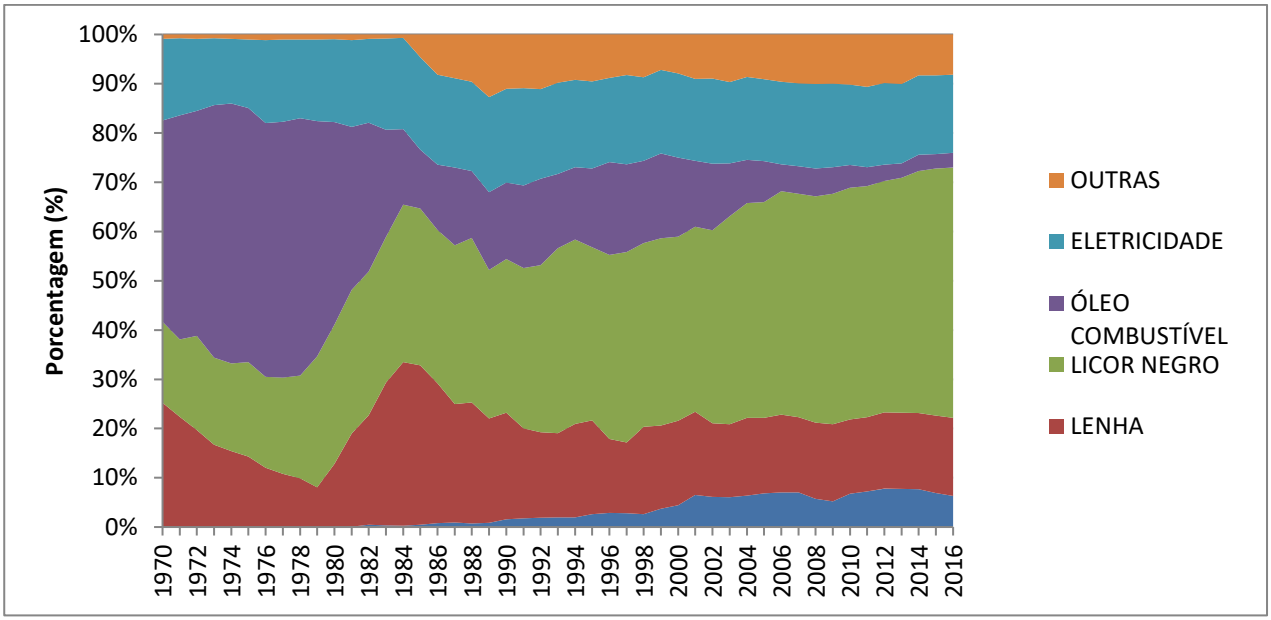


**Figura 2.** Série história da matriz energética do setor de celulose e papel. Adaptado de EPE (2017b).

Na Figura 2 é possível identificar que durante a década de 70, a indústria de celulose era abastecida, majoritariamente, pelo óleo combustível. Ao final desta década, porém, os embargos para importação deste combustível aumentaram de forma abrupta o preço de US$3,00 para US$ 30,00 o barril (equivalente a 159 L) (BOWYER et al, 2007). Desta forma, o aumento no preço do óleo combustível fez com que o consumo de lenha e outras fontes fossem mais revalorizadas.

Estas mudanças que ocorreram na matriz energética do setor também foram consequências dos estímulos advindos de políticas setoriais elaboradas governo federal como: Política Energética Nacional (PEN), Resolução Aneel nº 482/2012, Plano Nacional de Energia 2030 e Plano Nacional de Eficiência Energética. Dentre estas políticas se incluem o incentivo a autoprodução de energia e a utilização dos subprodutos disponíveis no processo, os quais colaboram com a diminuição da dependência externa de combustíveis e de energia elétrica (ALMEIDA, 2013).

Ainda, um dos principais desafios do setor de celulose e papel tem sido o de incrementar sua imagem, no Brasil e no exterior, como uma indústria verde, demonstrando sua preocupação em minimizar seus impactos ambientais negativos, em maximizar o consumo de energia oriunda de fontes renováveis ao longo de toda a sua cadeia produtiva e possuir processos eficientes (CGEE, 2013).

## 2.3. Caldeira de recuperação química

Uma das principais etapas do processo kraft é a recuperação química, que tem a caldeira de recuperação como equipamento essencial. A caldeira tem como funções: recuperar parte dos químicos empregados na etapa de cozimento, principalmente, sais de sódio, e também fornecer energia à indústria (ALMEIDA, 2013).

Esta dupla função é necessária, pois a geração de licor negro é inevitável no processo kraft. Além disso, a lixívia, como também é denominado o licor negro, possui caráter altamente tóxico e poluente, e caso não fosse utilizada como combustível na caldeira implicaria em elevado impacto ambiental (MACIEL, 2008).

Antes de ser encaminhado para a caldeira, o licor negro resultante da lavagem da polpa marrom é direcionado para os evaporadores. O objetivo desta etapa é aumentar a concentração de sólidos do licor negro para que a maior quantidade de água possível seja eliminada, e assim a maior quantidade de calor fique disponível. A concentração de sólidos inicial é entre 14% e 18% e ao final da evaporação mantém-se entre 70% e 80% (PIOTTO, 2003).

Logo depois, o licor negro é pulverizado para dentro da caldeira, e a primeira reação é a evaporação da água remanescente. Os componentes orgânicos presentes no licor sofrem combustão, e assim liberam o calor responsável por transformar a água líquida, que passa pelos tubos da caldeira, em vapor. Este vapor é direcionado aos turbo geradores para ser utilizado no processo produtivo e para a produção de energia elétrica. A eficiência das caldeiras mais modernas tem como maior influência o teor de sólidos do licor negro, assim entre teores de sólidos de 70 a 80% a eficiência será entre 60,8% a 64% (ADAMS, 1997).

Como residual do processo de combustão há a formação do smelt, formado pelos componentes inorgânicos do licor negro, o $Na_2S$ e o $Na_2CO_3$. O smelt é armazenado nos tanques de dissolução, onde há a formação do licor verde. As impurezas deste licor são retiradas por sedimentação ou filtração e este é encaminhado para a etapa de caustificação. Nesta etapa ocorrem duas principais reações químicas apresentadas nas Equações 1 e 2.

$$CaO + H_2O \rightarrow Ca(OH)_2 \quad (1)$$

$$Ca(OH)_2 + Na_2CO_3 \rightarrow 2NaOH + CaCO_3 \quad (2)$$

Na equação 1, o CaO é adicionado no licor verde, o qual reage com $H_2O$ presente no tanque, formando o $Ca(OH)_2$. Na equação 2, o $Ca(OH)_2$ reage com o $Na_2CO_3$ formando o NaOH, que é reinserido no sistema como licor branco de cozimento. Já o $CaCO_3$ também formado é calcinado através do forno de cal, como demonstrado na Equação 3, para reconverter este composto químico em CaO e assim ser reutilizado no processo de caustificação (SENAI, 2013).

$$CaCO_3 \xrightarrow{\Delta} CaO + CO_2 \quad (3)$$

Além desses compostos residuais, as caldeiras de recuperação emitem gases como $SO_2$, material particulado (sulfato e carbonato de sódio), TRS e NOx. Estes gases passam por precipitadores eletrostáticos a fim de se evitar a emissão das partículas sólidas, principalmente sulfato de sódio. Este componente químico captado é reinserido no licor negro concentrado para reposição de perdas de sulfato (SENAI, 2013).

### 2.3.1. Características do licor negro

O licor negro utilizado na caldeira de recuperação é um subproduto obtido do processo de polpação. Este material é uma solução aquosa constituída por dois terços de orgânicos extraídos da madeira, como lignina, polissacarídeos, compostos resinosos de baixa massa molar; e um terço composto por sais inorgânicos presentes nos reagentes químicos do processo e também na madeira (MIELI, 2007; CARDOSO et al, 2006).

Entre os compostos inorgânicos estão carbonato de sódio, hidróxido de sódio, sulfeto de sódio, sulfato de sódio, sílica, óxido de ferro, óxido de alumínio, cloreto de sódio e hidróxido de potássio (SENAI, 2013). Esta composição pode ser interferida devido às condições e rendimento da etapa de polpação, composição, qualidade do licor branco e devido à etapa de evaporação (BRANDAO, 2015).

Já os compostos orgânicos presentes no licor variam dependendo da espécie de madeira que é utilizada para a produção de polpa celulósica. A principal diferença entre o licor negro de coníferas e folhosas é o maior teor de lignina e o menor teor de hemicelulose nas madeiras de coníferas. Na Tabela 1 se encontra a composição química do licor negro de espécies do hemisfério norte.

**Tabela 1.** Composição química do licor negro.

| Principais componentes | Coníferas (*Softwood*) (%) | Folhosas (*Hardwood*) (%) |
|---|---|---|
| Lignina | 29 | 21 |
| Hemicelulose | 28 | 34 |
| Celulose | 43 | 45 |
| Extrativos | 10 | 2-3 |

Fonte: Adams (1997).

Na tabela 1 é possível identificar que o licor negro produzido a partir de folhosas possui maior porcentagem de hemiceluloses e celulose, enquanto que o licor produzido a partir de coníferas possui maior teor de lignina e extrativos. Esta composição química influencia as propriedades energéticas do licor negro, determinando o comportamento deste nas unidades industriais. Um dos principais parâmetros é o poder calorífico, cuja característica normalmente permite que o licor gere a energia necessária à indústria de celulose (PIOTTO, 2003).

A energia disponível no material é representada pelo poder calorífico, que pode ser apresentado em diferentes formas. O poder calorífico superior (PCS) inclui o valor de energia contido na água presente no combustível. Entretanto, o poder calorífico inferior (PCI) é a energia primária disponível, pois não inclui o valor de energia de condensação da água de formação (FOELKEL, 2015). O poder calorífico superior do licor negro de folhosas é em média 13 MJ/kg e o de coníferas é em média maior, 15,5 MJ/kg, esta diferença é devido ao maior teor de lignina e extrativos, pois possuem um alto valor energético (SIXTA, 2006).

A energia útil disponível é correlacionada com a umidade do licor e a concentração de sólidos. Na etapa de evaporação deve ser eliminado o máximo teor de água, para assim obter um licor com concentração maior do que 60%. Isso é necessário, pois a presença de umidade provoca a queda do poder calorífico, já que a água presente no material utiliza a própria energia do processo de combustão para transformação de vapor d'água, e este é perdido nas chaminés (ELETROBRAS, 2013; SENAI, 2013).

Outro parâmetro importante é a razão de matéria orgânica/matéria inorgânica, sendo um dos principais parâmetros de influência na produção de vapor na caldeira de recuperação. Os compostos orgânicos (O) e os reduzidos de enxofre contribuem para o aumento do poder calorífico, já os inorgânicos (I) agem como diluentes, reduzindo-o. Em média os licores do processo kraft encontram-se na faixa de 1,5 a 2,2 (CARDOSO et al, 2006; VELÁZQUEZ, 2006; ADAMS, 1997).

## 2.4. Caldeira de força ou caldeira de biomassa

Outro equipamento que gera vapor na indústria de celulose é a caldeira de biomassa, também chamada de caldeira auxiliar ou de força. Este tem como principal função gerar vapor para complementar a necessidade dos processos industriais e exercer a função de eliminadora de resíduos da fábrica (ALMEIDA, 2013; CGEE, 2013). Algumas indústrias estão até mesmo

recolhendo os resíduos da colheita das áreas florestais e os enviando para a unidade industrial, a fim de utilizá-los na caldeira e ampliar a produção de energia.

A biomassa inclui as cascas residuais do processo de descascamento, em campo ou na própria indústria, os cavacos que não atendem as especificações da etapa de classificação e também galhos e toras de menor diâmetro, que são resíduos no campo. Em caso de necessidade, podem ser utilizados outros combustíveis nesta caldeira, como óleo diesel e gás natural.

A biomassa que é destinada para caldeira é antes processada, de modo que se torne um material homogêneo. Depois, esta é conduzida mediante o uso de esteiras e direcionada para as correntes transportadoras (ALMEIDA, 2013). O material é retirado das correntes por meio de variadores de velocidade, e assim descarregado em uma correia que o conduz até um silo. Já no fundo do silo, existem roscas que direcionam o material para dutos alimentadores da caldeira (INTERNATIONAL PAPER, 2015).

A caldeira de leito fluidizado, uma das mais modernas tecnologias utilizadas, possui um leito com material inerte afim de favorecer a mistura das partículas. Nesta tecnologia a homogeneidade da seção garante a estabilização da temperatura e da quantidade de oxigênio, o que resulta em uma elevada qualidade de combustão (SANTOS, 2009). Além de que, permite a queima de diversos tipos de combustíveis de forma mais eficiente e minimiza os níveis de emissão de poluentes quando comparado com as caldeiras convencionais (CGEE, 2013).

A produção de vapor, enviada aos turbos geradores, também é utilizada no processo produtivo e para produção de energia elétrica. A eficiência deste processo fica em torno de 75 a 90% (FOELKEL, 2010).

### 2.4.1. Características da biomassa

O principal combustível utilizado na caldeira de biomassa são os resíduos florestais, os quais são identificados, genericamente, como biomassa. Por definição, a biomassa é uma fonte primária de energia, que consiste em matéria orgânica animal e/ou vegetal e pode ser classificada em: florestal (madeira, resíduos florestais), agrícola (palha de cana, casca de arroz, sabugo de milho) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos) (EPE, 2017a; ANEEL, 2008).

Além de ser uma das principais fontes alternativas ao consumo de combustíveis fósseis, a biomassa florestal tem como vantagens a homogeneidade da composição química, baixos teores de cinzas, de enxofre e nitrogênio, baixo custo e facilidade de processamento (FOELKEL, 2015).

A biomassa selecionada pelas empresas é processada e procura-se fazer um mix de cavacos e casca, em uma proporção de 89 a 92% de madeira, porém, não são todas as empresas

que possuem uma proporção específica para a mistura (FOELKEL, 2015). Há ainda indústrias que utilizam madeira de coníferas e folhosas, e assim os resíduos destas espécies são processados juntos.

A madeira, no geral, possui componentes fundamentais e acidentais. Dentre os fundamentais estão aqueles que toda espécie madeireira possui, como celulose, lignina e hemiceluloses; e os componentes acidentais são aqueles que não são essenciais à madeira, os quais podem ocorrer ou não, como os extrativos e as cinzas. Na Tabela 2 estão apresentados os componentes da madeira de folhosas e coníferas.

**Tabela 2.** Composição química da madeira.

| Componentes químicos | Coníferas (*Softwood*) (%) | Folhosas (*Hardwood*) (%) |
|---|---|---|
| Celulose | 40-44 | 43-47 |
| Hemicelulose | 25-29 | 25-35 |
| Lignina | 25-31 | 16-24 |
| Extrativos | 1-5 | 2-8 |
| Cinzas | 0,2 -0,5 | 0,4 – 0,8 |

Fonte: Sixta, 2006; Biermann, 1996.

Na tabela acima é identificado que a madeira de folhosas pode possuir um maior teor de celulose, hemiceluloses e extrativos. Por outro lado, a madeira de coníferas terá um maior teor de lignina. Dependendo da espécie madeireira, a composição química da casca pode variar entre 15 e 45% de celulose, 15 e 40% de lignina, 10 e 30% de extrativos e o restante de outros carboidratos e taninos (BIERMANN, 1996). A casca compõe de 5 a 28% do total de madeira do tronco, com espessura entre 2 e 40 mm (SIXTA, 2006).

Com relação às propriedades físico-químicas, a densidade é uma das mais importantes, onde quanto mais alta, maior a energia que será disponibilizada. Em média, a densidade aparente de cavacos de eucalipto com casca é de 243 $kg.m^{-3}$ e o de pinus é de 186 $kg.m^{-3}$, considerando em ambos uma umidade de 30% (FOELKEL, 2016). Quando se trata de energia disponibilizada pelo material, altos valores de densidade são melhores em comparação a baixos valores, pois assim é possível utilizar uma menor massa de madeira para atender as necessidades de produção (BOWYER et al, 2007).

Outra característica importante é o poder calorífico da biomassa. A casca possui um valor entre 18,6 e 25,8 MJ/kg, já a madeira tem um valor de 21 MJ/kg em coníferas e 19,8 MJ/kg em

folhosas, quando seca. As coníferas possuem um maior valor de poder calorífico devido ao maior teor de lignina (BIERMANN, 1996).

Da mesma forma que ocorre com os parâmetros do licor negro, a energia útil e a umidade da biomassa estão intimamente relacionadas. Quanto menor o teor de umidade, maior o calor disponibilizado pelo material, e preferencialmente o teor deve estar abaixo de 35% (FOELKEL, 2016). Contudo, nas caldeiras de leito fluidizado, há a possibilidade de operar com combustíveis de umidade até 65%, considerada elevada (MORAES, 2013).

Nas indústrias de celulose, parte das cascas são obtidas após a lavagem das toras descascadas, assim, estas podem possuir altos teores de umidade, acima de 50%. Além disso, as cascas podem cair no chão e serem contaminadas com os elementos minerais presentes no solo, prejudicando a eficiência do processo produtivo (FOELKEL, 2016). Dentre estes elementos estão cálcio, magnésio, potássio, sódio, ferro, manganês, zinco e fósforo, os quais compreendem o teor de cinzas. A casca é geralmente rica nestes compostos minerais, com teor entre 0,5 e 4% em coníferas e 1-6% em folhosas, os quais são 10 vezes maiores do que os teores na madeira (SIXTA, 2006; BIERMANN, 1996).

O teor de compostos inorgânicos presente na madeira depende das condições ambientais sob as quais a floresta cresce, pois estes são necessários para o crescimento das plantas e absorvidos do solo pela mesma (BRITO E BARRICHELO, 1985).

## 2.5. Eficiência energética

Mesmo com um alto potencial de produção de energia, as tecnologias de cogeração empregadas nas indústrias de celulose estão aquém de suas possibilidades devido à falta de controle de qualidade do processo. Desta forma, medidas voltadas à eficiência energética podem propiciar ganhos ambientais, reduções em custo, melhoria da competitividade e construção da imagem de uma indústria verde (CGEE, 2013).

A eficiência energética pode ser definida como a obtenção de serviços energéticos como produção, transporte e energia térmica, por unidade de energia utilizada. Em processos, como a produção de energia pelas caldeiras, a eficiência está relacionada com a quantidade de energia que a caldeira transfere do combustível para o vapor. Por isso, busca-se manter o nível máximo de eficiência para a minimização das perdas do sistema (ELETROBRAS, 2013; EPE, 2010; ELETROBRAS, 2005).

Para o cálculo deste índice são utilizados alguns métodos, de acordo com a Eletrobras (2005) o método direto pode ser definido como o quociente da energia produzida pela caldeira e o

consumo de energia do combustível. Já, o método indireto consiste na soma das perdas associadas à transferência de calor e aos fluxos que deixam a caldeira.

A fim de inserir o conceito e também elevar este índice de eficiência energética dos processos produtivos, uma gama de medidas pode ser tomada pelas indústrias do setor de celulose e papel. Estas podem ser dividas em medidas tecnológicas e operacionais, ambas associadas à redução do desperdício.

Dentre as medidas tecnológicas estão a aplicação de sistemas de: recuperação de calor; gerenciamento integrado de processos; e secagem integrada à caldeira, para a pré-secagem de cavacos. Também podem ser inseridos processos de rota termoquímica como a pirólise rápida, gaseificação, briquetagem e peletização. Estes processos aumentam o potencial de produção de energia da unidade industrial, podendo diminuir a dependência por fontes externas de combustível (ALMEIDA, 2013; BARBELI, 2008).

Nas medidas operacionais incluem-se o controle da mistura ar/combustível nas caldeiras, a recuperação do calor dos gases de escape das chaminés e a elevação do aproveitamento do condensado. Também podem ser aplicadas outras medidas voltadas à gestão da energia consumida por motores, bombas, compressores e ações para diminuição do uso de insumos (ALMEIDA, 2013). Contudo, para a aplicação destas medidas é necessário o conhecimento dos parâmetros de produção envolvidos.

## 2.6. Parâmetros que afetam o desempenho das caldeiras

As caldeiras são as principais responsáveis pela geração de energia em uma indústria de celulose. Esta operação precisa ser monitorada constantemente, pois as caldeiras são equipamentos complexos, que possuem diversos parâmetros que influenciam o seu funcionamento e principalmente a produção de vapor.

Com relação às entradas e saídas de energia da caldeira, a entalpia é o parâmetro que determina a energia térmica contida nos materiais e está relacionada com a pressão e a temperatura de trabalho da caldeira. A entalpia da água de alimentação é dependente da sua temperatura, assim quanto mais alta, menos energia será necessária para a produção de vapor. Com relação ao vapor de saída, quanto maior a pressão e/ou temperatura, maior será sua entalpia (energia), requerendo mais combustível para produzir uma mesma quantidade de vapor (ELETROBRAS, 2013).

Quanto maior a demanda de vapor maior será a produção, aumentando a carga de trabalho da caldeira, a quantidade de combustível queimado e de água consumida. Além disso, este parâmetro está intimamente relacionado à pressão da caldeira, onde a queda na pressão significa

falta de combustível e o excesso significa combustível a mais. Por esta razão a pressão é regulada no processo, tendo de ser mantida dentro de limites fixados na operação (ELETROBRAS, 2013; ELETROBRAS, 2005).

Outro parâmetro é o consumo de ar para a combustão, onde este é responsável por assegurar um mínimo consumo de combustível para alcançar a máxima eficiência (ELETROBRÁS, 2005). No caso da caldeira de recuperação, há três ou quatro entradas de ar ao longo da fornalha, e cada entrada é responsável por uma reação. Na caldeira de biomassa há apenas duas entradas.

Na caldeira de recuperação o ar primário é responsável pela formação de um ambiente redutor, o qual promove a recuperação dos sais de sódio do licor negro. O ar secundário é responsável por fornecer oxigênio para a combustão completa do licor e promover a oxidação do CO residual e dos gases voláteis produzidos. O ar terciário é responsável pelo fornecimento de oxigênio para completar a combustão dos gases e homogeneizar os mesmos (FERREIRA, 2013).

Na caldeira de biomassa a vazão do ar primário é responsável pela combustão no leito, enquanto que o ar secundário promove a queima dos voláteis, a qual finaliza a combustão e gera a maior parte da energia do processo. Em uma caldeira de leito fluidizado borbulhante na seção do leito há uma uniformidade do ar, o que favorece a mistura entre a biomassa e o comburente. As partículas maiores que se encontram em suspensão voltam a ser queimadas no leito e as menores queimam na fase gasosa (SÁNCHEZ e BIZZO, 2010; SANTOS, 2009).

# 3. OBJETIVOS

## 3.1. Objetivo geral

Identificar os principais parâmetros que influenciam a geração de vapor das caldeiras de recuperação e biomassa de uma indústria de polpa celulósica kraft do Brasil.

## 3.2. Objetivos específicos

- Analisar a eficiência energética das caldeiras;
- Definir regressões lineares para estimar a produção de vapor das caldeiras;
- Estipular valores ideais dos parâmetros da biomassa e do licor negro, visando a máxima produção de vapor.

# 4. MATERIAIS E MÉTODOS

## 4.1. Ambiente de estudo

Este trabalho foi elaborado em parceria com uma empresa do setor de celulose e papel, a qual foi responsável pela disponibilização dos valores dos parâmetros de uma caldeira de recuperação e de uma caldeira de biomassa, bem como de seus respectivos combustíveis: licor negro e biomassa.

Os valores foram extraídos diretamente do sistema por funcionários da empresa e enviados para análise após completar um mês de operação. Devido aos períodos de envio, não foi possível identificar, de forma pontual, problemas que possam ter ocorrido na operação.

## 4.2. Levantamento de dados do processo

As informações utilizadas foram referentes ao setor de recuperação e utilidades da unidade industrial de produção de celulose. Durante os meses de junho a dezembro de 2017 foram enviados, periodicamente, os dados dos parâmetros envolvidos na geração de energia das caldeiras.

### 4.2.1. Dados referentes às caldeiras

A caldeira de recuperação utilizada como referência é do modelo aquatubular, com uma capacidade de produção de 1200 t/h de vapor. A caldeira de biomassa é do modelo de leito fluidizado borbulhante, com uma capacidade de 280 t/h de vapor.

Os parâmetros das caldeiras possuíam valores diários consistindo em: consumo de combustível, temperatura da água de alimentação, temperatura do vapor produzido, temperatura dos gases de saída, pressão do vapor, vazão da água de alimentação, vazão do vapor produzido, vazão do ar primário, vazão do ar secundário e vazão do ar terciário (somente da caldeira de recuperação). Dentro deste período foram selecionados, para a análise das caldeiras, os dias em que não houve o consumo de óleo combustível como fonte externa.

### 4.2.2. Dados referentes à biomassa e licor negro

A empresa utiliza espécies de folhosas e coníferas, desta forma, o licor negro e a biomassa analisados neste trabalho são compostos por uma mistura de ambas as espécies. Ademais, a biomassa é constituída de cascas e cavacos, excluídos no processo de classificação.

As análises de caracterização química da biomassa e do licor negro foram executadas pela empresa parceira deste estudo. A frequência de análise era de duas vezes por semana, por esta razão os dados utilizados na análise de resultados correspondem às médias semanais de cada parâmetro. Dentre as características analisadas estão densidade aparente, poder calorífico superior, umidade e teor de cinzas, referente à biomassa, e teor de sólidos, teor de orgânicos, teor de inorgânicos e poder calorífico superior, referente ao licor negro.

## 4.3. Análise de resultados

As análises foram feitas separadamente, de modo a avaliar individualmente as caldeiras e seus combustíveis primordiais, sendo assim, os itens de discussão foram: caldeira de recuperação, licor negro, caldeira de biomassa e a biomassa. Na elaboração dos gráficos e análises estatísticas foi utilizado como ferramenta o Microsoft Excel® e o software Minitab 17®.

### 4.3.1. Cálculo de eficiência

As caldeiras de biomassa e recuperação foram analisadas com relação à sua eficiência energética. Para os cálculos foram utilizadas as Equações 4 e 5 (ELETROBRAS, 2013), aplicadas respectivamente às caldeiras citadas, relacionando a energia disponibilizada na forma de vapor e a energia fornecida pela fonte.

$$n_1 = \frac{m_{v1} \times (h_v - h_a)}{m_b \times PCI_b} \; x \; 100 \qquad (4)$$

Sendo: $n_1$– eficiência da caldeira de biomassa (%);

$m_{v1}$– massa de vapor gerada pela caldeira de biomassa (t/h);

$h_v$– valor da entalpia água na forma de vapor (kJ/kg);

$h_a$– valor da entalpia água na forma líquida (kJ/kg);

$m_b$– massa de biomassa (t/h);

$PCI_b$– poder calorífico inferior da biomassa (kJ/kg).

$$n_2 = \frac{m_{v2} \times (h_v - h_a)}{m_{ln} \times PCI_{ln}} \; x \; 100 \qquad (5)$$

Sendo : $n_2$– eficiência da caldeira de recuperação (%);

$m_{v2}$– massa de vapor gerada pela caldeira de recuperação (t/h);

$h_v$– valor da entalpia água na forma de vapor (kJ/kg);

$h_a$– valor da entalpia água na forma líquida (kJ/kg);

$m_{ln}$– massa de licor negro (t/h);

$PCI_{ln}$– poder calorífico inferior do licor negro (kJ/kg).

Para a aplicação destas equações foram utilizados os dados diários referentes a massa de vapor gerado e massa de combustível (biomassa e licor negro) consumida pelas caldeiras. Para o cálculo dos valores de poder calorífico inferior foram utilizadas as médias semanais do poder calorífico superior através das Equações 6 e 7 abaixo adaptadas de Ferreira et al (2014).

Já para o cálculo das entalpias, foi utilizada uma tabela de referência (Apêndice A), no qual foram utilizados os valores de temperatura da água de alimentação e temperatura do vapor para identificação da entalpia a ser considerada.

$$PCI_{ln} = \left(\frac{PCS_{ln} - 600 \; x \; 0{,}09 \; x \; 4\%}{238{,}89}\right) x \; 1000 \qquad (6)$$

Sendo: $PCI_{ln}$ – poder calorífico inferior licor negro (kJ/kg)

$PCS_{ln}$ – poder calorífico superior licor negro (kcal/kg)

4% - porcentagem média de hidrogênio no licor negro (CARDOSO et al, 2006)

$$PCI_b = \left(\frac{PCS_b - 600 \; x \; 0{,}09 \; x \; 6\%}{238{,}89}\right) x \; 1000 \qquad (7)$$

Sendo: $PCI_b$ – poder calorífico inferior biomassa (kJ/kg)

$PCS_b$ – poder calorífico superior biomassa (kcal/kg)

6% - porcentagem média de hidrogênio na biomassa (BRITO, 1993)

A eficiência energética foi calculada para os dias, do período de junho a dezembro, onde não houve o consumo de óleo combustível pelas caldeiras, e os resultados foram plotados em gráficos de dispersão, para assim ser observado a variação destes valores.

### 4.3.2. Diagrama de dispersão

Afim de analisar de forma preliminar as correlações entre os parâmetros, foram feitos diagramas de dispersão dos conjuntos de dados. Este diagrama consiste em detalhar a influência dos parâmetros na produção de vapor através de analíticas observações.

### 4.3.3. Correlação de Pearson

Para confirmar a significância estatística das relações apresentadas nos diagramas de dispersão e também identificar as relações lineares entre todos os parâmetros, foi feito a análise de correlação de Pearson.

A correlação de Pearson corresponde ao valor de interdependência entre duas variáveis, identificando se há uma relação linear positiva ou negativa, apresentando diferentes intensidades. Abaixo segue a classificação de acordo com Callegari-Jacques (2003):

- se a correlação for entre 0,00 e ±0,30 existe fraca correlação linear;
- entre ±0,30 e ±0,60 existe moderada correlação linear;
- entre ±0,60 e ±0,90 existe forte correlação linear;
- entre ±0,90 e ±1,00 existe correlação linear muito forte.

Neste trabalho foram consideradas as relações de níveis moderada, forte e muito forte. Contudo, para que a relação seja realmente significativa deve ser verificado o valor $p$. Desta forma, foi considerado um nível de significância $\alpha = 0{,}05$, assim para que a relação seja estatisticamente significativa o valor de $p$ deve ser menor do que $\alpha$. As tabelas referentes à esta análise se encontram nos apêndices deste trabalho (Apêndice B).

### 4.3.4. Estimativa de produção de vapor

Afim de se obter modelos matemáticos para estimar a vazão de vapor, foram elaboradas regressões lineares para a estimar a produção da caldeira de recuperação e da caldeira de biomassa através do software Minitab 17®. Inicialmente, foi feito a análise de variância de todos os parâmetros, de cada caldeira, e também de todas as características de cada combustível.

Para determinar se os coeficientes da equação foram estatisticamente significativos com a variável resposta, no caso a vazão de vapor, foi comparado ao valor $p$ obtido, um nível de significância $\alpha = 0{,}05$. Um nível de significância de 0,05 indica que há um risco de 5% de se concluir que existe uma associação quando na realidade não existe. Dessa forma quando valor $p \leq \alpha$ foi

possível concluir que houve uma associação estatisticamente significativa entre o parâmetro e a variável resposta, porém quando valor $p \geq \alpha$ não foi possível concluir que houve uma associação significativa (STATISTICAL SOFTWARE, 2010).

Com os parâmetros da regressão linear definidos, foi avaliado o $R^2$ de cada equação, o qual representa a porcentagem de variação das variáveis dependentes. Assim, quanto mais próximo de 100%, melhor será o ajuste do modelo. Também foram avaliados os resíduos mediante gráficos com relação à variância constante, independência e distribuição normal.

Para verificar se os resíduos possuem variância constante é necessário que os valores estejam distribuídos aleatoriamente em ambos os lados do eixo das abcissas, porém de forma regular e próxima; a independência é identificada quando os valores são colocados em ordem temporal, mas não apresentam um padrão de distribuição; e para uma distribuição normal os valores dos resíduos devem seguir aproximadamente uma linha (STATISTICAL SOFTWARE, 2010).

### 4.3.5. Maximização da produção de vapor

Para estimativa de produção de vapor, foram determinados os valores ótimos das características químicas dos combustíveis através do software Minitab 17®. Para isto, foi utilizada uma ferramenta de otimização de resposta visando a máxima produção de vapor. Para a base deste cálculo foi considerada a capacidade máxima de cada caldeira e os valores dos parâmetros dos combustíveis durante o período estudado.

Para concluir que a otimização estava adequada, foi preciso identificar os valores de dois fatores durante a avaliação, o erro padrão (EP) e a *desirability* composta (D). O erro padrão é utilizado para medir a exatidão da resposta média, quanto menor mais precisa é a resposta. A *desirability* composta corresponde a um valor de avaliação do resultado de otimização, com um intervalo de zero a um, onde zero indica que uma ou mais respostas estão fora dos limites aceitáveis. Este valor avalia como as definições otimizam um conjunto global de respostas (STATISTICAL SOFTWARE, 2010).

# 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

## 5.1. Eficiência energética das caldeiras

Para discussão dos resultados de eficiência energética, foram executadas análises de estatística descritiva de cada um dos quatro grupos de parâmetros. Segue abaixo as tabelas e seus respectivos resultados.

**Tabela 3.** Análise descritiva referente à caldeira de recuperação.

| Variável | Média | Coef. variação (%) | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|---|
| consumo de licor negro (tss/dia) | 7109,92 | 5,51 | 5516,79 | 7756,19 |
| vazão de vapor (t/dia) | 24144,44 | 5,87 | 18822,97 | 26368,75 |
| vazão ar primário (t/dia) | 8534,17 | 6,75 | 7144,98 | 9580,27 |
| vazão ar secundário (t/dia) | 12159,05 | 6,02 | 9851,52 | 13802,37 |
| vazão ar terciário (t/dia) | 9519,38 | 6,54 | 7664,46 | 11487,82 |
| vazão de água (t/dia) | 23659,96 | 6,28 | 18748,54 | 26366,65 |
| pressão vapor (bar g) | 99,80 | 4,04 | 95,96 | 101,26 |
| temperatura da água (ºC) | 129,51 | 4,04 | 74,74 | 136,09 |
| temperatura do vapor (ºC) | 497,48 | 0,42 | 493,00 | 507,38 |
| temperatura gases de saída (ºC) | 191,13 | 8,52 | 31,30 | 212,84 |

**Tabela 4.** Análise descritiva referente ao licor negro.

| Variável | Média | Coef. variação (%) | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|---|
| poder calorífico superior (MJ/kg) | 11,97 | 3,49 | 11,22 | 12,71 |
| teor de sólidos totais (%) | 77,06 | 1,41 | 73,99 | 79,16 |
| teor de inorgânicos (%) | 47,89 | 3,58 | 44,16 | 50,85 |
| teor de orgânicos (%) | 52,09 | 3,36 | 48,55 | 55,84 |

**Tabela 5.** Análise descritiva referente à caldeira de biomassa.

| Variável | Média | Coef. variação (%) | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|---|
| consumo de biomassa (t/h) | 88,02 | 17,93 | 55,73 | 125,13 |
| vazão de vapor (t/h) | 257,73 | 6,04 | 181,89 | 274,87 |
| pressão do vapor (bar g) | 99,64 | 0,77 | 94,09 | 100,18 |
| vazão de ar primário (t/h) | 181,00 | 11,21 | 138,66 | 214,55 |
| vazão de ar secundário (t/h) | 245,72 | 7,69 | 211,80 | 283,92 |
| temperatura da água (ºC) | 130,49 | 2,22 | 118,49 | 140,94 |
| temperatura do vapor (ºC) | 496,58 | 0,29 | 492,56 | 498,63 |
| temperatura dos gases (ºC) | 149,47 | 1,60 | 138,33 | 154,51 |

**Tabela 6.** Análise descritiva referente à biomassa.

| Variável | Média | Coef. variação (%) | Mínimo | Máximo |
|---|---|---|---|---|
| poder calorífico superior (MJ/kg) | 17,91 | 5,00 | 16,67 | 21,01 |
| densidade aparente (kg/m³) | 110,97 | 8,83 | 93,05 | 132,68 |
| umidade (%) | 54,49 | 8,31 | 47,00 | 64,15 |
| teor cinzas (%) | 4,60 | 15,01 | 3,16 | 5,96 |

Para analisar o comportamento geral das caldeiras, os resultados de eficiência energética estão apresentados na Figura 3 e Figura 4. Cada figura apresenta a curva de resultados da caldeira de recuperação e da caldeira de biomassa, como também uma linha com a média dos resultados obtidos.

**Figura 3.** Eficiência energética da caldeira de recuperação

**Figura 4.** Eficiência energética da caldeira de biomassa

Observando a estatística descritiva, o coeficiente de variação do consumo de biomassa possui maior valor do que as demais variáveis. Na caldeira de biomassa este foi de 17,93%, enquanto que na caldeira de recuperação foi de 5,51%. Dessa forma, a caldeira de recuperação apresentou nesse período uma maior estabilidade em sua eficiência, considerando que o consumo teve menor variabilidade do que a caldeira de biomassa. Esta variação no consumo pode ter sido causada pela necessidade de paradas da caldeira devido a algum problema técnico emergencial, problemas relacionados com a biomassa que abastece a caldeira, entre outros.

A caldeira de recuperação manteve uma eficiência energética média de 86% (Figura 3). Para um equipamento moderno que trabalha com um teor de sólidos de 77%, que foi a média do período estudado, a eficiência estaria entre 62,5 e 64% de eficiência de acordo com Adams (1997). Mesmo com o valor de poder calorífico superior com uma média abaixo do esperado, segundo Sixta (2006), a caldeira de recuperação obteve um ótimo desempenho.

Por outro lado, a eficiência da caldeira de biomassa se manteve próxima dos 51%, o que é considerado um valor baixo devido ao potencial da tecnologia de leito fluidizado utilizada na caldeira, onde se espera de 75 a 90% (FOELKEL, 2010). Observando as médias das variáveis referente à biomassa, a qual é uma mistura de espécies de coníferas e folhosas, o teor de umidade médio foi de 54,49% e o recomendado é um teor menor do que 35% (FOELKEL, 2016); a densidade aparente foi menor do que é descrito por Foelkel (2016); e como a biomassa utilizada possui cascas, o teor de cinzas obteve um alto valor de média. Desta forma, estres três parâmetros influenciaram na disponibilidade de energia do material, e como consequência houve um baixo desempenho energético da caldeira.

## 5.2. Análise da caldeira de recuperação

Neste item foram discutidas todas análises elaboradas com os parâmetros estudados da caldeira de recuperação, entre eles: queima do licor negro, pressão do vapor, vazão de ar primário, secundário e terciário, temperatura da água de alimentação, do vapor gerado e dos gases de saída, como variáveis preditivas e a vazão do vapor como variável resposta.

### 5.2.1. Diagrama de dispersão

Os parâmetros da caldeira de recuperação foram relacionados com a vazão do vapor. Nas Figuras 5 a 13 estão os gráficos de dispersão, seguidas pelas discussões acerca das relações observadas.

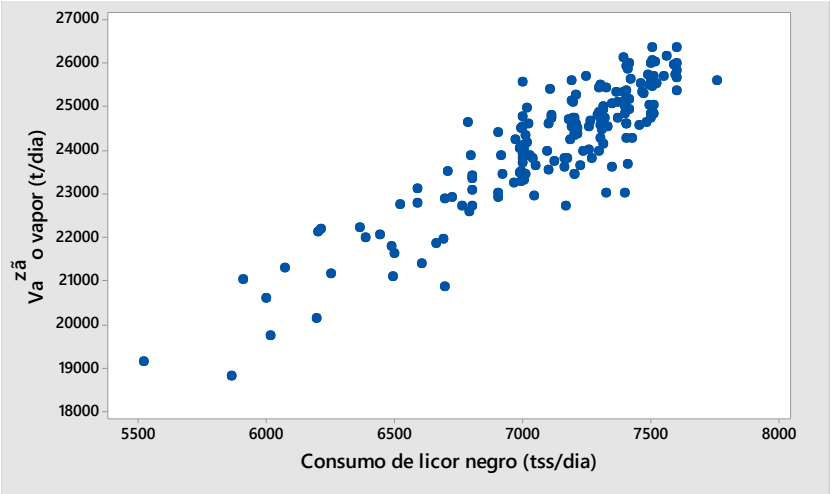


**Figura 5.** Gráfico de dispersão: consumo de licor negro x vazão de vapor

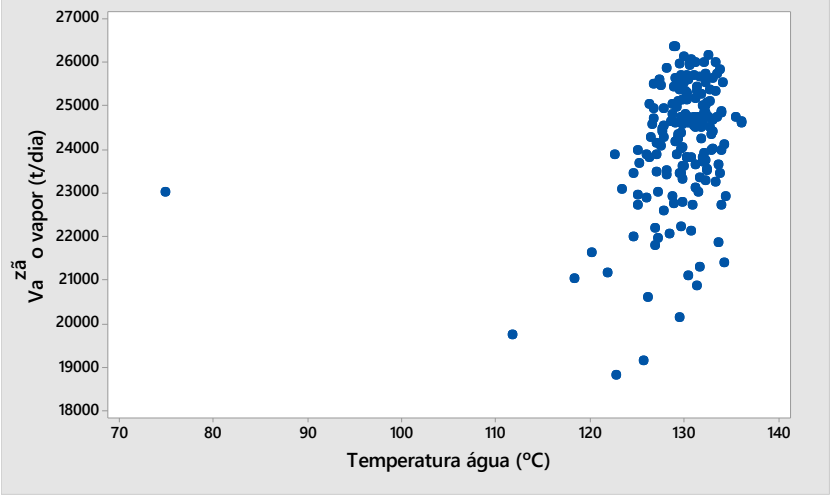


**Figura 6.** Gráfico de dispersão: temperatura da água x vazão do vapor

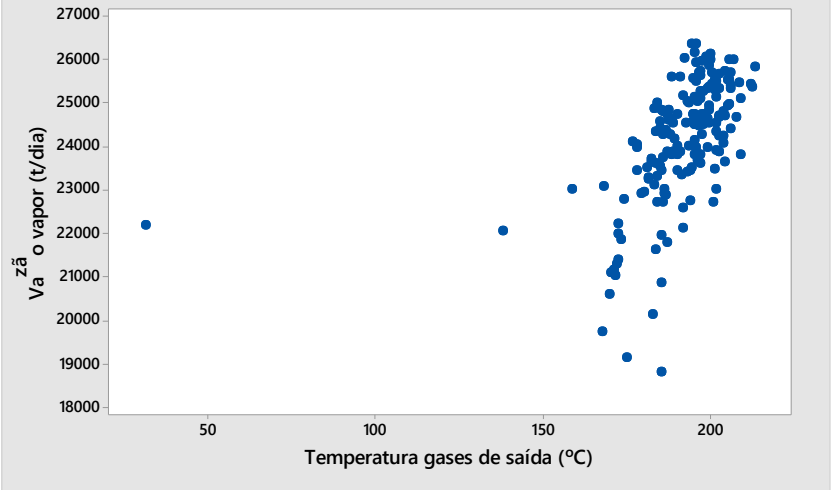


**Figura 7.** Gráfico de dispersão: temperatura dos gases de saída x vazão do vapor

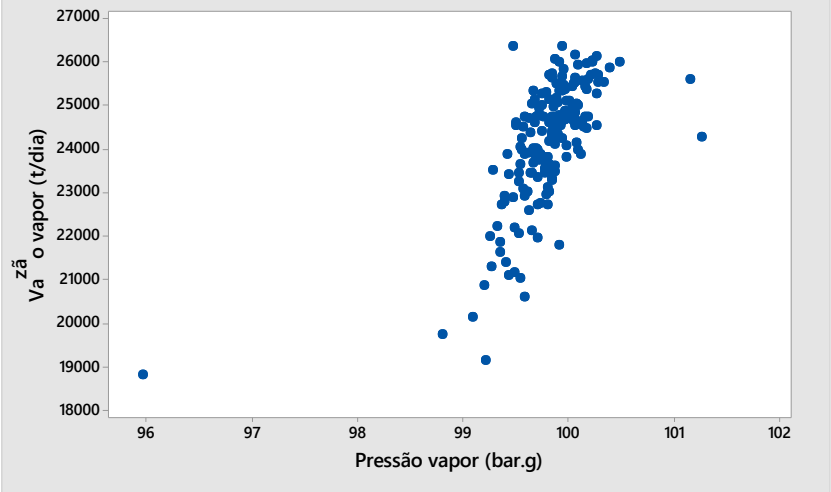


**Figura 8.** Gráfico de dispersão: pressão do vapor x vazão do vapor

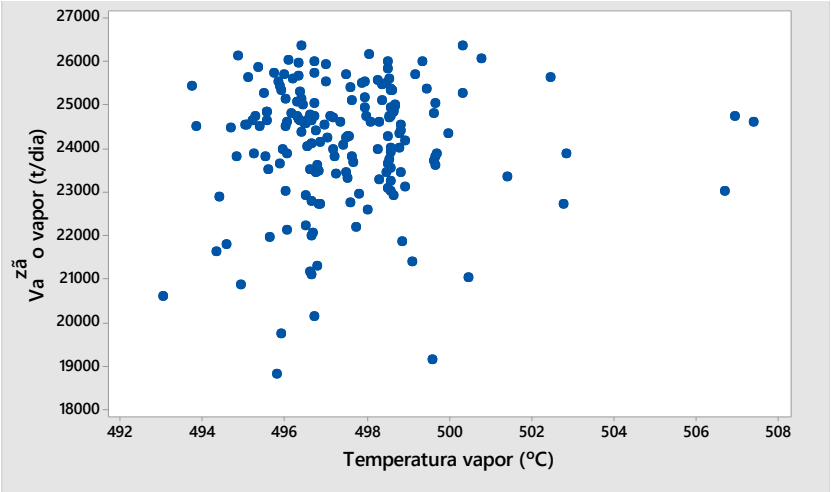


**Figura 9.** Gráfico de dispersão: temperatura do vapor x vazão do vapor

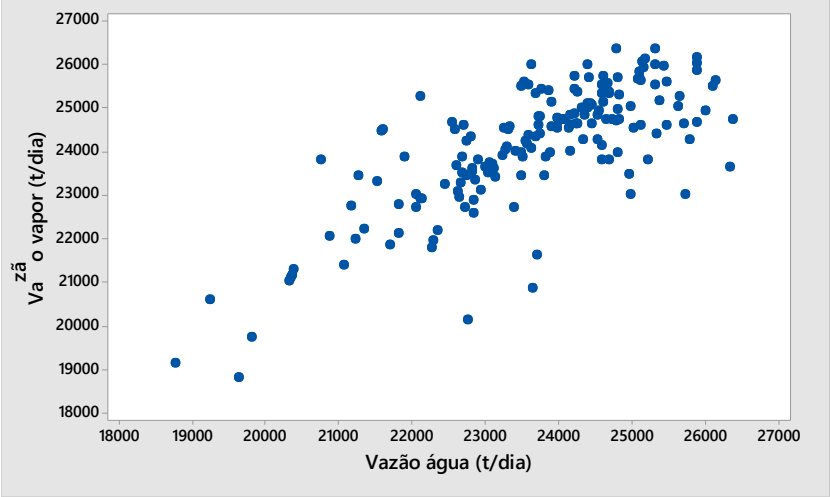


**Figura 10.** Gráfico de dispersão: vazão da água x vazão do vapor

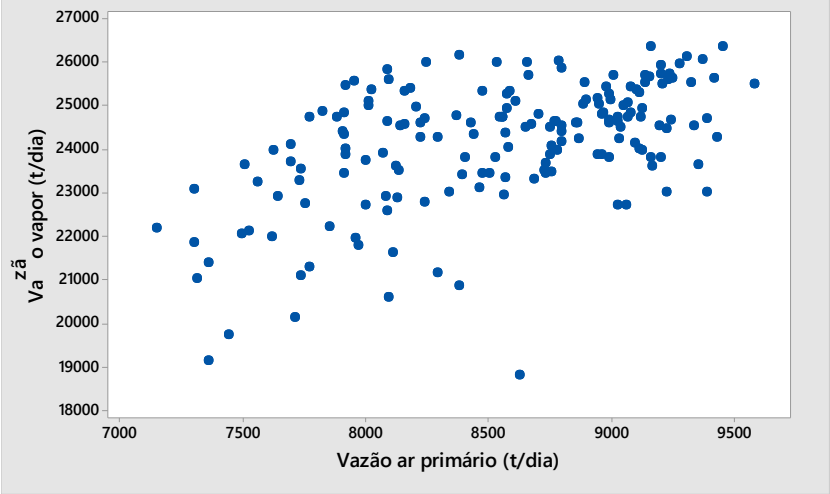


**Figura 11.** Gráfico de dispersão: vazão de ar primário x vazão do vapor

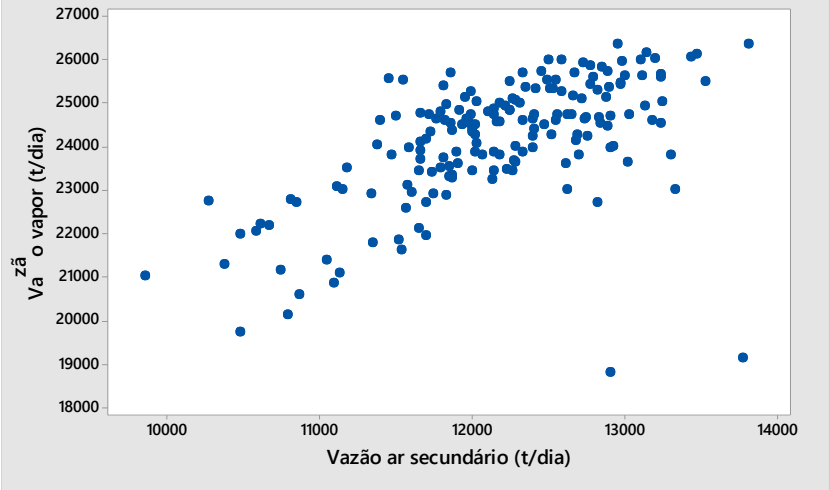


**Figura 12.** Gráfico de dispersão: vazão de ar secundário x vazão do vapor

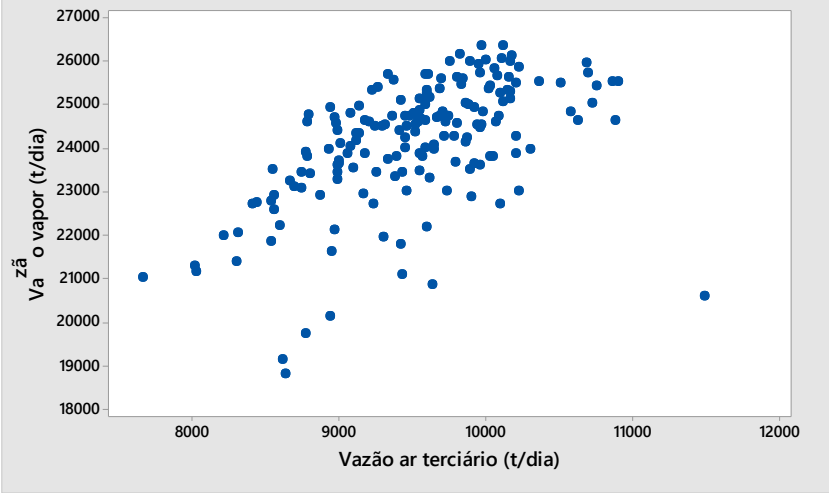


**Figura 13.** Gráfico de dispersão: vazão de ar terciário x vazão do vapor

Na Figura 5, **vazão vapor x consumo de licor negro**, houve uma relação linear positiva, onde com o aumento da queima de licor negro houve maior produção de vapor. Esta relação ocorreu, pois, a caldeira de recuperação obtém energia para transformar a água líquida em vapor a partir da combustão do licor negro, assim quanto maior o consumo do licor, maior a energia disponível e consequentemente, maior quantidade de vapor poderá ser gerada.

Também houve uma tendência dos dados à uma relação linear positiva no gráfico de **vazão vapor x temperatura água**, Figura 6. Isto é confirmado, pois, para que a água tenha a transformação física da forma líquida para vapor é necessário energia. Assim, quanto mais alta a temperatura da água, maior é a entalpia, ou seja, maior a energia da água de entrada da caldeira. Com isso, será necessário menos energia para a transformação física e esta ficará disponível para transformar mais água em vapor, o que possibilitará maior produção.

Contudo, uma maior produção eleva a temperatura dos gases emitidos pela caldeira e este aumento é um indicativo de perda elevada (ELETROBRAS, 2013). Esta perda ocorre quando há calor não aproveitado, principalmente na transformação da água líquida para o vapor. Na Figura 7, no gráfico de **vazão vapor x temperatura gases** foi possível observar esta relação, assim este é um parâmetro que merece atenção.

Nos gráficos de pressão de vapor e temperatura de vapor (Figura 8 e 9) houve variação apenas no eixo das ordenadas, pois o coeficiente de variação destes parâmetros é baixo, não havendo relação definida no gráfico. Isto ocorre, pois ambos são determinados no processo como valores-alvo, sendo assim de controle automático. Desta forma, o gráfico indica o funcionamento adequado com relação ao controle destas variáveis.

A vazão de água está relacionada com o balanço de materiais e energia do processo, onde toda quantidade de água que é inserida na caldeira deve ser transformada em vapor, assim esta vazão aumentará conforme a demanda da indústria. Esta pode ser identificada na Figura 10.

As vazões de ar da caldeira de recuperação são todas relacionadas com o processo de combustão do licor negro, assim para assegurar a combustão completa é necessário um valor ótimo de ar, o qual precisa de estar em excesso, para que se mantenha um teor suficiente de oxigênio até o final da chama (PINHEIRO e VALLE, 1995). Contudo, um exagero neste excesso de ar reduz a eficiência da caldeira. Neste caso, os gráficos (Figuras 11, 12 e 13) ilustraram as vazões de ar diretamente relacionadas a vazão de vapor e as eficiências estão dentro do recomendado.

### 5.2.2. Correlações estatisticamente significativas

De uma maneira geral, todos os parâmetros estão correlacionados, já que estes estão integrados a fim de cumprir um mesmo objetivo, que é produzir calor através da transformação da água em vapor. Neste item, foram discutidos apenas as relações entre as variáveis do estudo que apresentaram valores estatisticamente significativos, através da análise de Pearson. Os parâmetros de: consumo de combustível, vazões de ar primário, secundário e terciário, vazão de água e temperatura da água, que são *inputs* no processo, estiveram relacionados diretamente com as variáveis de *output*: vazão de vapor, pressão do vapor e temperatura dos gases de saída.

Com relação as funções dos *inputs*, o combustível é responsável por fornecer a energia na forma de calor, necessária no sistema, contudo para que ocorra a combustão do material é necessário a adição de ar, o qual ocorre através das entradas de ar primário, secundário e terciário. O calor gerado por este processo irá transformar a água na forma líquida, em vapor. Esta transformação, bem como a quantidade de calor envolvido, depende da temperatura da água, já que quanto maior a temperatura, maior é a quantidade de calor/energia que o material possui. Assim, menos energia será necessária para que ocorra a mudança de estado físico da água.

Em relação aos *outputs*, com o aumento na vazão de água, maior será a quantidade de energia necessária para sua transformação em vapor, para isto, maior deverá ser o consumo de combustível, como também as vazões de ar. Como consequência destas alterações, a produção de vapor será maior. Entretanto, com o aumento do calor disponível no sistema, as perdas poderão ser maiores. Estas perdas são na forma de calor e são identificadas quando há um aumento na temperatura dos gases de saída.

A pressão do vapor esteve relacionada estatisticamente com: o consumo do licor negro, a vazão de água, a vazão do ar terciário e a vazão do vapor. Contudo, o valor de pressão deve ser

constante no processo, independente do aumento destes parâmetros. Cardoso (1998) apresentou a evolução das caldeiras de recuperação e demonstrou que com o aumento da capacidade de queima de licor, há o aumento na pressão do vapor gerado. Portanto, as relações com a pressão do vapor foram significativas devido ao aumento no consumo de combustível, e consequente aumento dos parâmetros citados.

Observando os demais resultados, as relações seguintes foram discutidas nos gráficos de dispersão e também obtiveram um valor de coeficiente significativo. Estas relações foram: **vazão de vapor x consumo de licor negro**, **vazão de vapor x temperatura dos gases**, **vazão de vapor x vazão de água**, **vazão de vapor x temperatura da água**, como também as relações das três vazões de ar entre o consumo de licor negro e a vazão de vapor da caldeira.

### 5.2.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor

Para iniciar a construção da equação, foi feito a análise de variância dos parâmetros da caldeira em função da vazão de vapor, afim de identificar quais poderiam predizer esta produção.

**Tabela 7.** Determinação do valor *p* para a associação dos parâmetros da caldeira de recuperação

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Consumo de licor negro | 0,000 |
| Vazão de ar primário | 0,128 |
| Vazão de ar secundário | 0,811 |
| Vazão de ar terciário | 0,209 |
| Vazão de água | 0,001 |
| Pressão do vapor | 0,000 |
| Temperatura da água | 0,003 |
| Temperatura vapor | 0,818 |
| Temperatura gases de saída | 0,715 |

Considerando um $\alpha = 0,05$ e observando os resultados dos valores *p* presentes na Tabela 7, foi possível concluir que o consumo de licor negro, a vazão da água de alimentação, a pressão do vapor e a temperatura de água de alimentação possuem valores *p* menores do que o valor de $\alpha$ que foi considerado, deste modo estes parâmetros são associações estatisticamente significativas. Os demais parâmetros, foram excluídos e a análise de variância foi refeita apenas com as associações significativas.

**Tabela 8.** Determinação do valor *p* para os parâmetros significativos

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Consumo de licor negro | 0,000 |
| Vazão de água | 0,000 |
| Pressão do vapor | 0,000 |
| Temperatura da água | 0,001 |

Na Tabela 8, onde todos os valores *p* foram zero, foi possível confirmar que a associação destes parâmetros é estatisticamente significativa, sendo adequada para a predição da vazão de vapor da caldeira de recuperação. Portanto, os coeficientes calculados pela análise de variância se encontram na equação abaixo:

$$vazão\ de\ vapor = -57649 + 2{,}214C_{ln} + 0{,}1808 \times V_a + 582 \times P_v + 28{,}58 \times T_a \qquad (8)$$

onde: $C_{ln}$: consumo de licor negro

$V_a$: vazão da água de alimentação

$P_v$: pressão do vapor

$T_a$: temperatura da água de alimentação

Para avaliar se este modelo está ajustado aos dados, foi analisado o $R^2$ desta equação, foi obtido pelo programa um $R^2$ = 83,56%, o qual é considerado um valor ótimo. Para uma conclusão mais segura sobre este modelo, foi feito a análise dos resíduos, os quais representam a diferença entre aquilo que foi realmente observado e o que foi predito pela regressão (CALLEGARI-JACQUES, 2003). Abaixo seguem as figuras correspondentes aos gráficos de análise.

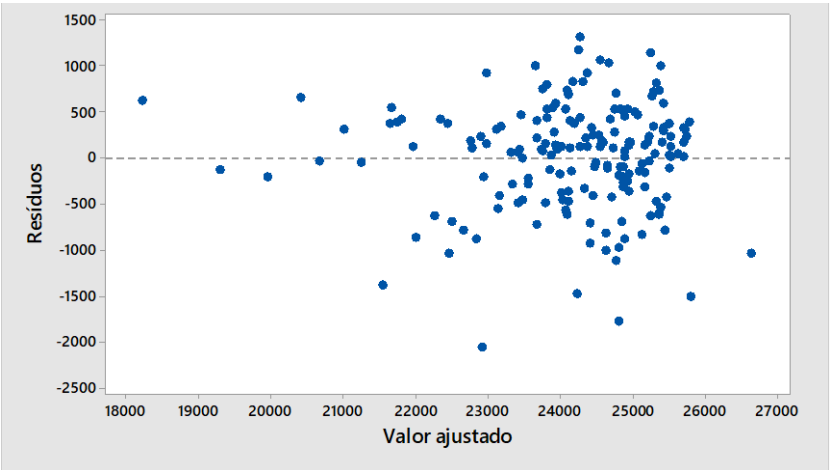


**Figura 14.** Gráfico: resíduos x ajustes dos parâmetros da caldeira de recuperação

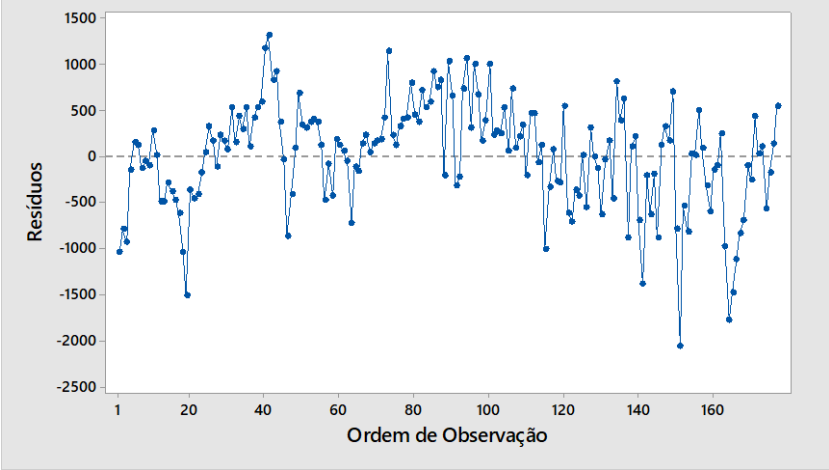


**Figura 15.** Gráfico: resíduos x ordem dos parâmetros da caldeira de recuperação

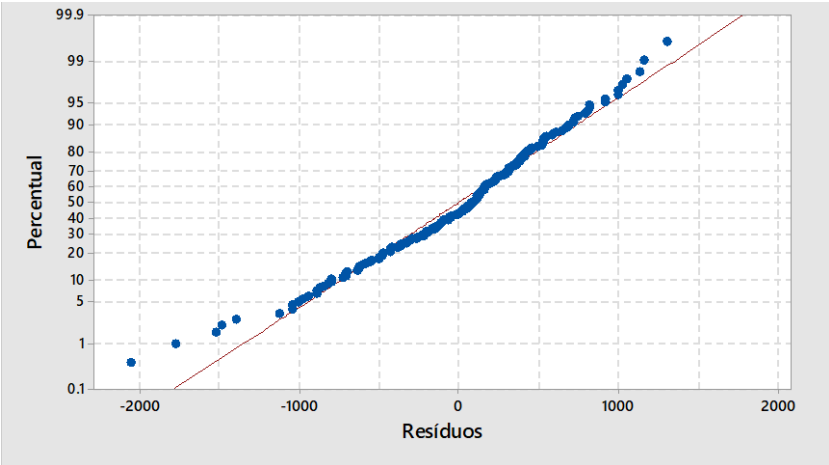


**Figura 16.** Gráfico: probabilidade de distribuição normal dos resíduos dos parâmetros da caldeira de recuperação

A partir das informações apresentadas em Statistical Software (2010), para que o modelo seja adequado é necessário que os resíduos tenham variância constante, sejam independentes e distribuídos normalmente. Na Figura 14 foi verificado que os resíduos estão distribuídos aleatoriamente em ambos os lados do eixo das abcissas, isto indica que estes possuem variância constante. Na Figura 15 foi identificado que os dados estão distribuídos aleatoriamente em torno da linha central, o que indica que estes resíduos não possuem tendências quando exibidos em ordem temporal. Na Figura 16 os dados seguiram uma linha reta, o que caracteriza que os resíduos estão distribuídos normalmente.

Portanto, com um alto valor de $R^2$ e com os valores dos resíduos atendendo aos padrões necessários, este modelo foi adequado para predizer a vazão de vapor da caldeira de recuperação.

## 5.3. Análise do licor negro

Neste item foram discutidas todas análises elaboradas com as características estudadas do licor negro, entre elas: poder calorífico superior, teor de sólidos totais, teor de sólidos orgânicos e teor de sólidos inorgânicos, como variáveis preditivas.

### 5.3.1. Diagrama de dispersão

As características do licor negro foram relacionadas com a vazão do vapor da caldeira de recuperação, sendo esta a variável resposta. Nas Figura 17 a 20 estão os gráficos de dispersão e em seguida as discussões acerca das relações observadas.

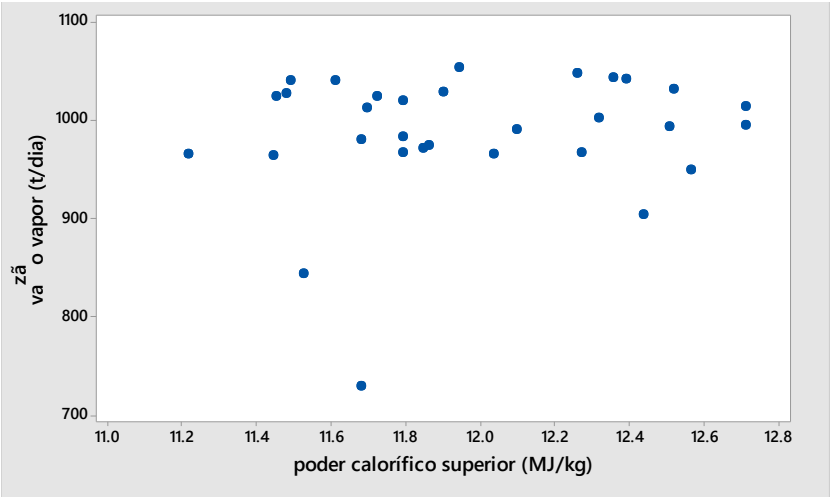


**Figura 17.** Gráfico de dispersão: poder calorífico superior x vazão de vapor

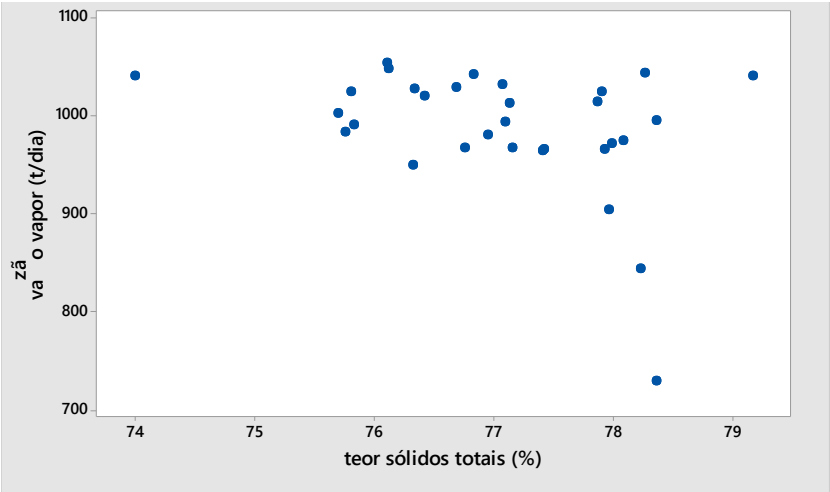


**Figura 18.** Gráfico de dispersão: teor de sólidos totais x vazão de vapor

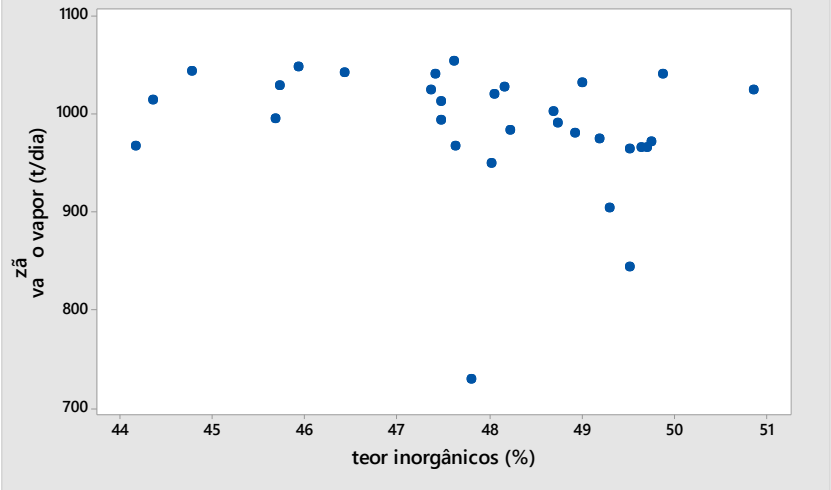


**Figura 19.** Gráfico de dispersão: teor de inorgânicos x vazão de vapor

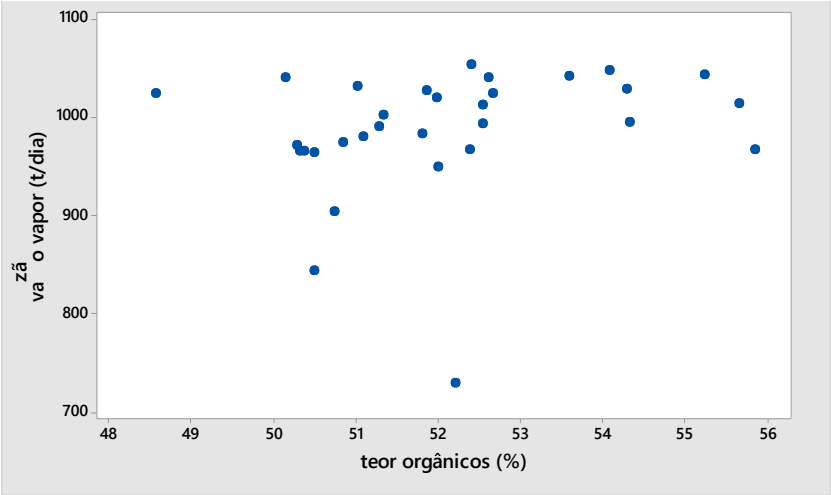


**Figura 20.** Gráfico de dispersão: teor de orgânicos x vazão de vapor

A partir da revisão bibliográfica era esperado que as características do licor negro estivessem relacionadas com a vazão de vapor, principalmente o poder calorífico superior, o qual compreende a energia que é disponibilizada pelo combustível. Contudo, nos gráficos não foi identificado uma relação linear entre os dados. A maior parte destes estão distribuídos no sentido horizontal, na parte superior dos gráficos, identificando o processo dentro do limite de produção, que é de 1200 t/h.

### 5.3.2. Correlações estatisticamente significativas

A partir da análise de Pearson pode ser identificado que o teor de sólidos totais do licor negro está relacionado diretamente com a vazão de vapor. Esta relação ocorre, porque quanto maior o teor de sólidos, menor será a quantidade de água presente no licor, e consequentemente

maior será a quantidade de calor disponível para o processo de combustão, portanto, a vazão de vapor poderá ser maior.

O teor de sólidos totais é constituído de compostos orgânicos e inorgânicos. Um maior teor de orgânicos está associado com um poder calorífico maior, já que estes compostos químicos contribuem com o aumento deste parâmetro. Por outro lado, os inorgânicos são inversamente proporcionais ao poder calorífico (VELÁZQUEZ, 2006).

### 5.3.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor

Para a construção de outro modelo matemático que também pudesse predizer a produção da caldeira de recuperação, foi feito a análise de variância das variáveis do licor negro em função da vazão de vapor.

**Tabela 9.** Determinação do valor *p* para a associação das características do licor negro

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Poder calorífico superior | 0,887 |
| Teor de sólidos totais | 0,028 |
| Teor de inorgânicos | 0,413 |
| Teor de orgânicos | 0,474 |

Considerando um $\alpha = 0{,}05$ e observando os resultados dos valores *p* presentes na Tabela 9, foi possível concluir que apenas o teor de sólidos totais obteve um valor $p < \alpha$, sendo assim uma associação estatisticamente significativa. Deste modo, os demais parâmetros foram excluídos e a análise de variância foi refeita apenas com esta associação.

**Tabela 10.** Determinação do valor *p* da característica significativa do licor negro

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Teor de sólidos totais | 0,040 |

Observando o resultado do valor *p* presente na Tabela 10, foi possível concluir que o teor de sólidos totais foi uma associação estatisticamente significativa. Os coeficientes correspondentes à esta análise seguem na equação abaixo:

$$Vazão\ de\ vapor = 2711 - 22{,}4 \times T_s \qquad (9)$$

onde: $T_s$: teor de sólidos totais

Para avaliar se este modelo está ajustado aos dados, foi analisado o $R^2$ obtido para esta equação. Neste modelo o $R^2$ foi igual a 13,72%, o que é considerado um valor muito baixo de significância. Contudo, para confirmar que este modelo não está adequado, foram elaborados gráficos para a análise dos resíduos.

w

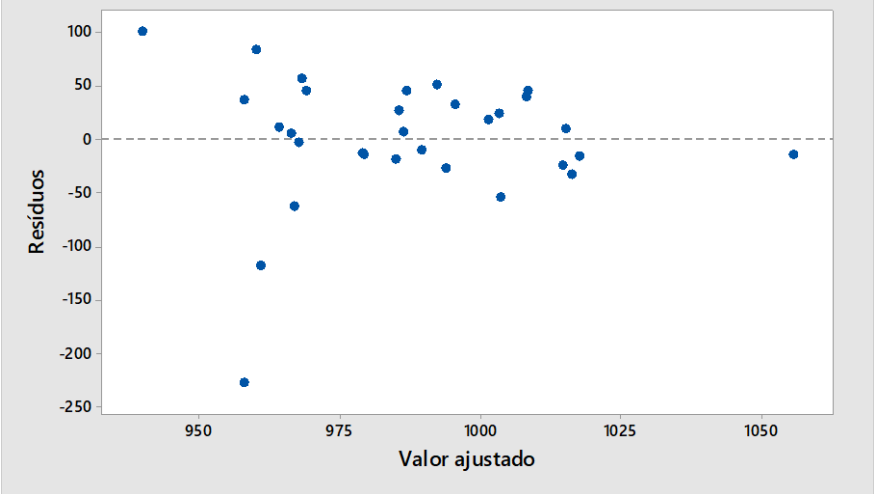


**Figura 21.** Gráfico: resíduos x ajustes das características do licor negro

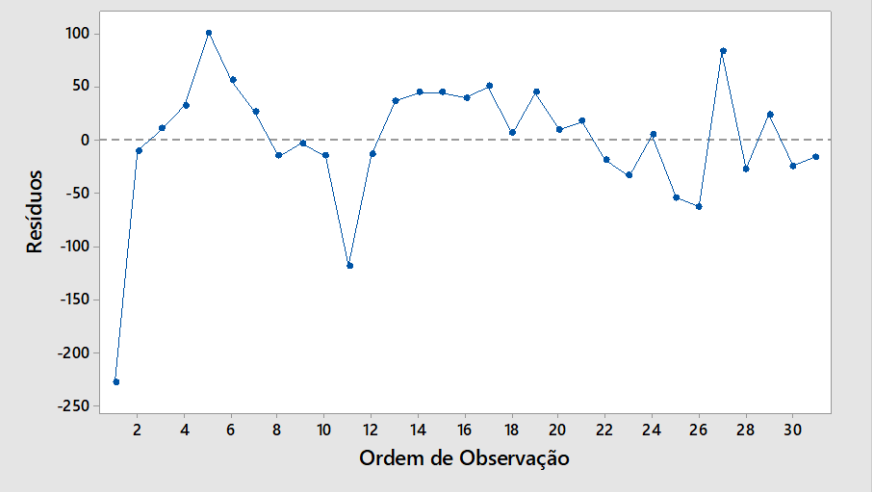


**Figura 22.** Gráfico: resíduos x ordem das características do licor negro

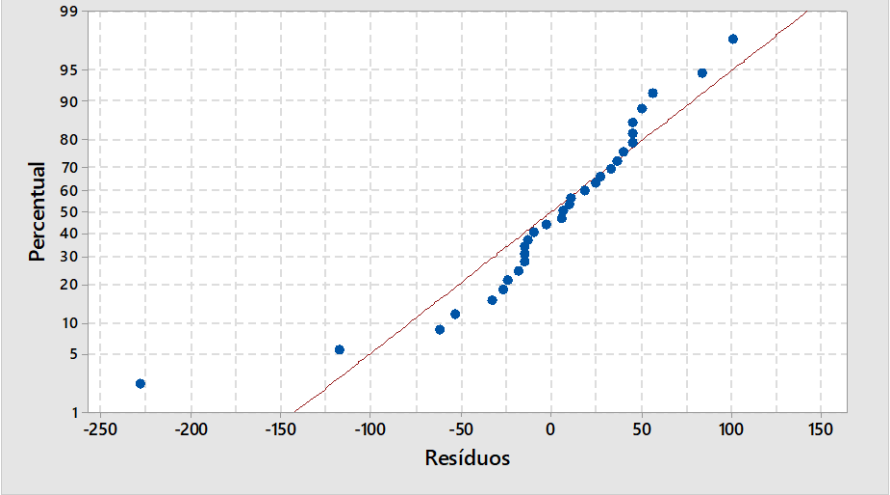


**Figura 23.** Gráfico: probabilidade normal dos resíduos das características do licor negro

Os gráficos foram analisados para verificar se os resíduos atendiam as pressuposições para que o modelo fosse adequado. Na Figura 22 os dados estão distribuídos aleatoriamente e na Figura 23 estes estão distribuídos de forma normal, contudo na Figura 21 os dados de valores ajustados estão distantes do eixo das abcissas e também entre eles, o que verifica que o modelo não atendeu as suposições.

Desta forma, com baixo valor de $R^2$ e com os dados de valor ajustado dos resíduos não seguindo o padrão necessário para atender as pressuposições, este modelo não foi adequado para predizer a vazão de vapor da caldeira de recuperação.

### 5.3.4. Maximização da produção de vapor

Através de uma ferramenta de otimização de resposta do software Minitab 17®, foi calculado, os valores considerados ideais das características do licor negro, para a produção máxima de vapor da caldeira de recuperação. Os valores analisados foram aqueles praticados pela indústria durante o período estudado, por isso as respostas são ideais considerando a situação estudada.

Na otimização a *desirability* composta foi 0,8464 e o erro padrão foi 43,7, ambos os valores não se encontram ideais, mas são aceitáveis. Para os cálculos foi utilizado como valor alvo de produção de vapor 1200 t/h, que é a capacidade máxima da caldeira de recuperação, porém considerando os valores das características trabalhadas, a produção máxima possível seria de 1120 t/h.

Os valores ideais das características do licor negro, considerando a situação estudada, são:

- Poder calorífico superior: 12,71 MJ/kg
- Teor de sólidos totais: 74,82%
- Teor de inorgânicos: 44,91%
- Teor de orgânicos: 54,99%

O valor de poder calorífico superior foi o mais alto possível dentro do que foi utilizado no período, porém, ele ainda se encontra abaixo do que é estimado por Sixta (2006), entre 13 e 15,15 MJ/kg. O teor de sólidos totais encontra-se acima do que é recomendado por SENAI (2013), que determina que uma concentração maior do que 60% já é adequada.

A relação entre o teor de orgânicos e inorgânicos foi de 1,22, a qual está fora do recomendado pela literatura (ADAMS, 1997). Não foi possível aumentar esta relação, pois conforme os valores dos teores eram alterados, maior se encontrava o valor do erro padrão.

## 5.4. Análise da caldeira de biomassa

Neste item, foram discutidas as análises elaboradas com os parâmetros estudados da caldeira de biomassa, entre eles as variáveis preditivas: consumo de biomassa, pressão do vapor, vazão de ar primário e secundário, temperatura da água de alimentação, do vapor gerado e dos gases de saída; e como variável resposta a vazão de vapor.

### 5.4.1. Diagrama de dispersão

Os parâmetros da caldeira de biomassa foram relacionados com a variável resposta vazão de vapor. Nas Figuras 24 a 30 estão os gráficos de dispersão, seguidas pelas discussões acerca das relações observadas.

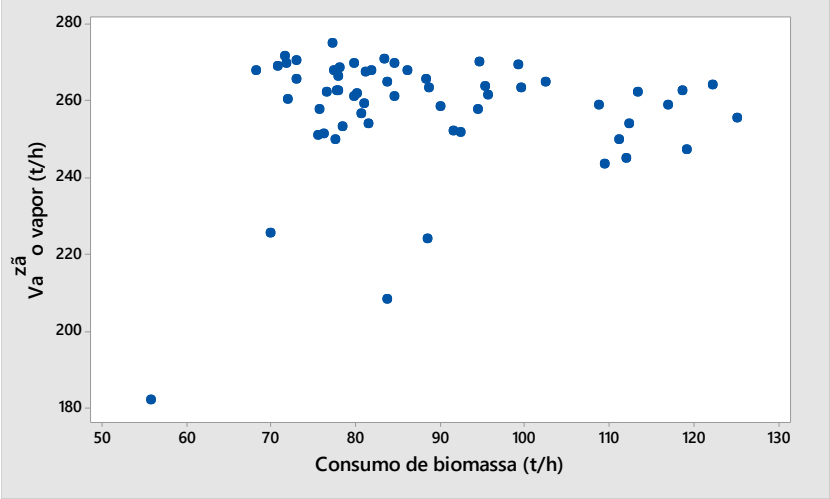


**Figura 24.** Gráfico de dispersão: consumo de biomassa x vazão de vapor

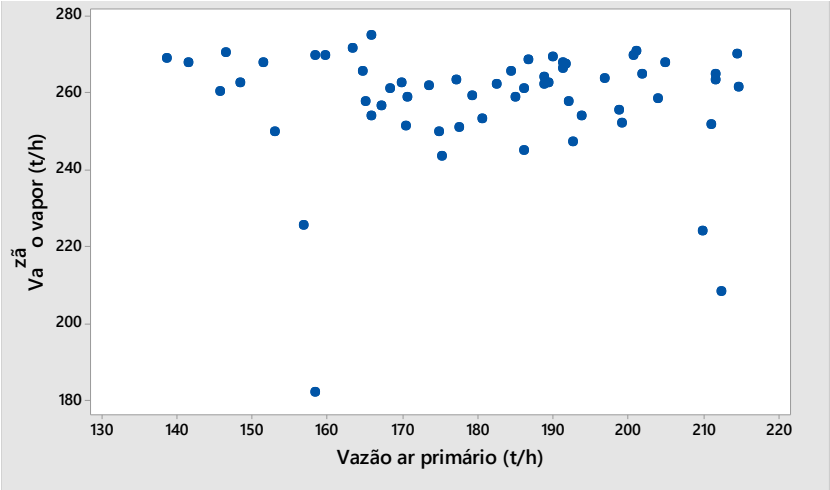


**Figura 25.** Gráfico de dispersão: vazão de ar primária x vazão de vapor

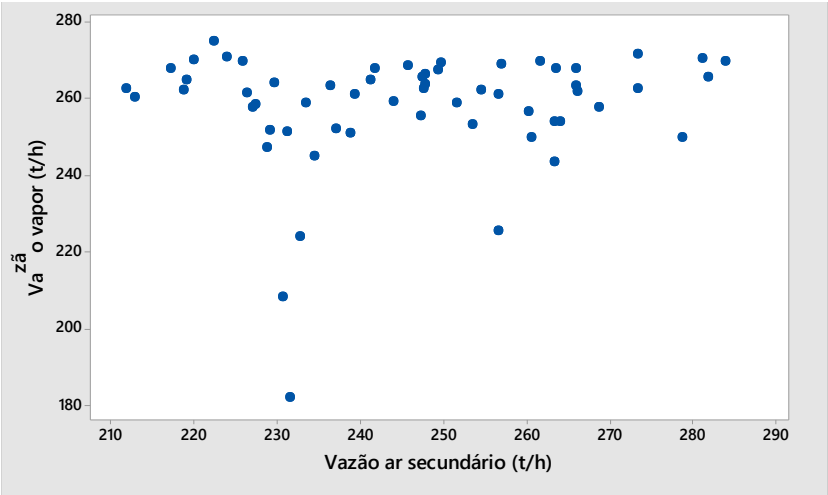


**Figura 26.** Gráfico de dispersão: vazão de ar secundário x vazão de vapor

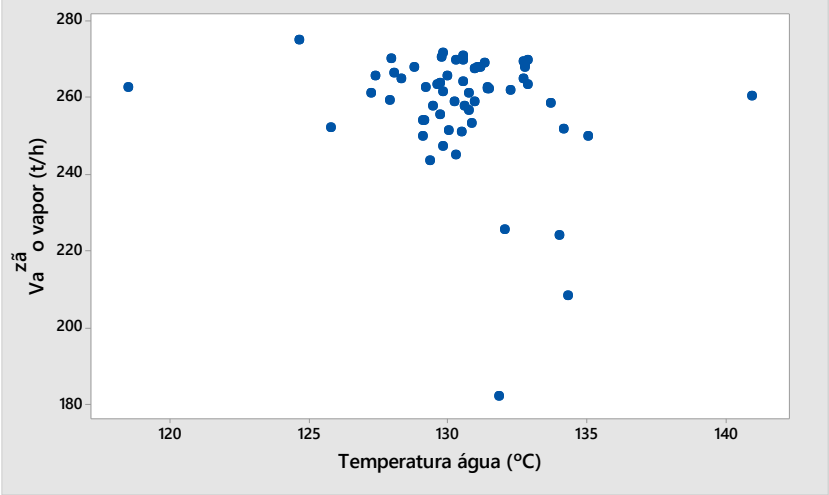


**Figura 27.** Gráfico de dispersão: temperatura da água x vazão de vapor

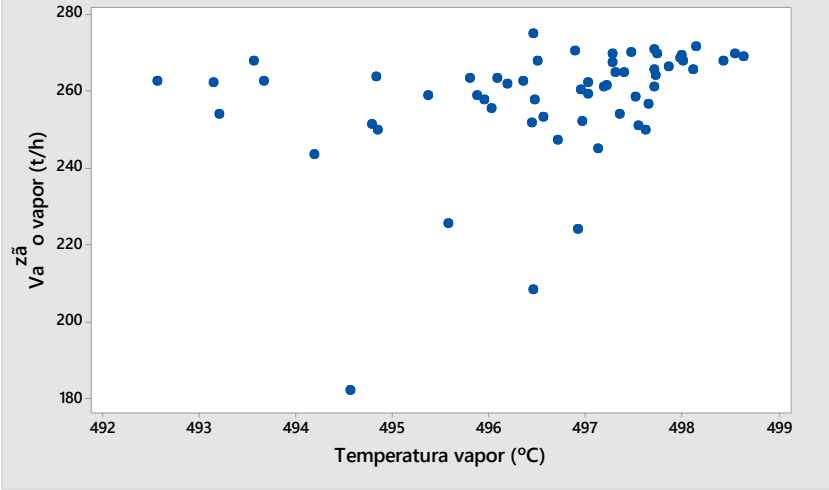


**Figura 28.** Gráfico de dispersão: temperatura do vapor x vazão do vapor

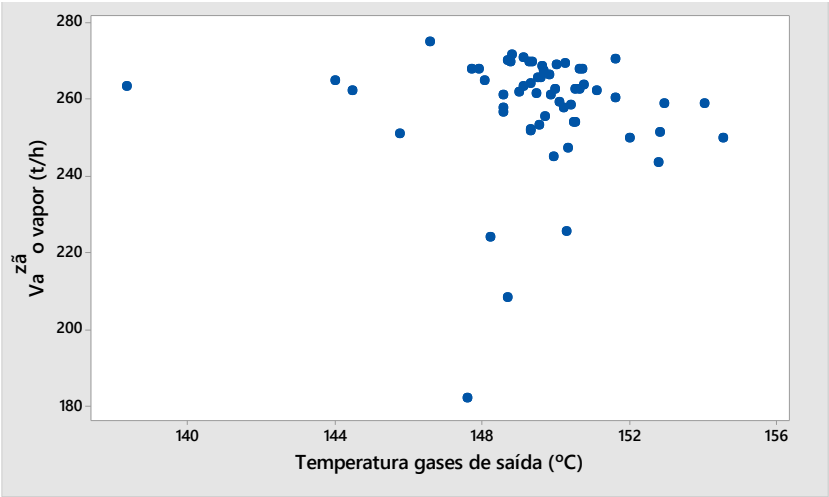


**Figura 29.** Gráfico de dispersão: temperatura dos gases de saída x vazão de vapor

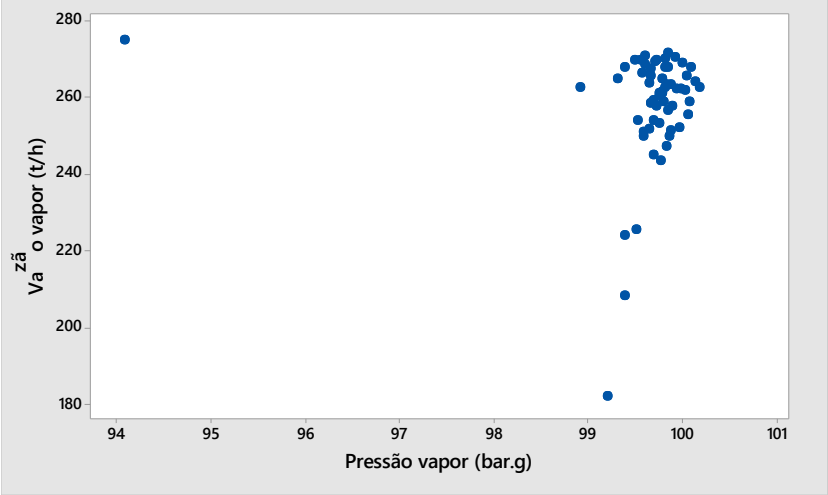


**Figura 30.** Gráfico de dispersão: pressão do vapor x vazão do vapor

A relação de **vazão de vapor x consumo de biomassa** na Figura 24 demonstrou a tendência de uma relação linear positiva. Isto ocorre, pois, a biomassa como combustível desta caldeira, disponibiliza energia para transformar a água da forma líquida para vapor. Assim, quanto maior o consumo de biomassa, mais energia ficará disponível para produzir uma maior quantidade de vapor. Contudo, esta relação não é infinita, pois existe um limite de acordo com a capacidade da caldeira, a qual é de 280 t/h.

Com relação as vazões de ar, a alimentação do ar primário está relacionada com a combustão e a fluidização do leito, enquanto que o ar secundário é responsável pelo processo de combustão e selagem. A vazão de ar tem que ser suficiente para que a combustão seja completa, porém, em excesso esta pode prejudicar a queima, por isso os valores deste parâmetro devem ser controlados. No gráfico de **vazão de vapor x vazão ar primário** (Figura 25) não houve uma relação evidente, mas notou-se que a variação da vazão de ar não tem grande alteração na produção de vapor, onde esta se mantém próximo ao limite de produção. Isto indica que durante o período estudado houve o controle desta variável. Já a relação gráfica da Figura 26, **vazão de vapor x vazão ar secundário**, segue semelhante ao que ocorreu na vazão de ar primário e a produção de vapor.

Nos gráficos de **vazão de vapor x temperatura água**, Figura 27, não houve a tendência de uma relação linear. Contudo, para que ocorra a transformação da água da forma líquida para vapor é necessário energia, e quanto mais alta a temperatura da água, maior é a entalpia da água de entrada da caldeira. Desta forma, menos energia será necessária para a transformação física e esta ficará livre para transformar mais água em vapor, o que possibilitará maior produção

Com relação ao gráfico da Figura 28, **vazão de vapor x temperatura vapor**, não houve uma relação definida, apenas foi observado um baixo valor de coeficiente de variação da

temperatura do vapor. Esta pequena variação é adequada, pois quanto maior a temperatura do vapor, maior a demanda por combustível (ELETROBRAS, 2013).

Já a temperatura dos gases de saída aumenta conforme a demanda de produção de energia, onde uma maior quantidade de calor fica disponível no sistema. No entanto, este aumento na temperatura indica que está ocorrendo perdas de calor no sistema, pois é esperado que esta temperatura seja constante. No gráfico de **vazão de vapor x temperatura gases de saída** não há uma relação linear evidente (Figura 29).

Observou-se na Figura 30, gráfico de **vazão de vapor x pressão do vapor**, baixos valores de coeficiente de variação da pressão, assim o gráfico apresentou uma distribuição de dados verticalizada, não havendo relação definida. Isto ocorre, pois, o valor de pressão deve ser constante, sendo independente da vazão de vapor. Este valor é determinado no processo como um valor-alvo, sendo assim controlado automaticamente.

### 5.4.2. Correlações estatisticamente significativas

Teoricamente todos os parâmetros das caldeiras estão correlacionados, pois estes estão associados a fim de cumprir uma mesma função, que é produzir calor através da transformação da água em vapor. Contudo, neste item, foram discutidos apenas as relações entre as variáveis do estudo que apresentaram valores estatisticamente significativos, através da análise de Pearson. Os parâmetros de: consumo de combustível, vazões de ar primário e secundário e temperatura da água, que são *inputs* no processo, estiveram relacionados com as variáveis de *output*: pressão do vapor, temperatura do vapor e temperatura dos gases de saída.

Com relação as funções dos *inputs*, o combustível e as entradas de ar primário e secundário são responsáveis pelo processo de combustão e pela geração de calor. O calor gerado por este processo irá transformar a água líquida, em vapor. Nesta transformação, quanto maior a temperatura da água de alimentação, maior é a quantidade de calor/energia que esta possui. Assim, menor será a quantidade de energia necessária para que ocorra a mudança de estado físico da água.

Em relação aos *outputs*, quando há um aumento da vazão de ar primário, o consumo de biomassa também aumenta, já que esta variável é responsável pela combustão. Consequentemente, maior quantidade de energia ficará disponível, assim pode haver perdas de energia. Estas perdas são na forma de calor e são identificadas quando há um aumento na temperatura dos gases de saída (SÁNCHEZ e BIZZO, 2010). Contudo, no estudo foi identificado que a vazão de ar primário esteve inversamente relacionada com a temperatura dos gases de saída e a relação com a vazão de ar secundário não foi significativa.

Ainda com relação as vazões de ar, o ar primário é responsável pela primeira etapa da combustão, enquanto que o ar secundário promove a queima dos voláteis em uma segunda etapa. Para o funcionamento adequado da caldeira deve haver uma relação entre as vazões, e esta deve ser constante (SÁNCHEZ e BIZZO, 2010). Por isso, foi significativo, de forma inversa, a relação de ar primário e secundário.

Entre os parâmetros de *outputs*, a pressão do vapor e a temperatura do vapor são variáveis que devem ser constantes durante o processo. Porém, foram identificadas relações diretas entre a temperatura do vapor x consumo de combustível e pressão do vapor x temperatura da água. Estas relações podem ser explicadas pelo aumento de energia disponibilizada no sistema, em que este causou uma variação nas características do vapor produzido. Todavia, em um processo totalmente controlado não haveria esta relação.

### 5.4.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor

Com o objetivo de determinar um modelo matemático, foi feito a análise de variância dos parâmetros da caldeira de biomassa em função da vazão de vapor, afim de identificar quais são significativos na predição desta produção.

**Tabela 11.** Determinação do valor *p* para a associação dos parâmetros da caldeira de biomassa

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Consumo de biomassa | 0,106 |
| Vazão de ar primário | 0,557 |
| Vazão de ar secundário | 0,682 |
| Pressão do vapor | 0,983 |
| Temperatura água | 0,026 |
| Temperatura vapor | 0,003 |
| Temperatura gases de saída | 0,855 |

Observando os valores *p* na Tabela 11 e considerando um $\alpha = 0,05$, foi possível concluir que apenas a temperatura da água de alimentação e a temperatura do vapor possuem valores de $p < \alpha$, por isso são associações estatisticamente significativas. Portanto, os demais parâmetros foram excluídos e a análise de variância foi refeita apenas com estas associações.

**Tabela 12.** Determinação do valor p dos parâmetros significativos da caldeira de biomassa

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Temperatura água | 0,015 |
| Temperatura vapor | 0,004 |

Na Tabela 12 com os resultados do valor *p*, foi possível confirmar que os dois parâmetros são associações estatisticamente significativas. Os coeficientes calculados através da análise de variação estão apresentados na equação abaixo:

$$Vazão\ de\ vapor = 4{,}04 \times T_v - 1{,}70 \times T_a \quad (10)$$

onde: $T_v$: temperatura do vapor

$T_a$: temperatura da água de alimentação

Através do valor de $R^2$ obtido pelo programa, foi avaliado se este modelo está ajustado aos dados. Neste caso, o $R^2$ foi igual a 17,47%, o que é considerado um valor muito baixo de significância. Contudo, para confirmar que este modelo não foi adequado, foram elaborados gráficos para a análise dos resíduos.

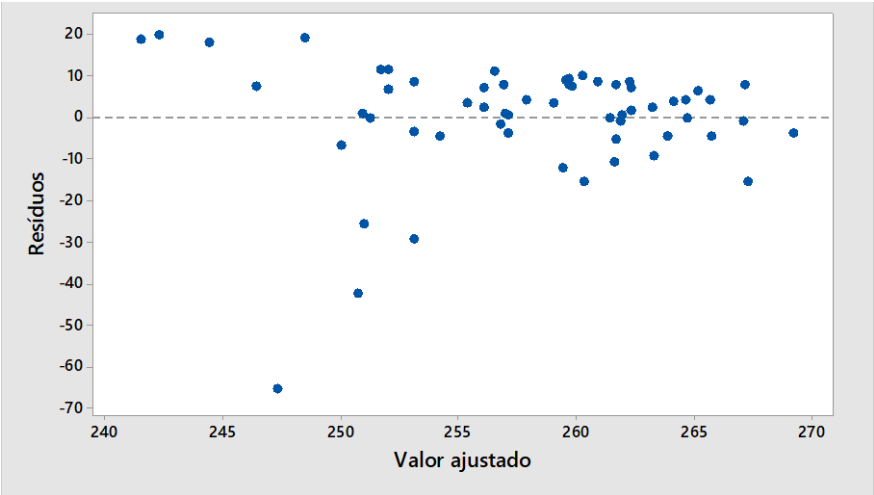


**Figura 31.** Gráfico: resíduos x ajustes dos parâmetros da caldeira de biomassa

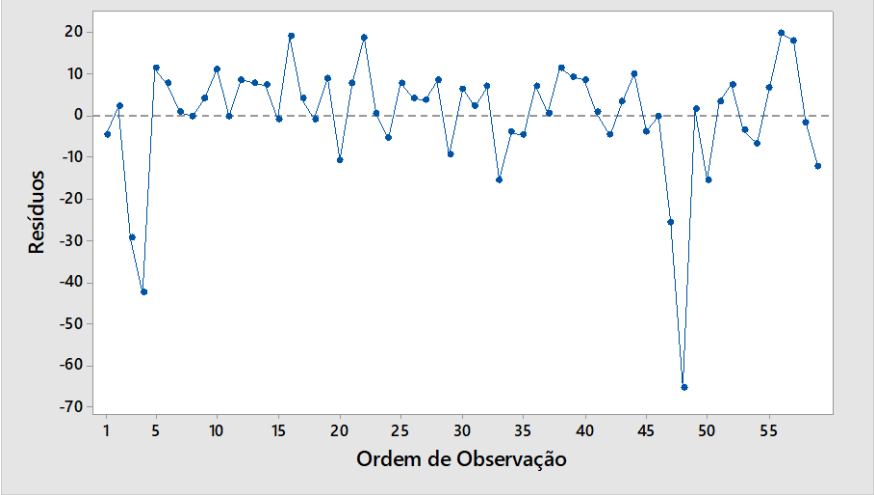


**Figura 32.** Gráfico: resíduos x ordem dos parâmetros da caldeira de biomassa

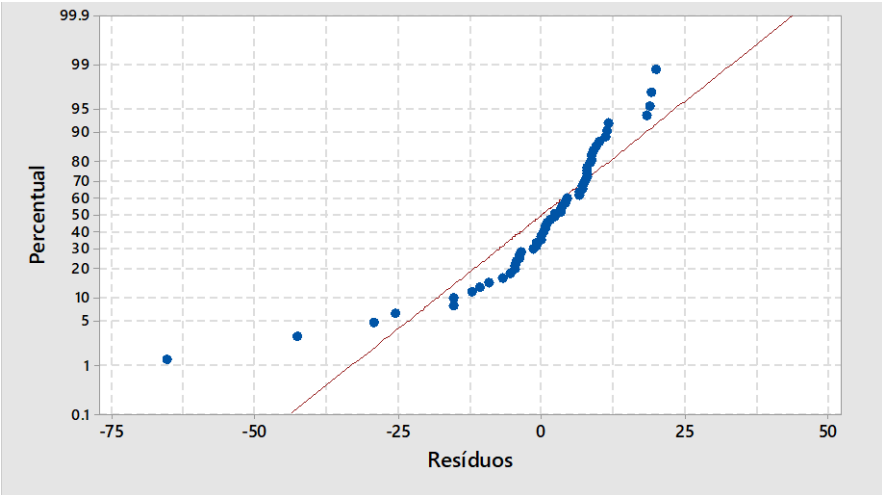


**Figura 33.** Gráfico: probabilidade normal dos resíduos dos parâmetros da caldeira de biomassa

Os gráficos apresentados são para verificar se os resíduos têm variância constante, se são independentes e se tem distribuição normal. Na Figura 32 os dados foram distribuídos de forma aleatória, porém na Figura 31 e na Figura 33 foram identificados muitos *outliers*.

Portanto, como o valor de $R^2$ foi baixo e os valores dos resíduos não seguiram o padrão necessário, este modelo não atendeu as pressuposições, por isto este não foi adequado para predizer a vazão de vapor da caldeira de biomassa.

Cabe ressaltar que a não identificação de um modelo linear não quer dizer que estas variáveis não estão correlacionadas, mas sim que os parâmetros podem estar associados através de outras análises estatísticas que não pertencem ao escopo deste trabalho.

## 5.5. Análise da Biomassa

Neste item, foram discutidas todas análises elaboradas com as características estudadas da biomassa. Como variáveis preditivas: poder calorífico superior, densidade aparente, teor de umidade e teor de cinzas, e como variável resposta a vazão de vapor.

### 5.5.1. Diagrama de dispersão

As características da biomassa foram relacionadas com a vazão do vapor da caldeira de biomassa. Nas Figuras 34 a 37 estão os gráficos de dispersão, seguidas pelas discussões acerca das relações observadas.

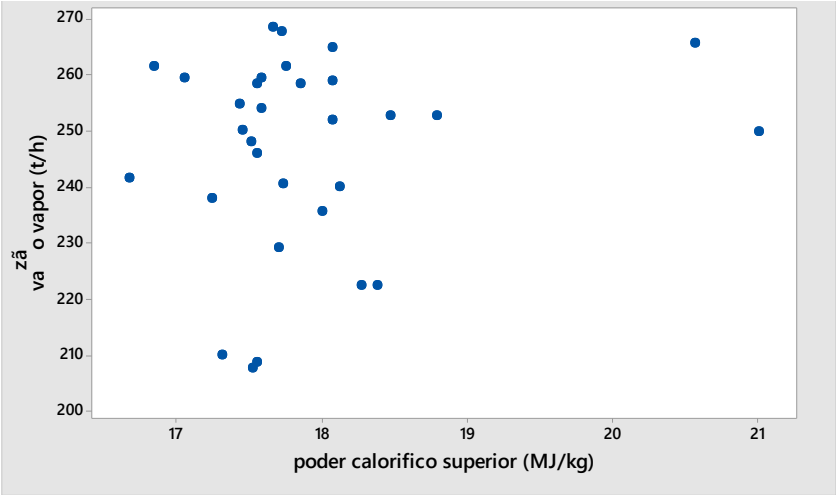


**Figura 34.** Gráfico de dispersão: poder calorífico superior x vazão de vapor

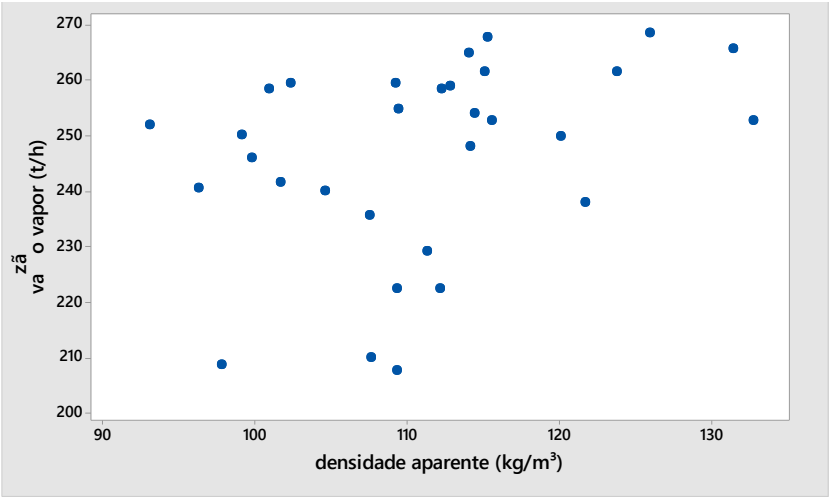


**Figura 35.** Gráfico de dispersão: densidade aparente x vazão de vapor

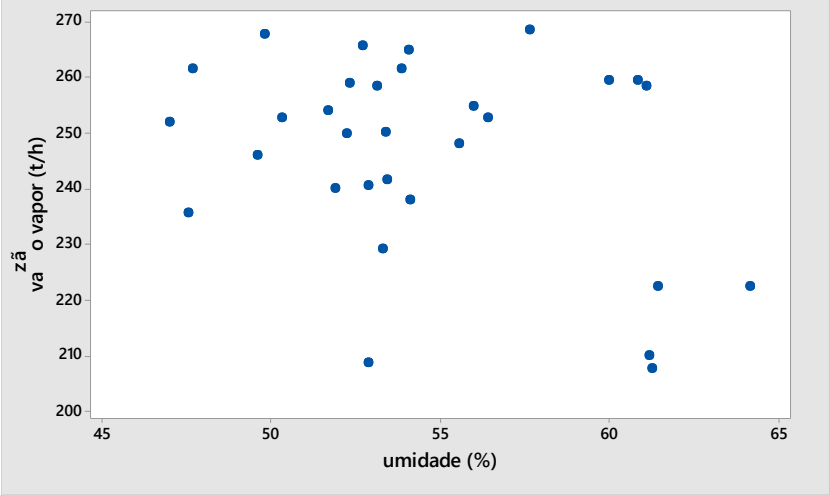


**Figura 36.** Gráfico de dispersão: umidade x vazão de vapor

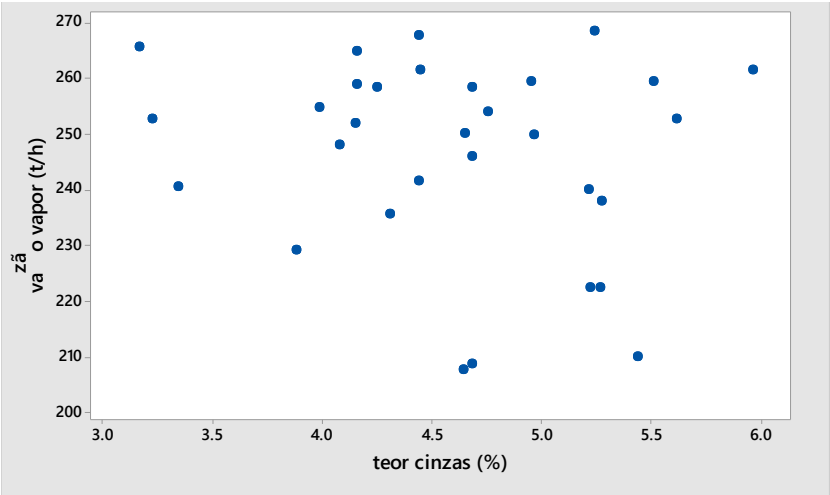


**Figura 37.** Gráficos de dispersão: teor de cinzas x vazão de vapor

Nos gráficos de **vazão de vapor x poder calorífico superior** os valores do eixo x possuem um baixo valor de coeficiente de variação, assim os dados estão variando apenas com a produção de vapor. Os demais não possuem relação linear definida.

### 5.5.2. Correlações estatisticamente significativas

A partir das análises de Pearson, foi identificada uma relação diretamente proporcional entre a densidade aparente e o poder calorífico superior. Esta relação ocorre, pois de acordo com Bowyer et al (2007) um alto valor de densidade está associado à uma maior disponibilização de energia pelo material, e esta energia é mensurada por meio do poder calorífico.

### 5.5.3. Modelo matemático para estimar a produção de vapor

Para elaborar outro modelo matemático para predizer a produção de vapor da caldeira de biomassa, foi feito a análise de variância das características da biomassa em função da vazão de vapor, com o objetivo de verificar se o modelo foi adequado.

**Tabela 13.** Determinação do valor *p* para as associações das características da biomassa

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Poder calorífico superior | 0,094 |
| Densidade aparente | 0,038 |
| Umidade | 0,066 |
| Teor de cinzas | 0,679 |

Analisando a Tabela 13, foi possível identificar que a densidade aparente possui um valor *p* menor que $\alpha = 0,05$. Desta forma, apenas esta característica apresentou uma associação estatisticamente significativa. Por esta razão, foi feito uma nova análise de variância apenas com esta característica.

**Tabela 14.** Determinação do valor p com a característica significativa da biomassa

| Parâmetro | Valor *p* |
|---|---|
| Densidade aparente | 0,053 |

Na Tabela 14 quando a densidade aparente é relacionada com a vazão de vapor, o valor de *p* foi maior do que $\alpha = 0,05$. Deste modo, esta associação não é significativa, não sendo adequado a elaboração de um modelo com esta variável.

No entanto, mesmo que o modelo linear não foi significativo, é possível que haja outras correlações estatísticas possíveis, contudo, o escopo deste trabalho se detém a discussão apenas dos modelos lineares.

### 5.5.4. Maximização da produção de vapor

Mediante o uso de uma ferramenta de otimização de resposta do software Minitab 17®, foram calculados os valores considerados ideais das características da biomassa, para a produção máxima de vapor da caldeira de biomassa. Os valores analisados foram aqueles praticados pela

indústria durante o período estudado, por isso as respostas são ideais considerando a situação estudada.

Nesta otimização temos uma *desirability* composta de 0,9036 e um erro padrão de 10,1, os quais são condições aceitáveis para análise. Para os cálculos foi utilizado como valor alvo de produção de vapor 280 t/h, que é a capacidade máxima da caldeira de biomassa, porém, considerando os valores das características trabalhadas, a produção máxima possível seria de 273 t/h. A partir disso, encontra-se os valores ideais das características da biomassa para uma produção máxima de vapor:

- Poder calorífico superior: 18,88 MJ/kg
- Densidade 132,68 kg/m³
- Umidade: 46,99 %
- Teor de cinzas: 3,16%

Com relação aos valores sugeridos, o recomendado é que o teor de umidade seja menor do que 35% (FOELKEL, 2016), contudo na situação estudada o teor mínimo que foi identificado foi de 46,99%. Como esta análise espera propor valores dentro do que já é praticado pela empresa, o recomendado foi este valor, mas vale ressaltar que para que ocorra uma produção de vapor mais eficiente pela caldeira de biomassa, o teor de umidade deve diminuir. Técnicas de melhor armazenamento da biomassa, as quais evitam o contato do material com a chuva, e também a secagem da biomassa antes de ser encaminhada para a caldeira, reduzem o teor de umidade e consequentemente podem aumentar a eficiência e aumentar a produção de vapor (BRAND e GIESEL, 2017).

Os valores de poder calorífico estão entre os valores encontrados em literatura para espécies de folhosas e coníferas (BIERMANN, 1996), porém, a densidade aparente, mesmo sendo considerado o valor máximo do período estudado, ele está abaixo do descrito por Foelkel (2016). Considerando que a casca também é utilizada na caldeira, o valor de teor de cinzas está dentro do normal (BIERMANN, 1996; SIXTA, 2006), contudo pode-se reduzir o aumento deste teor utilizando técnicas que evitem o contato da biomassa diretamente com o solo.

# 6. CONCLUSÕES

Durante o período estudado, a caldeira de recuperação apresentou ótimo desempenho energético, mantendo uma média de eficiência energética de 86%, a qual se encontra a cima do que é descrito pela literatura. Enquanto que a caldeira de biomassa obteve uma média de 51%, o qual é considerado um baixo desempenho energético. Este valor abaixo do esperado foi influenciado pela alta umidade do material, baixa densidade aparente e alto teor de cinzas.

Dentre os modelos matemáticos analisados para a predição do vapor, apenas o modelo utilizando parâmetros da caldeira de recuperação foi significativo estatisticamente, e assim foi o único considerado um modelo adequado.

Os valores recomendados dos parâmetros dos combustíveis estavam entre os valores que foram efetivamente praticados pela empresa, durante o período do estudo. Por esta razão, houveram valores que estiveram abaixo do que é recomendado pela literatura. Dentre os parâmetros do licor negro, o teor de sólidos totais e da biomassa o poder calorífico superior, estiveram de acordo com o esperado.

## REFERÊNCIAS


ADAMS, T.N. Kraft Recovery Boilers. **Tappi press**. Atlanta, GA. 1997.

ALMEIDA, V. B. de. **Caracterização, Análise e Perspectivas da Matriz Energética do Setor de Papel e Celulose**. Dissertação de mestrado. FGV. 2013.

ANEEL. Parte II: Fontes renováveis – Biomassa. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. 2008.

BARBELI, M.C. Indústria de papel e celulose: estado da arte das tecnologias de cogeração de energia. **Revista de Ciências Exatas e Tecnologia**. v.3. n. 3. 2008.

BERNI, M. D., BAJAY, S.V., GORLA, F.D. Oportunidades de eficiência energética para a Indústria. **CNI – Confederação Nacional da Indústria**. 2010.

BIERMANN, C.J. **Handbook of pulping and papermaking**. Second edition. 1996.

BRAND, M.A. e GIESEL, G. Influência da Secagem da Biomassa na Eficiência de Caldeira de Cogeração Energética. **Revista Energia na Agricultura**. Botucatu. v. 32. n. 2. Abril-junho, 2017. 132-140 p.

BRITO, J.O. Expressão da produção florestal em unidades energéticas. In: **Congresso Florestal Brasileiro**, 7, Curitiba, 1993. Anais...São Paulo: SBS/SBEF, 1993. v.3, p.280-2.

BRITO, J.O. e BARRICHELO, L.E.G. Química da Madeira. Apontamentos – Curso Engenharia Florestal ESALQ/USP. 1985.

BORGNAKKE, C. SONNTAG, R.E. **Fundamentos da Termodinâmica**. São Paulo Edgard Blucher, 2009.

BOWYER, J.L., SHMULSKY, R., HAYGREEN, J.G. Forest Products & Wood Science. 5th edition. Blackwell Publishing. 2007.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística – Princípios e Aplicações. Porto Alegre: Artmed, 2003.

CARDOSO, M., OLIVEIRA, E.D. de, PASSOS, M.L. Licor negro de eucalipto kraft proveniente de indústrias brasileiras: características químicas, físicas e seu processamento na unidade de recuperação. **Revista O Papel**. Maio, 2006.

**CERNE**. Desperdício de energia atinge R$ 61,7 bi em três anos. 2017. Disponível em: <http://cerne.org.br/desperdicio-de-energia-atinge-r-617-bi-em-tres-anos/>. Acesso em 30 nov 2017.

**CGEE**. Eficiência Energética: recomendações de ações de CT & I em segmentos da indústria selecionados - Celulose e Papel. Série Documentos Técnicos. n. 20. 2013.

**ELETROBRAS**. Eficiência energética no uso de vapor. 2005.

**ELETROBRAS**. Manual prático – Eficiência energética em sistemas de vapor. 2013.

**EPE**. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Versão workbook – dados preliminares. 2017b.

**EPE**. Balanço energético nacional. Relatório Final. 2017a.

**EPE**. Anuário Estatístico de Energia Elétrica. 2013.

**EPE**. Avaliação da Eficiência Energética na Indústria e nas Residências no Horizonte Decenal (2010-2019). Série Estudos da Demanda. 2010.

FERREIRA, D. J. de O. **Modelagem de caldeira de recuperação química kraft**. Tese de doutorado. USP. 2013.

FERREIRA, I.T.M., SCHIRMER, W.N., MACHADO, G.de O., GUERI, M.V.D. Estimativa do Potencial Energético de Resíduos Celulósicos de Fabricação de Papel Através de Análise Imediata. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**. v. 3. 2014. p. 284-297.

FOELKEL, C. Utilização da biomassa do eucalipto para produção de calor, vapor e eletricidade. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. 2016.

FOELKEL, C. Qualidade da Biomassa Florestal do Eucalipto para Fins Energéticos. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. 2015.

FOELKEL, C. Um Guia Referencial sobre Ecoeficiência Energética para a Indústria de Papel e Celulose Kraft de Eucalipto no Brasil. **Eucalyptus Online Book & Newsletter**. 2010.

GANDRA, A. Custo da energia elétrica para pequena e média indústria caiu 10,7% em 2016. **Agência Brasil**. 2017. Disponível em: <http://agenciabrasil.ebc.com.br/economia/noticia/2017-02/custo-da-energia-eletrica-para-pequena-e-media-industria-caiu>. Acesso em 14 de nov 2017.

**INTERNATIONAL PAPER**. Caldeira de Biomassa: Autossuficiência energética e sustentabilidade do negócio. 2015.

MACIEL, M. A. **Sustentabilidade energética industrial**. Monografia. UFLA. 2008.

MIELI, C. de A. **Sistemas de avaliação ambiental na indústria de celulose e papel**. Tese de doutorado. UFV. 2007

MORAES, F.de A.B. Uso de caldeira de biomassa e turbo gerador. **Revista da Madeira**. ed. 135. Maio, 2013. Disponível em: <http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1671&subject=Caldeiras&title=Uso%20de%20caldeira%20de%20biomassa%20e%20turbo%20gerador>. Acesso em 15 nov 2017.

PINHEIRO, P.C.da C e VALLE, R.M. **Controle de Combustão: Otimização do Excesso de ar**. II Congresso de Equipamentos e Automação da Indústria Química e Petroquímica. Anais: Automação Industrial São Paulo, ABIQUIM. Rio de Janeiro, RJ. Agosto, 1995. p. 157-162.

PIOTTO, Z. C. **Eco-eficiência na Indústria de Celulose e Papel - Estudo de Caso**. Tese de doutorado. USP. 2003.

SÁNCHEZ, C.G. e BIZZO, W.A. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Cap. 11 – Estequiometria das Reações de Combustão e Gaseificação. Editora Átomo. 2010.

SANTOS, P.G. C. dos. **Desenvolvimento de um queimador em leito fluidizado borbulhante para queima de biomassa. Adaptação a caldeira pré-existente**. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. 2009.

**SENAI**. Celulose – Área Celulose e Papel. Série Informações Tecnológicas. 2013.

SIXTA, H. **Handbook of pulp**. WILEY-VC Verlag GmbH & Co. v.1. 2006.

STATISTICAL SOFTWARE. **Minitab 17**. Computer software. State College, PA: Minitab, Inc. 2010.

VELÁZQUEZ, S. M. S. G. **Perspectivas para a geração de excedentes de energia elétrica no segmento de papel e celulose com a utilização de sistemas de gaseificação/turbina a gás**. Tese de doutorado. USP. 2006.

# APÊNDICES

**APÊNDICE A.** Propriedades termodinâmicas da água (BORGNAKKE e SONNTAG, 2009)

**Tabela 15.** Valores de entalpia do vapor d'água

| Vapor d'água superaquecido 10 MPa | |
|---|---|
| Temperatura ºC | Entalpia (kJ/kg) |
| 300 | 2724,67 |
| 350 | 2923,39 |
| 400 | 3096,46 |
| 450 | 3240,83 |
| 500 | 3373,63 |
| 550 | 3500,92 |

**Tabela 16.** Valores de entalpia da água

| Água saturada | |
|---|---|
| Temperatura °C | Entalpia (kJ/kg) |
| 75 | 313,91 |
| 80 | 334,88 |
| 85 | 355,88 |
| 90 | 376,9 |
| 95 | 397,94 |
| 100 | 419,02 |
| 105 | 440,13 |
| 110 | 461,27 |
| 115 | 482,46 |
| 120 | 503,69 |
| 125 | 524,96 |
| 130 | 546,29 |
| 135 | 567,67 |
| 140 | 589,11 |
| 145 | 610,61 |
| 150 | 632,18 |

## APÊNDICE B. Tabelas de correlação de Pearson

Nas tabelas abaixo seguem os resultados da análise de correlação de Pearson, onde o primeiro valor é referente à relação em si e abaixo deste se encontra o valor *p*. Os resultados considerados significativos estão destacados em negrito.

**Tabela 17.** Relação de Pearson entre os parâmetros da caldeira de recuperação.

| | Consumo de licor negro | Vazão vapor | Vazão ar primário | Vazão ar secundário |
|---|---|---|---|---|
| Vazão vapor | **0.889** | | | |
| | **0.000** | | | |
| Vazão ar primário | **0.569** | **0.530** | | |
| | **0.000** | **0.000** | | |
| Vazão ar secundário | **0.658** | **0.589** | **0.651** | |
| | **0.000** | **0.000** | **0.000** | |
| Vazão ar terciário | **0.628** | **0.551** | **0.608** | **0.616** |
| | **0.000** | **0.000** | **0.000** | **0.000** |
| Vazão água | **0.781** | **0.762** | **0.550** | **0.626** |
| | **0.000** | **0.000** | **0.000** | **0.000** |
| Pressão vapor | **0.609** | **0.661** | 0.248 | 0.282 |
| | **0.000** | **0.000** | 0.001 | 0.000 |
| Temperatura água | 0.221 | **0.302** | -0.030 | 0.052 |
| | 0.003 | **0.000** | 0.694 | 0.488 |
| Temperatura vapor | 0.085 | 0.055 | -0.084 | 0.086 |
| | 0.258 | 0.469 | 0.269 | 0.258 |
| Temperatura gases | **0.535** | **0.511** | **0.502** | **0.497** |
| | **0.000** | **0.000** | **0.000** | **0.000** |

| | Vazão ar terciário | Vazão água | Pressão vapor | Temperatura água |
|---|---|---|---|---|
| Vazão água | **0.560** | | | |
| | **0.000** | | | |
| Pressão vapor | **0.402** | **0.476** | | |
| | **0.000** | **0.000** | | |
| Temperatura água | 0.051 | 0.111 | 0.230 | |
| | 0.503 | 0.140 | 0.002 | |
| Temperatura vapor | -0.181 | 0.103 | 0.059 | -0.211 |
| | 0.016 | 0.171 | 0.433 | 0.005 |
| Temperatura gases | **0.348** | **0.436** | 0.288 | 0.239 |
| | **0.000** | **0.000** | 0.000 | 0.001 |

| | Temperatura vapor |
|---|---|
| Temperatura gases | -0.065 |
| | 0.387 |
| *Conteúdo da Célula* | |
| *Correlação de Pearson* | |
| *Valor-p* | |

**Tabela 18.** Relação de Pearson entre as características do licor negro.

| | vazão vapor | poder calorífico | teor sólidos | teor inorgânicos |
|---|---|---|---|---|
| poder calorífico | 0.145 | | | |
| | 0.435 | | | |
| teor sólidos | **-0.370** | -0.020 | | |
| | **0.040** | 0.915 | | |
| teor inorgânicos | -0.231 | **-0.493** | -0.190 | |
| | 0.212 | **0.005** | 0.306 | |
| teor orgânicos | 0.219 | **0.490** | 0.199 | **-0.998** |
| | 0.236 | **0.005** | 0.283 | **0.000** |
| Conteúdo da Célula | | | | |
| *Correlação de Pearson* | | | | |
| *Valor-p* | | | | |

**Tabela 19.** Relação de Pearson entre os parâmetros da caldeira de biomassa

| | Consumo de biomassa | Vazão vapor | Vazão ar primário | Vazão ar secundário |
|---|---|---|---|---|
| Vazão vapor | 0.064 | | | |
| | 0.629 | | | |
| Vazão ar primário | **0.469** | -0.039 | | |
| | **0.000** | 0.772 | | |
| Vazão ar secundário | -0.196 | 0.121 | **-0.519** | |
| | 0.137 | 0.362 | **0.000** | |
| Pressão vapor | 0.188 | -0.025 | 0.081 | 0.243 |
| | 0.154 | 0.851 | 0.540 | 0.064 |
| Temperatura vapor | **-0.326** | 0.287 | 0.013 | 0.120 |
| | **0.012** | 0.028 | 0.921 | 0.364 |
| Temperatura água | -0.042 | -0.213 | 0.114 | -0.014 |
| | 0.754 | 0.106 | 0.391 | 0.917 |
| Temperatura gases | 0.180 | -0.029 | **-0.325** | 0.186 |

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0.172 | 0.826 | **0.012** | 0.158 |
| Eficiência energética | **-0.864** | 0.254 | **-0.337** | **0.311** |
| | **0.000** | 0.052 | **0.009** | **0.016** |

| | Pressão vapor | Temperatura vapor | Temperatura água | Temperatura gases |
|---|---|---|---|---|
| Temperatura vapor | 0.047 | | | |
| | 0.723 | | | |
| Temperatura água | **0.304** | 0.277 | | |
| | **0.019** | 0.034 | | |
| Temperatura gases | 0.178 | -0.262 | -0.064 | |
| | 0.178 | 0.045 | 0.630 | |
| Eficiência energética | -0.078 | **0.367** | -0.056 | -0.174 |
| | 0.557 | **0.004** | 0.675 | 0.186 |

Conteúdo da Célula

*Correlação de Pearson*

*Valor-p*

**Tabela 20.** Relação de Pearson entre as características da biomassa.

| | vapor gerado | poder calorífico | densidade aparente | umidade |
|---|---|---|---|---|
| poder calorífico | 0.137 | | | |
| | 0.464 | | | |
| densidade aparente | 0.351 | **0.438** | | |
| | 0.053 | **0.014** | | |
| umidade | -0.328 | -0.145 | 0.050 | |
| | 0.071 | 0.438 | 0.789 | |
| teor cinzas | -0.164 | -0.275 | -0.036 | 0.302 |
| | 0.379 | 0.134 | 0.846 | 0.098 |

Conteúdo da Célula

*Correlação de Pearson*

*Valor-p*