

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA**

**ROMEO FIALHO ESTEVES**

**COGERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOMASSA: BALANÇO ENERGÉTICO PARA  
DIFERENTES VAZÕES DE VAPOR**

**Bagé**

**2017**

**ROMEO FIALHO ESTEVES**

**COGERAÇÃO DE ENERGIA COM BIOMASSA: BALANÇO ENERGÉTICO PARA  
DIFERENTES VAZÕES DE VAPOR**

Trabalho desenvolvido na usina Bioener SA, apresentado ao Curso de Engenharia de Energia da Universidade Federal do Pampa, como requisito para a aprovação na disciplina de Trabalho de Conclusão De Curso.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Vieceli Taveira

**Bagé**

**2017**

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO .....	9
1.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO .....	9
1.2 JUSTIFICATIVA.....	10
1.3 METODOLOGIA .....	11
1.4 OBJETIVO .....	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	13
2.1 BIOMASSA PARA GERAÇÃO ENERGIA .....	13
2.1.1 BIOMASSA DA MADEIRA .....	14
2.2 GERAÇÃO TERMELÉTRICA .....	15
2.2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA .....	16
2.2.2 GERAÇÃO ENERGÉTICA À BIOMASSA NO BRASIL .....	16
2.3 REAPROVEITAMENTO TÉRMICO E CICLO COM COGERAÇÃO .....	17
2.3.1 CICLO COM REAQUECIMENTO .....	17
2.3.2 CICLO REGENERATIVO .....	18
2.3.3 CICLO COM COGERAÇÃO.....	19
2.4 CONDENSADORES NO CICLO RANKINE.....	22
2.4.1 AERO CONDENSADORES .....	23
2.5 BALANÇO ENERGÉTICO E RENDIMENTO.....	24
2.5.1 BALANÇO ENERGÉTICO .....	24
2.5.2 RENDIMENTO .....	25
3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	27
3.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA.....	27
3.2 CICLO DO COMBUSTÍVEL.....	27
3.3 CIRCUITO DO FLUIDO DE TRABALHO.....	44
3.4 COMBUSTÍVEL UTILIZADO .....	52
4 RESULTADOS .....	56
4.1 BALANÇO ENERGÉTICO PARA POTÊNCIA NOMINAL DE VAPOR E ELETRICIDADE.....	56
4.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR NA TURBINA PARA UM NOVO CONSUMO DA MADEIREIRA .....	59
4.3 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR NA TURBINA PARA DIFERENTES CONSUMOS DA MADEIREIRA.....	66

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	71
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## RESUMO

*O trabalho apresenta de forma sucinta o funcionamento da usina termelétrica Bioener, localizada no município de Rivera, Uruguai. A usina opera com ciclo baseado no Rankine de cogeração, onde vapor é produzido para a madeireira URUFOR localizada ao lado da usina de eletricidade para a Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE). O objeto de estudo foi a simulação de balanços energéticos variando o fluxo mássico de vapor gerado para verificar qual potência de vapor apresenta melhor relação ENERGIA VENDIDA/ COMBUSTÍVEL UTILIZADO. Possivelmente exista influência do uso dos aero condensadores, no consumo elétrico interno da planta, alterando assim a energia final líquida entregue pela empresa para a UTE. Para isso foram analisadas as propriedades do fluido e do combustível em diferentes equipamentos e máquinas presentes no ciclo do vapor e no ciclo da biomassa na tentativa de incluir o máximo possível de pontos da usina no balanço.*

*Palavras chave: Cogeração, biomassa, balanço de energia.*

## ABSTRACT

*The work shows concisely the way how the Bioener thermoelectric power plant, placed in the city of Rivera - Uruguay, works. The power plant operates on a based Rankine cycle of cogeneration where steam is produced to the URUFOR timber located beside the power plant for the Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE). The object of study was the simulation of energy balances varying the mass flow of steam generated to determine which power steam shows the best SOLD ENERGY/ USED FUEL ratio. Probably there was an influence of the use of air condensers on the internal consume of the power plant, thus changing the final net energy delivered by the company to the UTE. For that the fluid and the fuel properties were analyzed in different machines and equipment present on the steam and biomass cycles trying to include as many points of the power plant on the balance as possible.*

*Keywords: Cogeneration, biomass, energy balance*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo de biomassa madeireira .....	13
Figura 2 - Diagrama de biomassas .....	15
Figura 3 - Ciclo com reaquecimento.....	18
Figura 4 – Ciclo Rankine regenerativo .....	19
Figura 5 - Fluxo energético do ciclo Rankine simples .....	20
Figura 6 - Fluxo energético do ciclo Rankine de cogeração.....	21
Figura 7 - Três tipos de turbina a vapor .....	22
Figura 8 - Exemplo de um aerocondensador .....	24
Figura 9 - Conversões energéticas, perdas mecânicas e elétricas. ....	25
Figura 10 - Material, troncos, trituradora, tremonha, esteira, peneira 1 e silo de úmidos.....	28
Figura 11 - Detalhe de troncos e trituradora em operação .....	29
Figura 12 - Esteira saída úmidos.....	29
Figura 13 - Parafusos entrada secador .....	30
Figura 14 – Tremonha de úmidos .....	31
Figura 15 - Caldeira à grelha.....	32
Figura 16 – Secador (Entrada de vapor e parte interna) .....	32
Figura 17 – Secador (Entrada de ar).....	33
Figura 18 - Elevador de canecas do secador para a peneira vibratória .....	33
Figura 19 - Silo de finos .....	35
Figura 20 - Saída de Finos.....	35
Figura 21 - CT2 .....	36
Figura 22 - Parede das Câmaras Torcionais.....	37
Figura 23 - Saída de cinzas da CT2.....	37
Figura 24 - Cinzas.....	38
Figura 25 – Tremonha do silo de cavaco .....	39
Figura 26 - Silo de cavaco.....	39
Figura 27 - Esteira de saída do silo de cavaco.....	40
Figura 28 - Tremonha e parafusos de alimentação dos gaseificadores .....	40
Figura 29 - Gaseificador .....	41
Figura 30 - Corte do projeto do gaseificador da usina.....	42
Figura 31 - Caldeira.....	43

Figura 32 – Precipitador eletrostático e chaminé .....	44
Figura 33 - Um dos tanques de entrada de água .....	45
Figura 34 – Bombas saída tanques.....	45
Figura 35 - Tanque de alimentação.....	46
Figura 36 - Bombas de 65 bar.....	46
Figura 37 - Economizador .....	47
Figura 38 - Balão da caldeira .....	48
Figura 39 - Parte interna da caldeira .....	49
Figura 40 - Turbina.....	50
Figura 41 - Pré aquecedor de ar secundário .....	50
Figura 42 - Aero condensadores .....	51
Figura 43 - Tanque de condensado .....	52
Figura 44 – Código-MatLab de determinação de propriedades do combustível parte 1. ....	53
Figura 45 - Código-MatLab de determinação de propriedades do combustível parte 2. ....	54
Figura 46 - Valores obtidos do combustível .....	55
Figura 47 - Balanço energético da planta a 9MW com extração de 20 ton/h .....	57
Figura 48 - Balanço energético da planta a 9MW com extração de 20 ton/h .....	58
Figura 49 - Principais fluxos de vapor da planta.....	59
Figura 50 - Curva de vazão por potência do Turbo gerador.....	60
Figura 51 - Traço até o desvio considerando o rendimento .....	61
Figura 52 - Interpolação entre curvas de vazões da extração.....	62
Figura 53 - Determinação do consumo total do turbo gerador .....	62
Figura 54 - Variação no pré-aquecimento de ar e água .....	64
Figura 55 - Fluxos no escapamento da turbina .....	65
Figura 56 - Balanço de energia na caldeira.....	65
Figura 57 - Perdas na caldeira .....	66
Figura 58 - Consumo de combustível.....	66
Figura 59 - Rácio.....	66
Figura 60 - Balanço energético para diferentes consumos de vapor da madeireira..	67
Figura 61 – Redução do fluxo mássico de vapor de extração e aumento do no escapamento da turbina.....	67



Figura 62 – Redução da energia consumida pela caldeira .....	68
Figura 63 – Redução do consumo de combustível .....	68
Figura 64 – Vazão no Turbogenerador, na extração e destinada a pré aquecimento de água (Ton/h) X Consumo da madeira (ton/h).....	69
Figura 65 – Vazão nos aer condensadores (ton/h) e Rácio (Bdmt/MWh) X Consumo da madeira (Ton/h).....	69
Figura 66 – Energia Consumida pela Caldeira em Mcal/h X Consumo madeira (Ton/h).....	70
Figura 67 – Rácio (Bdmt/MWh) X Consumo madeira (Ton/h).....	70

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Algumas usinas termelétricas nacionais à biomassa .....	17
--	----

## LISTA DE ABREVIATURAS

h – Hora

kcal – Quilo calorias

kg – Quilogramas

kV – Quilo Volts

kW – Quilo Watts

Mcal – Mega calorias

MW – Mega Watts

PJ – Peta Joules

ton – Toneladas

UTE – Usina Termelétrica

°C – Graus Célsius

BDMT – Tonelada Métrica Seca (Sem considerar umidade)

## LISTA DE SIGLAS

ANEEL – Agencia Nacional de Energia Elétrica

ABB – Asea Brow Boveri

AIE – Agência Internacional de Energia

BEN – Balanço Energético Nacional

CPFL – Companhia Paulista de Força e Luz

CGEE – Centro de Gestão e Estudos Estratégicos

ES – Espirito Santo

FURG – Federal University of Rio Grande do Sul

MME – Ministério de Minas e Energia

UFPA – Universidade Federal do Pará

WEC – World Energy Council

*UTE* – Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas

# 1 INTRODUÇÃO

Dentre os meios de geração de energia elétrica, existem as termelétricas, isto é, usinas que operam com um fluido de trabalho num ciclo termodinâmico. Esse método de geração de energia elétrica é baseado na geração de calor liberada por uma fonte calorífica, a conversão do mesmo em energia mecânica de fluido e no acionamento de uma turbina à vapor acoplada a um gerador elétrico.

As centrais que utilizam unidades motoras a vapor têm seu princípio de funcionamento com base no ciclo Rankine. As principais etapas do ciclo são o bombeamento isentrópico do fluido de trabalho, a troca de calor na caldeira (à pressão constante), expansão isentrópica no turbo-gerador e a troca de calor no condensador. Existem diferentes tipos de plantas de geração termelétrica. Alguns exemplos são as usinas a carvão, nucleares ou à biomassa.

A biomassa é uma fonte de energia natural e renovável. O termo biomassa abrange os derivados recentes de organismos vivos empregados como combustíveis ou para a sua produção. Na sua definição para a geração de energia não se contabilizam os tradicionais combustíveis fósseis por serem resultados de várias transformações que requerem milhões de anos. São exemplos de biomassa: Resíduos florestais, madeira, serragem, casca de arroz entre outros.

## 1.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Este estudo de caso foi desenvolvido na Usina de cogeração BIOENER, localizada em Rivera – Uruguai, onde opera com biomassa do tipo resíduo madeireiro como combustível e água como fluido de trabalho. Na usina, a energia elétrica gerada é vendida para a rede de distribuição nacional e o vapor é vendido para a madeireira URUFOR localizada ao lado da planta. Este estudo é um balanço de energia envolvendo alguns equipamentos da planta, o combustível, a influência da variação de vapor gerado no consumo de combustível e a influência dos condensadores na energia elétrica líquida entregue pela usina.

A planta possui duas caldeiras e uma turbina. A caldeira principal é da marca Berker, do tipo aquatubular vertical. Esta opera a 1100°C e gera cerca de cinquenta e seis toneladas de vapor por hora, a 525°C e 65 bar quando a planta encontra-se na potência contratada. Da caldeira Berker, o fluido é direcionado nessas condições à turbina. A turbina é da marca SIEMENS, com 12MW de potência nominal e apresenta uma extração de cerca de 20 toneladas de vapor por hora. A extração ocorre num ponto da máquina em que o fluido encontra-se a 140°C e 5 bar. Esta extração da turbina é devido ao contrato de vapor com a madeireira URUFOR. A vazão mencionada, assim como as propriedades do vapor são exatamente as condições solicitadas pela empresa cliente. No escapamento final da turbina, o vapor encontra-se a 100°C, 1.3 bar e a uma vazão de 36 toneladas de vapor por hora. A caldeira secundária é de marca TurboFlow, de menor potência e tem a função de suprir apenas a demanda de vapor contratada pela URUFOR em caso de falta da principal. Portanto, normalmente encontra-se parada.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Segundo o Ministério de Minas e Energia – BEM, em 2004, que as energias renováveis ocupavam um valor percentual de 14% da energia produzida no mundo sendo 70% disso representado pela geração através de biomassa. Em 2015, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE) esse valor subiu para 18% e a perspectiva é que em 2040 a porcentagem de energia gerada a partir de fontes renováveis alcance os 25%. Segundo a ANEEL, a capacidade de geração de energia instalada com biomassa apresentou crescimento de 196% de 2008 para 2015, crescendo menos percentualmente apenas que a eólica.

Logo, é de grande importância o estudo e entendimento do funcionamento de geração de energia a partir de biomassa. Esta área de geração, além de utilizar uma fonte de energia renovável, apresenta um futuro praticamente garantido, pela oferta do combustível existente, pelo avanço da tecnologia envolvida e por ser um método de geração energética de segurança, assim como todas termelétricas, pois independem diretamente de fatores climáticos como o vento, a irradiação solar e das chuvas.

Em suma, o ciclo Rankine de cogeração ocupa um lugar de extrema importância na utilização dessa fonte, uma vez que apresenta geração elétrica e térmica, que pode ajudar no tratamento do próprio combustível ou ser direcionado para fins industriais. Contudo, o estudo de reaproveitamento térmico e da redução do consumo elétrico interno da planta pode contribuir consideravelmente na eficiência energética de uma usina.

### **1.3 METODOLOGIA**

O trabalho foi realizado com dados de cogeração da usina Bioener. Como parte da metodologia do trabalho, foi considerado o estágio por mim realizado, onde foi possível conhecer a planta e entender o funcionamento.

Logo, foram realizados balanços de energia para diferentes consumos de vapor da Madeireira URUFOR (cliente de vapor da Bioener), supondo a planta operando na potência elétrica de contrato.

Os balanços de energia foram elaborados em tabelas de Excel. Foi utilizado o aplicativo TLV toolbox como tabela termodinâmica para determinação teórica de propriedades do fluido de trabalho em diferentes equipamentos. O aluno teve acesso aos manuais da caldeira e da turbina e também à curva de vapor por potência do turbo gerador. Será utilizado o programa MatLab para a determinação do poder calorífico da mistura combustível, que conta com biomassa de duas origens diferentes. Também no MatLab foram elaborados alguns gráficos que apresentam o fluxo de vapor em alguns equipamentos do circuito do fluido de trabalho para diferentes consumos de vapor na cogeração.

Também foram realizadas visitas técnicas na usina quando necessário e possíveis auxílios dos engenheiros da usina para levantamento de dados, retirada de dúvidas de funcionamento e operação da planta e sobre a realização do balanço energético propriamente dito.

### **1.4 OBJETIVO**

Existe um aumento do consumo elétrico interno da planta quando se aumenta a potência dos ventiladores dos aerocondensadores. Isso ocorre devido à redução

da vazão mássica do vapor vendido. Quanto menos vapor for vendido para a madeireira, mais é exigido dos aerocondensadores. Por outro lado, quando se opera com um consumo menor de vapor na cogeração, é necessário queimar menos combustível. Portanto, existe mais de uma variável no balanço de energia a ser estudada na planta.

O trabalho pretende apresentar em tabelas e gráficos, o balanço energético para algumas situações, o rácio correspondente e um comparativo entre as situações. O objetivo foi verificar a influência do aumento do consumo dos aerocondensadores e a redução de queima de combustível no balanço de energia da planta.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BIOMASSA PARA GERAÇÃO ENERGIA

De acordo com o atlas da ANEEL, biomassa é qualquer matéria orgânica, de origem não fóssil, que possa ser transformada, de alguma forma, em energia térmica, mecânica ou elétrica. É classificada de acordo com a sua origem, podendo ser: florestal (madeira), agrícola (arroz, cana-de-açúcar e soja entre outras) e rejeitos urbanos e industriais sólidos ou líquidos, como o lixo ou resíduos. [1]

Indiferente da tecnologia utilizada todos os métodos para a geração de energia elétrica a partir da biomassa são baseados na transformação da matéria-prima em um produto intermediário que será tratado para passar por uma máquina motriz, gerando assim, energia mecânica, acoplada a um gerador que possa converter esta energia em eletricidade. A Figura 1 ilustra um exemplo de biomassa de resíduo madeireiro. [2]

Figura 1 - Exemplo de biomassa madeireira



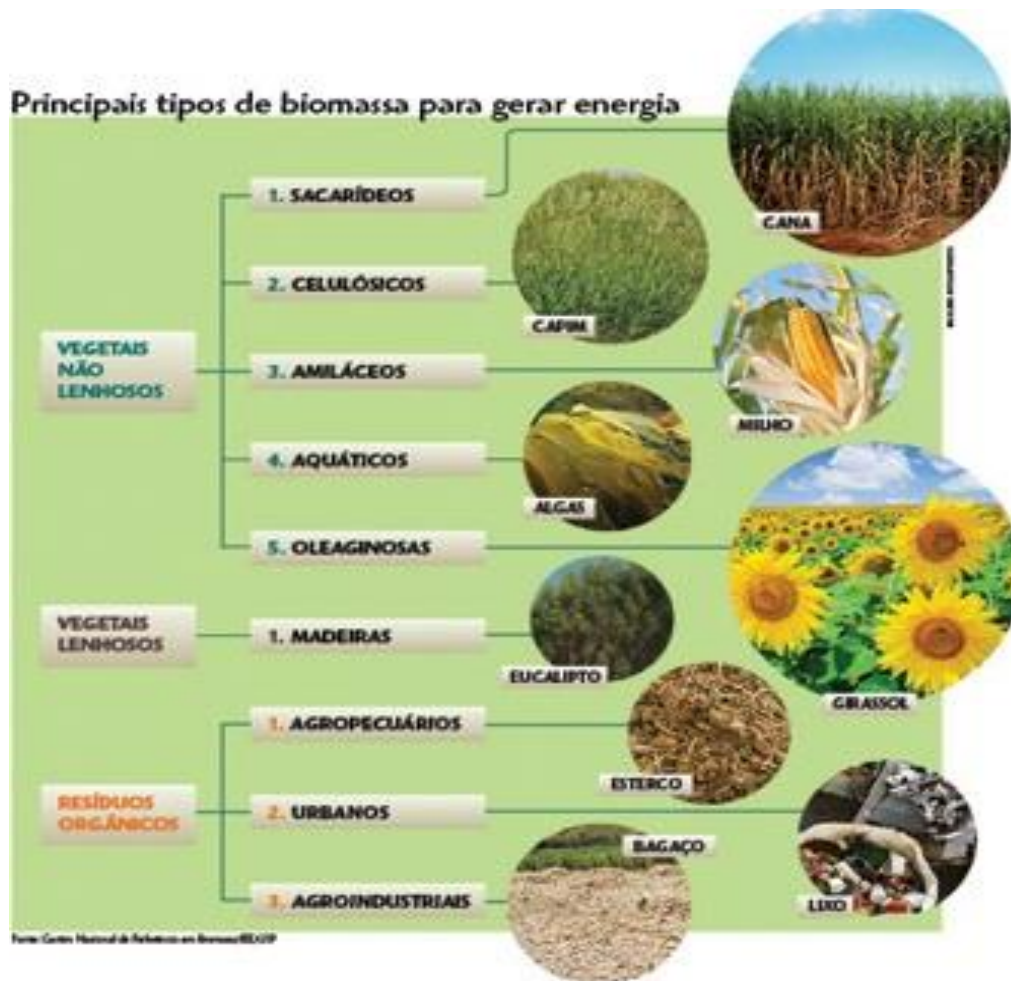
Fonte: [www.mfrutal.com.br](http://www.mfrutal.com.br) (2015)

As características da biomassa dependem tanto da matéria-prima utilizada, uma vez que o potencial energético varia para cada tipo, quanto da tecnologia utilizada no processamento para a obtenção dos produtos energéticos. O tipo de biomassa utilizada numa planta de geração de energia, e a tecnologia a ser usada estão ligados ao índice de desenvolvimento de uma região. Nas regiões menos desenvolvidas, a biomassa mais utilizada é a de origem florestal e os processos para a obtenção de energia se caracterizam pela baixa eficiência ou pela necessidade de grande volume de matéria-prima. [3]

### 2.1.1 BIOMASSA DA MADEIRA

A biomassa pode ser derivada de vegetais não lenhosos, vegetais lenhosos e resíduos orgânicos. Os vegetais lenhosos são os diversos tipos de árvores, vegetais de grande porte, formadores de florestas, os que podem ser madeira. Vegetais não lenhosos são aqueles de menor porte, como cana-de-açúcar. Os resíduos orgânicos englobam o lixo urbano gerado, os resíduos da agricultura, como cascas de arroz, entre outros cereais e também os resíduos agropecuários. A Figura 2 ilustra a divisão entre os três tipos de biomassa para gerar energia. [4]

Figura 2 - Diagrama de biomassas



Fonte: focusolar.com.br

## 2.2 GERAÇÃO TERMELÉTRICA

É considerada uma termoelétrica, a usina que utilizar como combustível para geração de energia: carvão, gás, óleo, energia nuclear e biomassa. O processo de funcionamento está baseado na transformação de energia térmica em energia mecânica e logo transformada em energia elétrica. [6]

No ciclo simples a queima de um determinado combustível em caldeiras simples, turbinas ou em motores, fornece a energia mecânica para o gerador de energia elétrica. No ciclo combinado a queima do combustível fornece energia mecânica para o gerador de energia elétrica, e os gases da queima do combustível

são direcionados a uma caldeira de recuperação de calor para produzirem vapor, para movimentar uma turbina ligada a outro gerador de energia. O ciclo de cogeração é semelhante ao ciclo de sistema combinado, no qual o vapor produzido na caldeira de recuperação de calor será também utilizado no processo industrial de papel, bebida, alimentos, etc. [7]

### 2.2.1 GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE BIOMASSA

Segundo o Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE) a produção de energia elétrica com biomassa apresenta duas características importantes: o conteúdo energético da matéria exige coleta e transporte para concentrar o insumo, portanto, os custos do insumo crescem com a capacidade da unidade de conversão e as tecnologias de conversão para energia elétrica, convencionais, essencialmente termoelétricas, apresentam forte economia de escala, assim, o investimento por unidade de insumo cai e as eficiências das conversões aumentam com a capacidade.

Todo ciclo para geração de energia elétrica a partir da biomassa requer um tratamento inicial da matéria-prima e adaptação para a tecnologia a ser utilizada. O físico José Goldemberg (2009), afirma que existe um grande número de tecnologias de conversão energética da biomassa para aplicação em grande e pequena escala. [1]

### 2.2.2 GERAÇÃO ENERGÉTICA À BIOMASSA NO BRASIL

De acordo com a Sociedade Nacional de Agricultura, em Abril de 2015, o Brasil atingia 12,4 GW de potência instalada a partir de biomassa, representando segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) a terceira fonte mais importante na matriz nacional. [8]

Hoje a potência instalada já ultrapassa 14GW e conta com 535 usinas, conforme consta no Banco de Informação de Geração – ANEEL, 2017.

As maiores contribuintes para essa geração são as que trabalham com o Licor negro, como é o caso da Usina Klabin Celulose que na data de operação do dia vinte e nove de julho de dois mil e dezesseis (29/07/2016) gerava a 330MW.

Diferente da grande parte das usinas que na maioria utilizam bagaço de cana de açúcar e outras usam casca de arroz, resíduos florestais, entre outros.

A Tabela 1 mostra algumas usinas instaladas operando com biomassa de bagaço de cana de açúcar.

Tabela 1 - Algumas usinas termelétricas nacionais à biomassa

Usina	Data de operação	Potência fiscalizada	Localização
Santa Cruz AB	22/05/2009	86.400 KW	Américo Brasiliense - SP
Guaçu	17/05/2013	30.000 KW	Aripuanã - MT
Usiminas 2	31/01/2009	63.155 KW	Ipatinga- MG
Eldorado Brasil	12/09/2013	226.000 KW	Três Lagoas - MS
Suzano Maranhão	04/04/2014	254.840 KW	Imperatriz - MA
Agrenco	14/02/2015	34.000 KW	Alto Araguaia - MT

Fonte: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/CombustivelListaUsinas.asp>

## 2.3 REAPROVEITAMENTO TÉRMICO E CICLO COM COGERAÇÃO

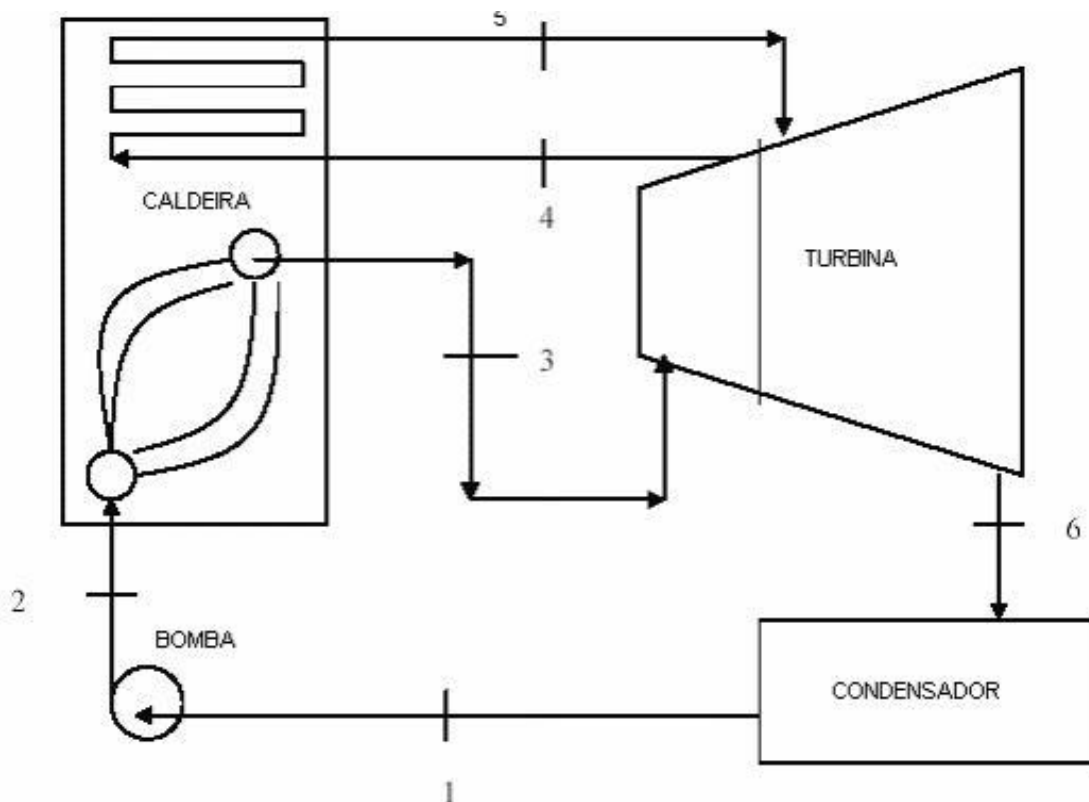
### 2.3.1 CICLO COM REAQUECIMENTO

O vapor que escoar por uma turbina tem de estar em estado superaquecido, isto é, encontrar-se completamente em estado gasoso. É de extremo risco para o material da máquina que escoar como vapor saturado, onde existe um percentual do fluido em estado líquido, uma vez que as partículas de água ao entrarem em choque com as palhetas causam danos nas mesmas. Deste modo surge a ideia do reaquecimento do vapor que passa pela turbina. O reaquecimento é a elevação da sua temperatura até superaquecimento na pressão em que ele se encontra. Para isso, o vapor é desviado e canalizado de volta à caldeira, reaquecido e retornado para a turbina ao próximo andar. Cada novo reaquecimento ocorre à uma nova pressão (sempre menor que a anterior). É comum das turbinas terem cerca de três tiragens de vapor para reaquecimento, isto depende da potência de operação da turbina. De qualquer forma, quanto mais estágios de reaquecimento houver melhor

será o desempenho da máquina, pois este processo aumenta muito o rendimento de uma turbina. [11]

A Figura 3 apresenta um exemplo de um ciclo com reaquecimento. Do ponto 4 ao ponto 5 o vapor sofre um reaquecimento, à pressão constante, com maior temperatura e entalpia. [11]

Figura 3 - Ciclo com reaquecimento



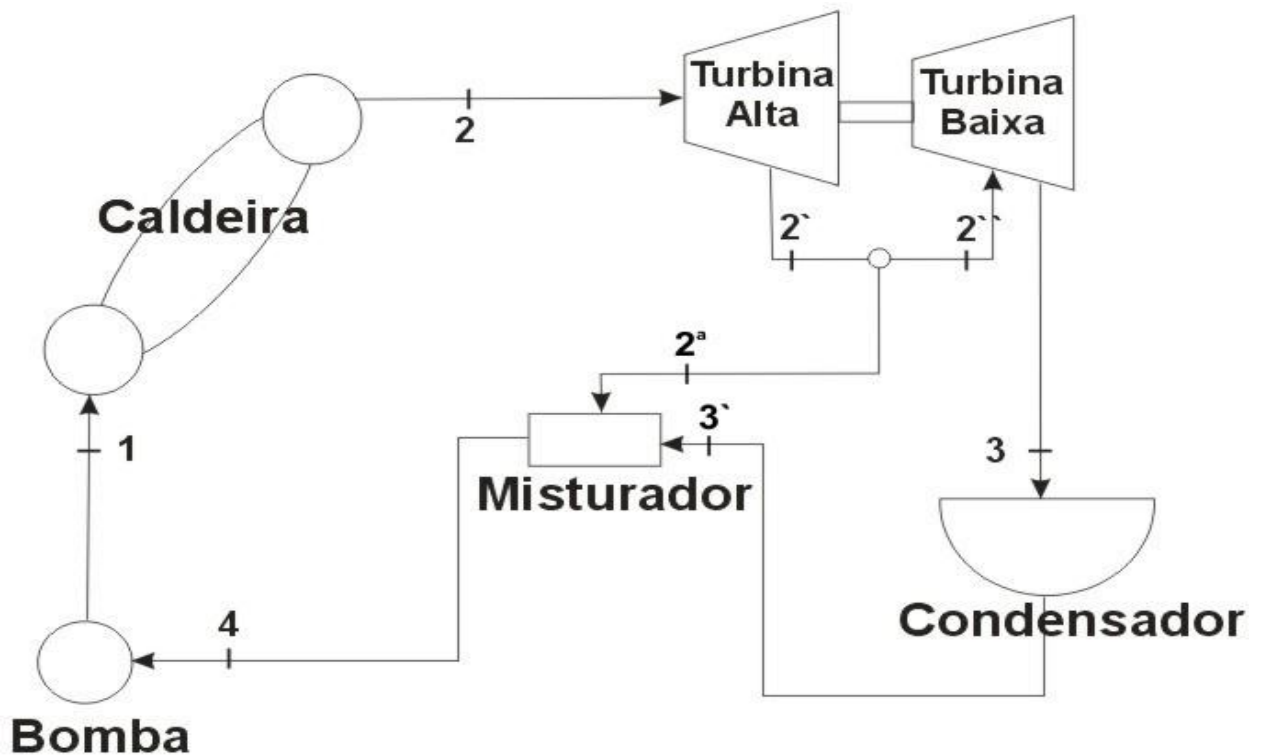
Fonte: [www.oceanica.ufrj.br](http://www.oceanica.ufrj.br)

### 2.3.2 CICLO REGENERATIVO

O ciclo de Rankine regenerativo recebe este nome devido ao fluido de trabalho ser reaquecido após passar pelo condensador. Parte da energia térmica do fluido que escoou na turbina é utilizada para pré-aquecer o fluido que ainda não foi bombeado. Isso aumenta a temperatura média do fluido de trabalho no ciclo, aumentando assim a eficiência térmica do mesmo. Deve ser tomada a precaução de

que o reaquecimento do fluido que será direcionado a bomba seja apenas uma elevação de temperatura, mas não pode alterar o estado físico do fluido naquele ponto. A água deve passar pela bomba inteiramente em estado de líquido comprimido. A passagem de um fluido em estado saturado pode danificar a bomba e reduzir seu desempenho. A Figura 4 ilustra um ciclo Rankine regenerativo.

Figura 4 – Ciclo Rankine regenerativo



Fonte: Moran & Shapiro 'Fundamentals of Engineering Thermodynamics.

### 2.3.3 CICLO COM COGERAÇÃO

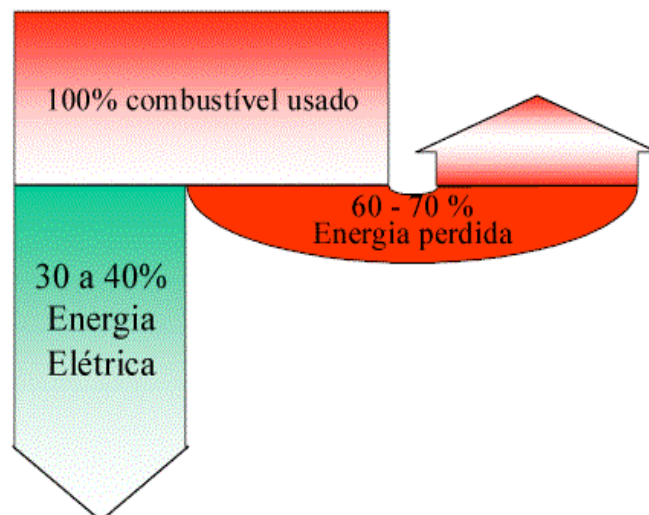
A cogeração é entendida como a geração combinada e simultânea, de energia térmica e energia mecânica ou elétrica, a partir de uma mesma fonte energética. A vantagem principal é um maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção da energia nas duas formas citadas. [14]

A cogeração apresenta alguns aspectos que atraem empresas para esta alternativa. Primeiramente quanto à redução de custos operacionais. Muitas vezes a participação do custo energético no custo do final de produção pode ser elevado. Qualquer possibilidade de otimizar a eficiência no aproveitamento energético é atraente. [14]

As plantas de cogeração de maior ocorrência são concebidas com caldeira e turbina à vapor, utilizando o ciclo baseado no de Rankine. O vapor extraído da turbina é utilizado para o atendimento da demanda de energia térmica do consumidor. Uma vantagem dessa concepção é a possibilidade da utilização de elenco de diferentes combustíveis, tais como carvão, casca de arroz, gás, bagaço de cana, lenha, óleo combustível, entre outros. [15]

Por mais eficiente que seja um gerador termelétrico, a maior parte da energia contida no combustível utilizado para seu acionamento é convertida em calor e perdida para a atmosfera. Na Figura 5, o simples diagrama de fluxo ilustra a energia perdida numa termelétrica de ciclo simples.

Figura 5 - Fluxo energético do ciclo Rankine simples

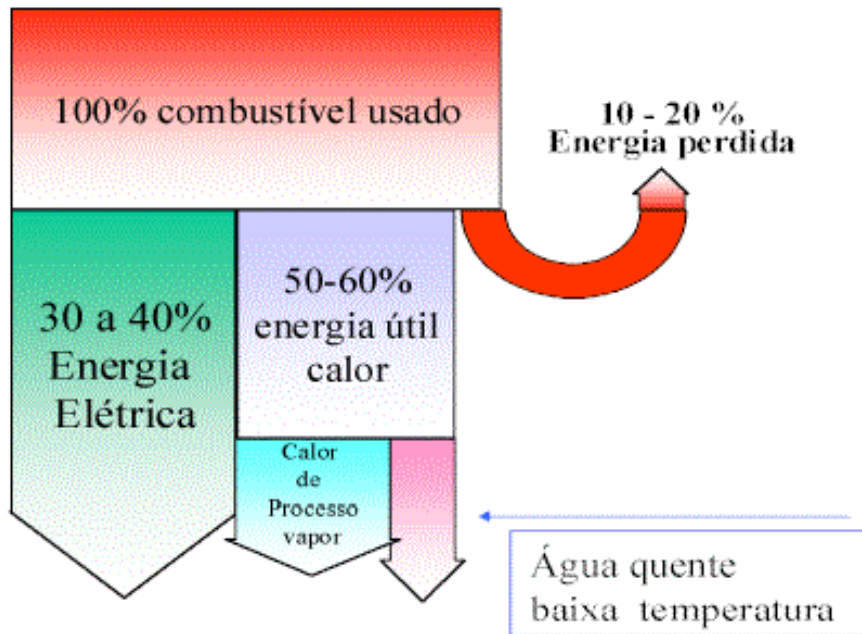


Fonte: [http://www.inee.org.br/forum\\_co\\_geracao.asp](http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp)

Com a cogeração o consumidor economiza o combustível que necessitaria para produzir o calor do processo. A eficiência energética é, dessa forma, bem mais elevada, por tornar útil até 85% da energia do combustível, conforme mostrado na Figura 6.



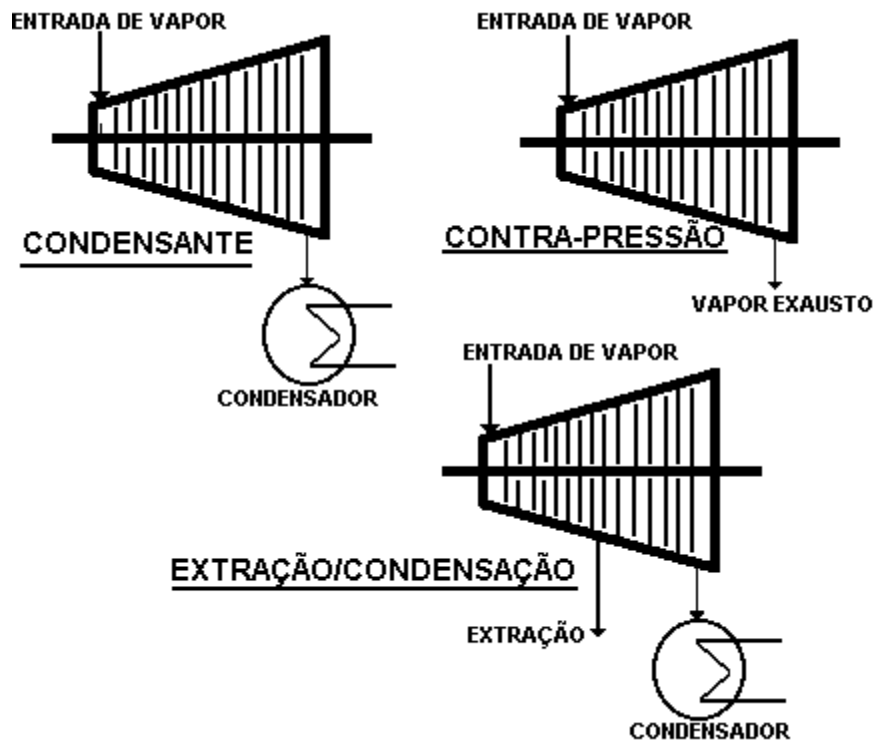
Figura 6 - Fluxo energético do ciclo Rankine de cogeração



Fonte: [http://www.inee.org.br/forum\\_co\\_geracao.asp](http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp)

Na Figura 7 podem ser observados os três tipos de turbina a vapor classificadas quanto às propriedades do vapor na sua entrada e saída. Na turbina de condensação, o fluido deixa a máquina com pressão menor que a atmosférica. Na turbina de contrapressão, o vapor de escapamento encontra-se à pressão superior a 1 atm. A turbina de extração apresenta uma saída num ponto intermediário da máquina. Esta última é a que normalmente é utilizada em ciclo de cogeração, onde o vapor extraído com pressão e temperatura intermediárias entre as iniciais e finais é direcionado para outros fins. [17]

Figura 7 - Três tipos de turbina a vapor



Fonte: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA0RMAG/turbina-a-vapor?part=2>

## 2.4 CONDENSADORES NO CICLO RANKINE

Um dos quatro principais equipamentos do ciclo Rankine é o condensador. Se enumerarmos os quatro processos característicos do ciclo, iniciando pelo bombeamento isentrópico da bomba para a caldeira, o condensador encontra-se presente no último, o qual refere-se à rejeição de calor à pressão constante. Essa troca de calor isobárica é fundamental para o fechamento do ciclo do fluido de trabalho. Nesse processo a água muda de estado físico de gasoso para líquido. [16]

Nestes trocadores de calor, o fluido passa para a fase líquida sem reaproveitamento do calor por ele liberado. A condensação pode ser feita com uso de ventiladores (aerocondensadores) ou com água, onde é necessário um circuito fechado com torre de refrigeração, ou um circuito aberto na presença de um rio ou mar. Porém, deve ser levado em consideração o problema ambiental causado na alteração da temperatura de um recurso natural. [18]

O tipo de condensador mais empregado em centrais termelétricas é o que utiliza água como fluido refrigerante em circuito semifechado. Porém, quando não se

dispõe de água suficiente para alimentar uma torre evaporativa, usa-se o sistema de condensação com ventiladores (aerocondensadores). Estes equipamentos são mais caros e provocam uma perda de rendimento no ciclo da água. [18]

O fluido após haver passado pelo condensador fica armazenado em tanques, que podem ser chamados tanque de água condensada. É de suma importância que a água esteja completamente no estado de líquido comprimido, ou seja, não apresente titulação, que significa presença de fluido tanto em estado líquido quanto em gasoso, para evitar ineficiência no processo de bombeamento e danificação da máquina. [18]. O condensador normalmente recebe diferentes fluxos. São exemplos:

- As purgas do ciclo, presentes na caldeira, aquecedores e superaquecedores.
- Água de reposição
- O vapor do escapamento da turbina
- O vapor de desvio das turbinas, que em determinados modos de operação transitórios (arranques, paradas, disparos, mudanças bruscas de carga) conduzem diretamente ao condensador todo o vapor produzido na caldeira.
- Água desmineralizada provinda do tanque de reserva de reposição da purga contínua. [18]

#### 2.4.1 AEROCONDENSADORES

Este tipo de condensador se torna vantajoso nas plantas que apresentam limitações na disponibilidade de água de refrigeração. Este equipamento não precisa de um circuito de recuperação de água, o que acarretaria na necessidade de: bombas, torres de refrigeração e tratamento de água.

Acredita-se que para uma mesma capacidade de refrigeração é necessária uma quantidade menor de ar do que de água. Além do mais, não produzem contaminação por serem equipamentos mais limpos e seguros. Enquanto a água de refrigeração deve ser tratada e sua temperatura quando retorna ao meio, controlada. A Figura 8 é um exemplo de aerocondensador. [19]

Figura 8 - Exemplo de um aerocondensador



Fonte: [www.equirepsa.com/productos/intercambiadores-de-calor/aerocondensadores/](http://www.equirepsa.com/productos/intercambiadores-de-calor/aerocondensadores/)

## 2.5 BALANÇO ENERGÉTICO E RENDIMENTO

### 2.5.1 BALANÇO ENERGÉTICO

Segundo Silveira Neto *et al.*, 2010, o balanço energético de um sistema é o estudo dos fluxos e conversões energéticas do mesmo. Esse balanço tem como base teórica a primeira lei da termodinâmica que explica que a energia não pode ser criada nem destruída. Num balanço encontram-se entradas e saídas, nas quais existem conversões e perdas inversamente proporcionais à eficiência de cada transformação.

De acordo com LORA & Nascimento (2004), o vapor de água, como transportador de energia, traz significativas vantagens, que explicam sua disseminação. A água é um recurso de grande disponibilidade, de pouca agressão química e com grande capacidade de transportar energia. Na utilização de vapor e na geração ocorrem mudanças de fase, tanto na condensação quanto na vaporização, que resultam em grandes variações de volume específico. Isso acarreta num elevado coeficiente de transferência térmica, que junto à alta

densidade energética (calor latente) da água em estado gasoso, produz grandes taxas de troca térmica por unidade de área.

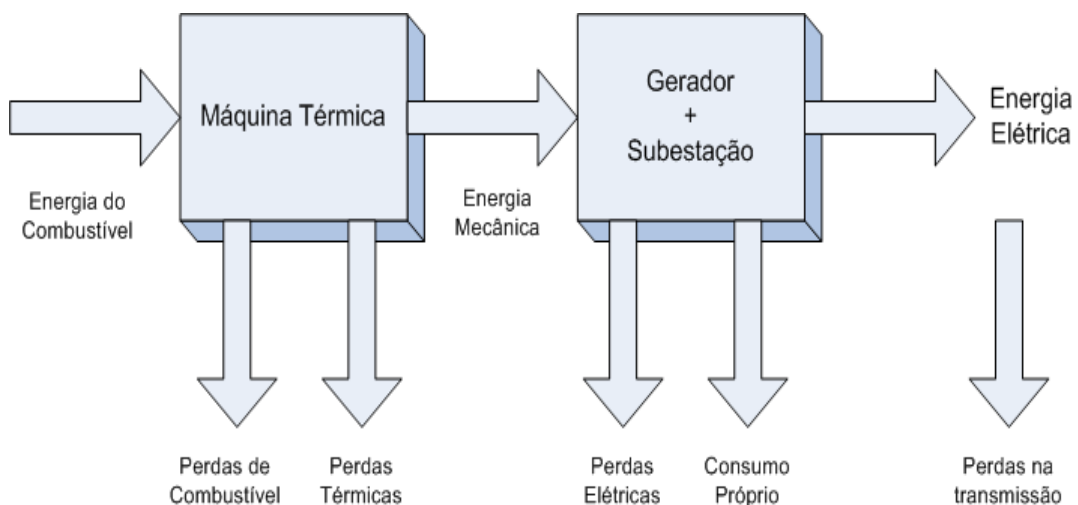
### 2.5.2 RENDIMENTO

É importante conhecer os detalhamentos de todas as conversões para poder analisar o rendimento total da planta. O cálculo de rendimento total é definido pela razão da energia na saída pela energia na entrada, de acordo com a equação 1 abaixo:

$$\eta = E_s/E_e \quad \text{Equação 1}$$

A energia de saída é menor que a de entrada, pela existência das perdas nos equipamentos e processos de conversões energéticas. São exemplos as perdas do combustível, que ocorrem no processo de armazenagem e tratamento, as perdas mecânicas nas bombas, caldeira e turbina, assim como também por atrito, ventilação, barulho, entre outros nos demais equipamentos. Por último, existe a perda elétrica no gerador elétrico devido ao seu rendimento não unitário. A Figura 9, abaixo, apresenta um diagrama que esquematiza as conversões de energia e parte das perdas envolvidas.

Figura 9 - Conversões energéticas, perdas mecânicas e elétricas.



Fonte: [www.antonioguilherme.web.br](http://www.antonioguilherme.web.br)

Outro fator que diminui a energia elétrica de saída é o consumo de energia interno da planta. No caso da usina utilizada neste estudo o consumo de energia interno é tanto de energia elétrica, por exemplo nas bombas e nos condensadores, como de energia mecânica, na utilização do calor do vapor no secador.

No ciclo Rankine, a relação de energia na saída por energia na entrada, isto é, seu rendimento, é dada pela razão do trabalho líquido executado pelo calor fornecido ao sistema, de acordo com a equação 2 abaixo:

$$\eta = \frac{W}{qH} = \frac{qH - qL}{qH} = \frac{Wt - |Wb|}{qH} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

W = trabalho líquido executado;

qH = o calor fornecido ao sistema;

qL = o calor retirado do sistema;

Wt = o trabalho realizado pela turbina;

Wb = o trabalho realizado pela bomba;

Considerando que:

$$qH = h3 - h2 ; \quad \text{Equação 3}$$

$$qL = |h4 - h1| ; \quad \text{Equação 4}$$

$$|Wb| = h2 - h1 ; \quad \text{Equação 5}$$

$$Wt = h3 - h4 ; \quad \text{Equação 6}$$

Sendo:

h1 = Entalpia do fluido após haver passado pelo condensador, antes de passar pela bomba.

h2 = Entalpia do fluido após ser bombeado, antes de entrar na caldeira

h3 = Entalpia do fluido ao sair da caldeira, antes de expandir na turbina

h4 = entalpia do fluido ao sair da turbina, antes de entrar no condensador

Ou seja, o rendimento térmico do ciclo pode ser determinado por:

$$\eta = \frac{((h_3 - h_2) - (h_4 - h_1))}{h_3 - h_2} \quad \text{Equação 7}$$

$$\eta = 1 - \frac{h_4 - h_1}{(h_3 - h_2)} \quad \text{Equação 8}$$

### 3 METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 DESCRIÇÃO DA PLANTA

A usina trabalha com uma turbina SIEMENS a vapor acoplada a um gerador síncrono de capacidade máxima igual a 15MVA, também da SIEMENS. A caldeira da usina opera a 65 bar absolutos e fornece cerca de 57 toneladas de vapor a 525°C para o turbo-gerador. Na planta encontram-se outros diferentes equipamentos como secador, transportadores de esteira ou parafusos, peneiras de disco ou vibratórias, economizador e pré-aquecedores de ar e água.

Nas descrições simplificadas dos ciclos do combustível e do fluido será possível observar mais equipamentos que serão utilizados nos balanços energéticos da planta.

#### 3.2 CICLO DO COMBUSTÍVEL

O material recebido possui aproximadamente cinquenta e cinco por cento (55%) de umidade e uma granulometria não uniforme. O material novo na planta é depositado num primeiro silo, chamado silo de úmidos (Figura 10). A biomassa que chega por caminhões e está acumulada no pátio da frente da usina (Figuras 10 e 11) é jogada numa tremonha (Figuras 10 e 11) por meio de máquinas. Existe a possibilidade da empresa comprar troncos inteiros (Figuras 10 e 11) de árvores que não foram usadas na madeireira. Nesse caso, os troncos passam por uma trituradora (Figuras 10 e 11), máquina esta que desempenha a função de triturar troncos num tamanho aproximado do que é considerado cavaco e também despeja o material na tremonha. Da tremonha o resíduo madeireiro é levado por um parafuso

até uma peneira de discos (Figura 10), que tem a função de impedir a passagem de pedras, galhos ou qualquer material diferente do de possível utilização. Por outro lado, uma parte do combustível chega por uma esteira (Figura 10) diretamente da URUFOR para o silo de úmidos. Ainda existe outra entrada, de uma parte da madeira chamada REMAN, que entrega matéria já seca e por duas esteiras pode despejar o material diretamente na peneira vibratória ou também para o silo de úmidos.

Figura 10 - Material, troncos, trituradora, tremonha, esteira, peneira 1 e silo de úmidos



Fonte: Autor, 2017.



Figura 11 - Detalhe de troncos e trituradora em operação



Fonte: Autor, 2017.

A biomassa sai do silo de úmidos e, por uma esteira (Figura 12), passa por uma segunda peneira de discos que também permite passar apenas o material utilizável. Dessa peneira, também por esteiras, o material é conduzido, por meio de parafusos (Figura 13), até uma tremonha (Figura 14), onde a matéria pode ser desviada para o secador (Figura 16 e 17), que é o caminho principal, ou para uma esteira que termina numa caldeira de grelha (Figura 15), que apenas é ativada quando a caldeira principal e a turbina estão paradas. O secador aumenta o poder calorífico útil do combustível, uma vez que diminui a quantidade de energia que seria consumida para a evaporação da água do mesmo durante a queima.

Figura 12 - Esteira saída úmidos



Fonte: Autor, 2017

Figura 13 - Parafusos entrada secador



Fonte: Autor, 2017.

Figura 14 – Tremonha de úmidos



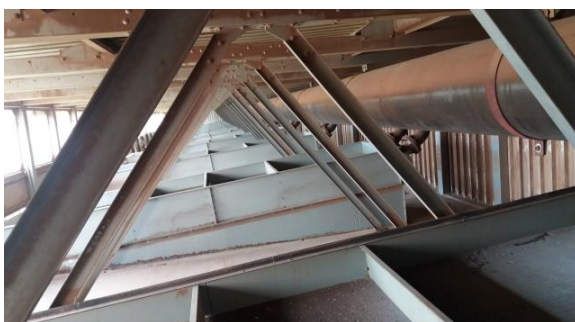
Fonte: Autor, 2017.

Figura 15 - Caldeira à grelha



Fonte: autor, 2017.

Figura 16 – Secador (Entrada de vapor e parte interna)



PARTE INTERNA SUPERIOR, VAPOR QUE ENTRA NOS TROCADORES DE CALOR



PARTE EXTERNA, VAPOR ENTRANDO NO SECADOR



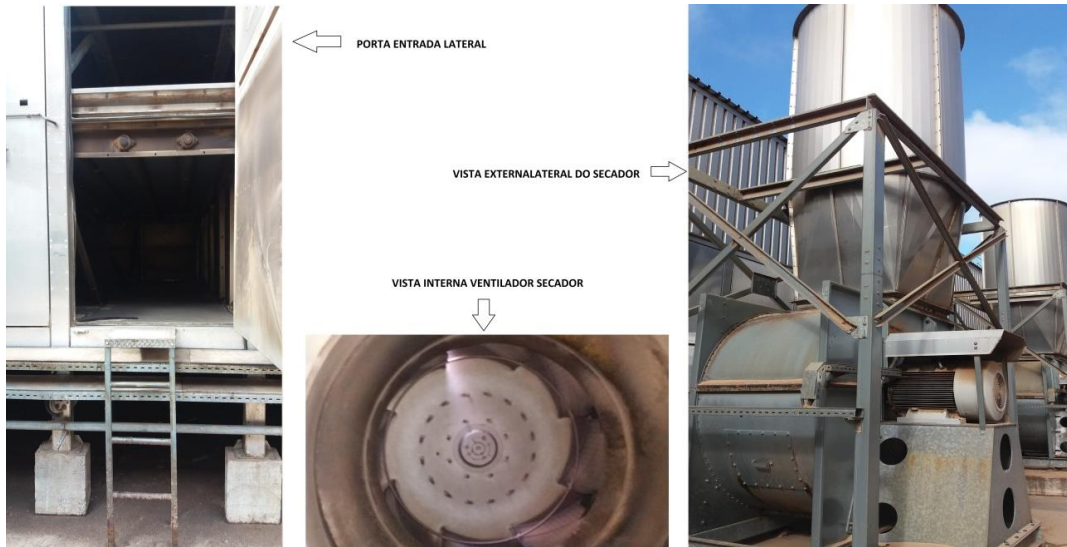
VISTA INTERNA DE CIMA DA ESTEIRA DO SECADOR



VISTA INFERIOR: ESTEIRA DO SECADOR QUE CARREGA BIOMASSA PELO AMBIENTE DOS TROCADORES

Fonte: Autor, 2017.

Figura 17 – Secador (Entrada de ar)



Fonte: Autor, 2017.

Neste equipamento o material fica cerca de 40 minutos e quando sai, por meio de um elevador de canecas (Figura 18) é despejado em cima da peneira vibratória. Essa peneira divide o material seco, de acordo com sua granulometria. O material que passa pela peneira vibratória tem uma dimensão menor que  $2 \times 2 \times 2 \text{mm}^3$  e é chamado de biomassa fina. O restante é chamado de chip ou, no português, cavaco.

Figura 18 - Elevador de canecas do secador para a peneira vibratória



Fonte: Autor, 2017.

Seguindo o caminho da biomassa fina, ou seja, que conseguiu passar pela peneira vibratória: Este material deixa a peneira por meio de outro elevador de canecas, desta vez de uma altura muito maior, e é despejada numa tremonha que tem a opção de, por meio de parafusos, ser levada para dentro do silo de finos (Figura 19) por três entradas superiores do mesmo ou direcionada para um desvio. Esse desvio despeja o material na esteira, já mencionada, que faz a entrada de biomassa úmida da madeireira ao lado. Esse recurso é utilizado caso não esteja em funcionamento a parte da caldeira que opera com esse tipo de material e o silo de finos já se encontre acima do nível máximo permitido (cerca de 75%). Normalmente não se ultrapassa esse nível dos silos pelo esforço provocado nos parafusos localizados no fundo dos mesmos, que com sobrecarga exigem um torque elétrico maior e ficam sujeitos a alguma deformação a longo prazo.

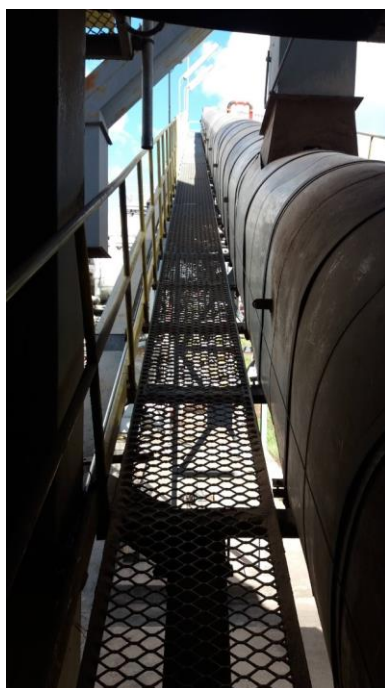
Do silo de finos o combustível é levado por uma esteira até uma tremonha. Além do desvio anteriormente mencionado existe mais um que se encontra no próprio silo. Este desvio, diferente do anterior, despeja matéria para um container, mas apenas é utilizado se o recurso anterior não for suficiente. Da tremonha mencionada neste parágrafo, a serragem é levada por quatro parafusos em paralelo, que se encontram em série com um de maior porte que finda numa válvula rotativa. Na rotativa, por ser material fino (praticamente pó de madeira), é levada para uma das entradas da caldeira por ar comprimido.

Figura 19 - Silo de finos



Fonte: autor, 2017.

Figura 20 - Saída de Finos



Fonte: Autor, 2017.

A caldeira possui dois procedimentos de produção de calor. A entrada que admite a biomassa fina chama-se Câmara Torcional de Finos ou CT2. Nessa câmara ocorre o processo de combustão completa, onde o combustível libera calor e  $\text{CO}_2$  para a fornalha da caldeira. A Figura 21 mostra a câmara, que possui formato cilíndrico na horizontal e a tubulação que realiza a circulação de água e vapor entre ela e o balão da caldeira que será explicado no ciclo do vapor.

Figura 21 - CT2



Fonte: Autor, 2017.

Também na Figura 21 é possível observar uma conexão na parte inferior da câmara. Essa conexão é um equipamento ventilador responsável pela injeção de ar secundário. Isto tem a função de adicionar um excesso de oxigênio para controlar a combustão completa dentro da câmara. As cinzas resultantes da combustão na CT2 caem por uma abertura mecanicamente acionada. As vezes ocorre a formação de pedras que são retiradas nas limpezas com pás, feitas a cada 3 dias. No procedimento de limpeza o fogo da câmara é apagado, retiram-se as cinzas e depois um sistema de sopro injeta ar comprimido para retirar resíduos que podem estar depositados nas paredes. As duas câmaras possuem no nome a palavra “Torcional” pelo desenho das paredes internas (Figura 22). O ar secundário entra



escoando pelas ranhuras realizando um movimento tangencial em forma de ciclone que aumenta o percentual de queima completa.

Figura 22 - Parede das Câmaras Torcionais



Fonte: Autor, 2017.

Figura 23 - Saída de cinzas da CT2



Fonte: autor, 2017.

Figura 24 - Cinzas



Fonte: Autor, 2017.

Partindo novamente da peneira vibratória, o material que foi classificado como cavaco segue um caminho diferente. Esta biomassa deixa a peneira por uma esteira. Esta esteira passa por uma adição de calcário que tem o papel de equilibrar o pH do combustível. Esta esteira se encontra em ângulo de  $90^\circ$  com uma segunda esteira. Esta também pode receber, por meio de um desvio não mencionado antes, material úmido diretamente da mesma tremonha por onde se iniciou esta descrição. Essa é uma manobra alternativa, que pode ser mecanicamente acionada caso seja necessário com urgência aumento de alimentação do silo de cavaco. Quando ocorre essa manobra é levado em consideração o aumento do grau médio de umidade do combustível. No final da última esteira mencionada, encontra-se uma tremonha (Figura 25), onde da mesma forma que no silo de finos, o material pode ser desviado para fora da trajetória, caso o silo esteja com nível elevado demais. Se não, o material é despejado no silo de cavaco (Figura 26).

Figura 25 – Tremonha do silo de cavaco



Fonte: autor, 2017.

Figura 26 - Silo de cavaco



Fonte: Autor, 2017.

Do silo, o cavaco é retirado pela parte inferior, por uma esteira transportadora (Figura 27) e conduzido até um sistema transportador de três parafusos (Figura 28). Cada um desses é responsável pela alimentação de um gaseificador (Figura 29).

Figura 27 - Esteira de saída do silo de cavaco



Fonte: Autor, 2017.

Figura 28 - Tremonha e parafusos de alimentação dos gaseificadores



Fonte: Autor, 2017.

Esta produção de calor, utilizando cavaco, encontra-se em paralelo à queima de biomassa fina explicada anteriormente. Este meio de produção de calor ocorre em duas etapas. Nos gaseificadores ocorre geração de gás de síntese, isto é, a combustão incompleta, que libera monóxido de carbono, em grande quantidade entre outros gases. Por dentro de cada gaseificador, em operação, encontra-se uma camada de cinzas na parte inferior, uma camada de brasas, na parte intermediária e uma camada de cavaco. A admissão de cavaco é constante e controlada para abafar o local e não ceder espaço para a existência de ar.

Figura 29 - Gaseificador

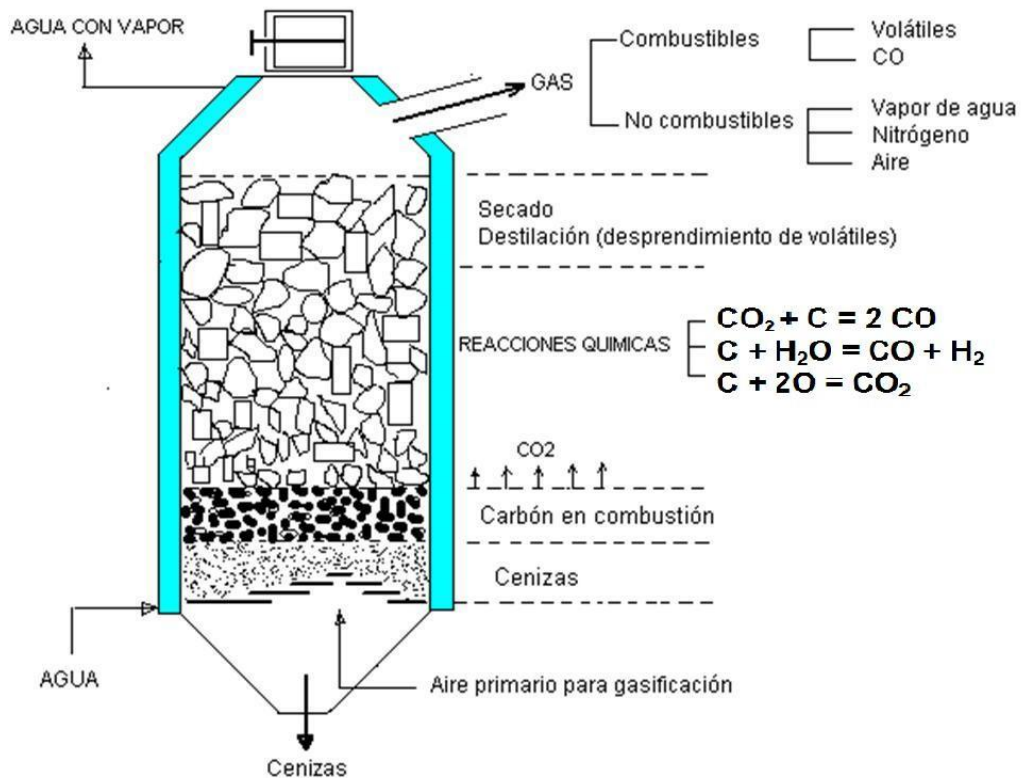


Fonte: Autor, 2017.

A Figura 30 foi retirada do manual da caldeira da usina e apresenta um corte no sentido vertical de qualquer um dos gasogênios em operação. Na mesma figura

encontram-se as reações químicas que se desencadeiam no processo que inicia nos gasogênios e se completa na câmara torcional de gases – CT1.

Figura 30 - Corte do projeto do gaseificador da usina



Fonte: Autor, 2017.

Existe uma tubulação que direciona os gases da combustão incompleta para o interior da câmara torcional de gases. Esta câmara, igualmente à CT2, apresenta entrada de ar secundário, que representa a segunda etapa desta produção de calor. Assim, essas duas entradas alimentam a caldeira (Figura 31) com fogo que transfere calor à tubulação de água que reveste o equipamento.

Figura 31 - Caldeira



Fonte: Autor, 2017.

Os gases que deixam a caldeira passam pelo economizador. São a fonte de calor para o pré-aquecimento da água bombeada do tanque de alimentação. Nesse equipamento os gases já perdem bastante energia na transferência de calor por condução e convecção para a água. Logo, os gases da queima sofrem uma purificação em um precipitador eletrostático. O processo de extração de poluentes inicia com o processo de ionização onde as partículas são eletrostaticamente carregadas. Existem placas nas laterais do equipamento, que atraem as partículas carregadas. Depois neutralizam e liberam as partículas para um funil, onde termina num recolhedor de impurezas.

Depois de passar pelo filtro de ar eletrostático, os gases são conduzidos para a chaminé. Esse trabalho é realizado por um elemento muito importante, o ventilador que na usina chamam de VTI. Esse ventilador provoca uma pressão negativa na saída da caldeira, que garante a continuidade do movimento dos gases pelo economizador, precipitador e findando na chaminé.

Figura 32 – Precipitador eletrostático e chaminé



Fonte: Autor, 2017.

### 3.3 CIRCUITO DO FLUIDO DE TRABALHO

O vapor, diferente da biomassa, pertence a um ciclo praticamente fechado, com exceção das perdas e da água de entrada quando necessário. A planta possui dois tanques de água à temperatura ambiente que recebem água da distribuição municipal. Desses tanques pode ser dada a entrada de água ao ciclo, se necessário. Os tanques também estão conectados entre si. Toda a movimentação de água entre dois equipamentos do ciclo é feita por uso de bombas. O sistema funciona com sistema de substituição em paralelo de bombas para manutenção.



Figura 33 - Um dos tanques de entrada de água



Fonte: Autor, 2017.

Figura 34 – Bombas saída tanques



Fonte: Autor, 2017.

A Figura 34 apresenta as bombas de saída dos tanques de entrada de água. Em cada bomba da planta, encontra-se um filtro antes e uma válvula de retenção depois da mesma.

As bombas da Figura 34 dão entrada ao tanque de alimentação da caldeira (Figura 35). Para realmente adentrar ao tanque a água passa antes por um desaerador. O tanque é pré-aquecido por vapor de extração da turbina que o

mantem a 60°C e 4 bar de pressão. A água é bombeada para o economizador (Figura 37) à 65 bar pela bomba (Figura 36) de saída do tanque de alimentação.

Figura 35 - Tanque de alimentação



Fonte: Autor, 2017.

Figura 36 - Bombas de 65 bar



Fonte: Autor, 2017.

Figura 37 - Economizador



Fonte: Autor, 2017.

No economizador a água ganha energia térmica dos gases que já saíram da caldeira e adentra no balão (Figura 38) da caldeira, a cerca de 280°C. O balão da caldeira contém vapor saturado, com a metade de seu volume em estado líquido e metade em gasoso. Da parte inferior do balão existem tubulações que descem e circulam por “camisas de água” que revestem cada gaseificador e as duas câmaras torcionais e retorna para o mesmo, pelas tubulações chamadas de montantes, ate novamente o balão da caldeira, em estado de vapor. Essa circulação faz parte do

projeto da caldeira para aumentar a eficiência térmica do ciclo. Além das entradas mencionadas na parte superior do balão existe uma saída. Por esta saída o vapor a 280°C e 65 bar é direcionado à entrada da caldeira propriamente dita. Nesse ponto o vapor adentra na tubulação que está exposta ao fogo mencionado no ciclo da biomassa. O vapor deixa a primeira parte dos trocadores de calor a aproximadamente 450°C, onde entra nos super aquecedores (parte da caldeira com temperatura mais elevada) e atinge 525°C. Na Figura 39 é possível observar a conexão de uma das câmaras torcionais com a fornalha da caldeira. Em funcionamento, todo o meio que pode ser visto na imagem encontra-se em chamas.

Figura 38 - Balão da caldeira



Fonte: Autor, 2017.

Figura 39 - Parte interna da caldeira



Fonte: Autor, 2017.

A preparação e trajetória da biomassa e o ciclo do vapor descrito até aqui existem apenas para proporcionar as condições de vapor requeridas pela turbina. O vapor entra na turbina (Figura 40) com um fluxo mássico de 57 ton/h onde sofre a queda de pressão, expansão e sai por uma tubulação de escape a aproximadamente 0,2 bar. Desse fluxo mássico, 20 ton/h é desviado por extração da turbina a 140°C e 5 bar sendo metade direcionado vendido para a URUFOR e a outra metade atende pré-aquecimento do ar (Figura 41) injetado na caldeira e pré-aquecimento de água no tanque de alimentação. O vapor que passa pelos pré-aquecedores de ar, perde energia térmica, sofre mudança para estado líquido e escoar até o tanque de condensado.

Figura 40 - Turbina



Fonte: Autor, 2017.

Figura 41 - Pré aquecedor de ar secundário



Fonte: Autor, 2017.

Pelo escapamento da turbina flui 36 ton/h de vapor. 20 ton/h desse fluxo do é direcionado para o secador de biomassa da planta onde ao perder energia térmica retorna em estado líquido para o tanque de condensado. Para condensar o restante da vazão do escapamento, que não pode ser reaproveitado, a usina utiliza um conjunto de nove aerocondensadores (Figura 42). Esses equipamentos retiram energia térmica do vapor por convecção forçada.

Figura 42 - Aero condensadores



Fonte: Autor, 2017.

A água que deixa os aero condensadores cai no tanque de condensado (Figura 43) que localiza-se a baixo dos mesmos. A canalização que retorna do secador e da madeireira URUFOR também deságua no tanque de condensado.

Figura 43 - Tanque de condensado



Fonte: Autor, 2017.

Do tanque de condensado a água retorna ao tanque de alimentação completando o ciclo.

### 3.4 COMBUSTÍVEL UTILIZADO

A matéria-prima utilizada como combustível na usina é do tipo resíduo madeireiro. A grande parte da biomassa consumida pela planta é oriunda da madeireira URUFOR, localizada ao lado da usina. Porém, existem outras madeireiras que vendem o combustível para a Bioener.

Como a usina compra biomassa de diversos locais, o combustível apresenta variações não apenas na granulometria, mas também no poder calorífico por serem oriundos de diferentes espécies. A planta recebe *Eucalyptus acaciiformis* (popular eucalipto) e *Pinus elliottii* (popular pinheiro). Em relação a granulometria a usina recebe desde pó de madeira até troncos que não foram utilizados. É possível haver diferença no grau de umidade entre os resíduos provindos de diferentes locais. Todos esses fatores resultam numa variação do poder calorífico que depende da relação Eucaliptos por pinheiros e grau médio de umidade.

Foi desenvolvido no programa MatLab, um código para a determinação do poder calorífico da mistura final da biomassa que entra no sistema de geração a partir de proporção de mistura de eucaliptos e pinheiros. O programa também determina, em valores de massa, o consumo de ar, a produção de água resultante e



a liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da mistura. O código foi desenvolvido com base na determinação experimental do poder calorífico da biomassa comprada tipo *Eucalyptus acaciiformis* como sendo 4.248 kcal/kg e da espécie *Pinus elliottii* como 4.582 kcal/kg. O consumo de ar seco, a produção de água e a liberação de CO<sub>2</sub> oriundos de cada tipo de madeira foram fornecidos pela empresa. Esses valores foram utilizados no código-MatLab e podem ser observados nas Figuras 44 e 45.

Figura 44 – Código-MatLab de determinação de propriedades do combustível parte 1.

```
1 - PCeucaliptus = 4248
2 - PCpino = 4582
3
4 - proporcao = input('informe proporção eucaliptus por pino:');
5
6
7 - if (proporcao < 1)
8 -     PCmezcla = ((1/proporcao)*PCpino+PCeucaliptus)/(1+1/proporcao)
9 - else
10 -     PCmezcla = (proporcao*PCeucaliptus+PCpino)/(1+proporcao)
11 - end
12
13 %consumo de aire en kg;
14
15 - consumoairepinoseco = 6.261;
16 - consumoaireeucaliptuseco = 6.069;
17
18 %produccion de agua en kg;
19
20 - produceaguapinoseco = 0.648;
21 - produceaguaeucaliptuseco = 0.630;
22
23 %liberacion CO2 en kg;
24
25 - liberaCO2pinoseco = 1.815;
26 - liberaCO2eucaliptuseco = 1.793;
27
```

Fonte: Autor, 2017.

Figura 45 - Código-MatLab de determinação de propriedades do combustível parte 2.

```
28 - if (proporcao < 1)
29
30 - CONSUMOdeAIREmezcla = ((1/proporcao)*consumoairepinoseco+consumoaireeucaliptuseco)/(1+1/proporcao)
31
32 - PRODUCEdeAGUAmezca = ((1/proporcao)*produceaguapinoseco+produceaguaeucaliptuseco)/(1+1/proporcao)
33
34 - LIBERAdedeCO2mezcla = ((1/proporcao)*liberaCO2pinoseco+liberaCO2eucaliptuseco)/(1+1/proporcao)
35
36 - else
37
38 - CONSUMOdeAIREmezcla = (proporcao*consumoaireeucaliptuseco+consumoairepinoseco)/(1+proporcao)
39
40 - PRODUCEdeAGUAmezca = (proporcao*produceaguaeucaliptuseco+produceaguapinoseco)/(1+proporcao)
41
42 - LIBERAdedeCO2mezcla = (proporcao*liberaCO2eucaliptuseco+liberaCO2pinoseco)/(1+proporcao)
43
44 - end
45
```

Fonte: Autor, 2017.

Para a realização do balanço energético simplificado da planta foi utilizada a relação de eucaliptos por pinus com que a usina estava trabalhando em fevereiro de 2017. A relação mássica de *Eucalyptus* por *Pinus* era igual a 2. Utilizando o programa, o poder calorífico, o consumo de ar, a liberação de água e de CO<sub>2</sub> da mistura obtida foram de:

Poder calorífico: 4.359,3 kcal/kg.

Consumo de ar: 6,133 kg.

Produção de água: 0,636 kg

Liberação de CO<sub>2</sub>: 1,8003 kg

Conforme a Figura 46, a seguir:

Figura 46 - Valores obtidos do combustível

```
PCmezcla =  
    4.3593e+03  
  
CONSUMOdeAIREmezcla =  
    6.1330  
  
PRODUCEdeAGUAmezca =  
    0.6360  
  
LIBERAdeCO2mezcla =  
    1.8003
```

Fonte: Autor, 2017.

## **4 RESULTADOS**

### **4.1 BALANÇO ENERGÉTICO PARA POTÊNCIA NOMINAL DE VAPOR E ELETRICIDADE**

Foram elaboradas junto ao engenheiro mecânico da usina tabelas que apresentam as conversões energéticas, acompanhadas de vazões, poder calorífico e outras propriedades do fluido ou biomassa em todos os equipamentos envolvidos. A tabela, enviada em anexo, apresenta o balanço energético da planta envolvendo os itens mencionados para a usina operando na potência elétrica nominal e a madeireira consumindo a demanda contratada (10 toneladas de vapor por hora). A tabela pode ser observada também nas Figuras 47 e 48.

Figura 47 - Balanço energético da planta a 9MW com extração de 20 ton/h

Cálculo de ratio BDMT / MWH			
<b>Contrato Urufor 10</b>			
	<b>Potência e consumos da turbina</b>	<b>Unidade</b>	
10	Potencia nos bornes	Mw	10,3
11	Consumo interno	Mw	1,3
12	Potencia entregada a UTE	Mw	9,0
	<b>Producción de vapor para turbogerador</b>		
15	Consumo do turbogenerador	ton/h	55,3
16	Temperatura vapor	°C	520
17	Entalpia vapor superaquecido	kcal/kg	827
18	Entalpia agua de alimentação	kcal/kg	141
19	Energía para produzir vapor p/ turbogerador	Mcal/kg	37977
	<b>Consumo de vapor a 4,5 bar</b>		
22	Pre-aquecimento de ar	ton/h	4,746
23	Pre-aquecimento de ar	ton/h	6,20
24	Consumo de Urufor	ton/h	10,0
25	Injeção ao secador	ton/h	0,0
26	Consumo total de vapor a 4.5 bar	ton/h	20,9

Fonte: Autor, 2017.

Figura 48 - Balanço energético da planta a 9MW com extração de 20 ton/h

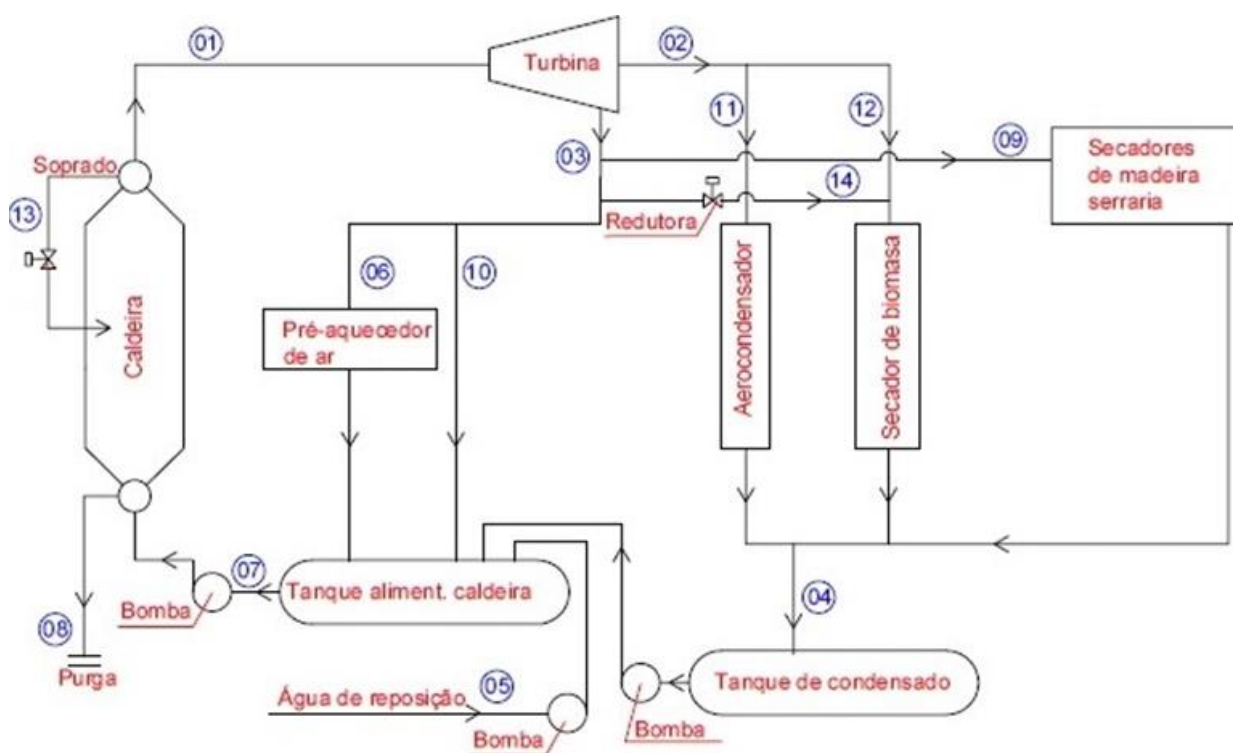
23	Pre-aquecimento de ar	ton/h	6,20
24	Consumo de Urufor	ton/h	10,0
25	Injeção ao secador	ton/h	0,0
26	Consumo total de vapor a 4,5 bar	ton/h	20,9
27			
28	<b>Origem de vapor a 4,5 bar</b>		
29	Extração	ton/h	20,9
30	Desvio	ton/h	0,0
31			
32	<b>Vapor de escapamento</b>		
33	Escapamento para secador e aerocondens.	ton/h	34,4
34	Consumo secador	ton/h	20,0
35	Vapor a aerocondensador	ton/h	14,4
36	Consumo total de vapor a 0,3 bar	ton/h	34,4
37			
38	<b>Produção de vapor para serviços auxiliares</b>		
39	Purga (50%)	ton/h	2,80
40	Energia purga	Mcal/h	833,83
41	Injeção aos gaseificadores	ton/h	0,50
42	Energia da injeção aos gaseificadores	Mcal/h	331,77
43	sopradors	ton/h	2,00
44	Energia sopradors	Mcal/h	1327,09
45	Energia total servicios auxiliares	Mcal/h	2492,70
46			
47	<b>Balanço de energia</b>		
48	Energia total consumida pela caldeira	Mcal/h	40470
49	Energia injetada pelo ar quente	Mcal/h	2377
50	Energia retirada por fumaça	Mcal/h	3760
51	Energia aportada por la biomasa	Mcal/h	41853
52			
53			
54			
55	<b>Combustível</b>		
56	PCI combustível seco	kcal/kg	4360
57	Umidade	%	25
58	Poder calorífico	kcal/h	3120
59			
60	<b>Perdas na caldeira</b>		
61	Perdas por CO	%	0
62	Perdas por irradiação	%	1,4
63	Perdas por cinzas	%	0,6
64	Perdas totais de combustível Caldeira	%	2,0
65			
66	<b>Consumo de combustível</b>		
67	Consumo de combustível húmedo	ton/h	13,69
68	Consumo de combustible seco	bdmt/h	10,27
69			
70	<b>Relação Ratio</b>		
71	Ratio teórico	bdmt/Mwh	1,141
72			
73			
74			
80			

Fonte: Autor, 2017.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR NA TURBINA PARA UM NOVO CONSUMO DA MADEIREIRA

Observando a Figura 49, é possível verificar os fluxos de vapor na entrada, extração e saída da turbina. O consumo de vapor da madeireira representa uma parte da vazão da extração da turbina. Portanto variando o consumo mencionado, pode resultar na variação dos demais fluxos da turbina.

Figura 49 - Principais fluxos de vapor da planta



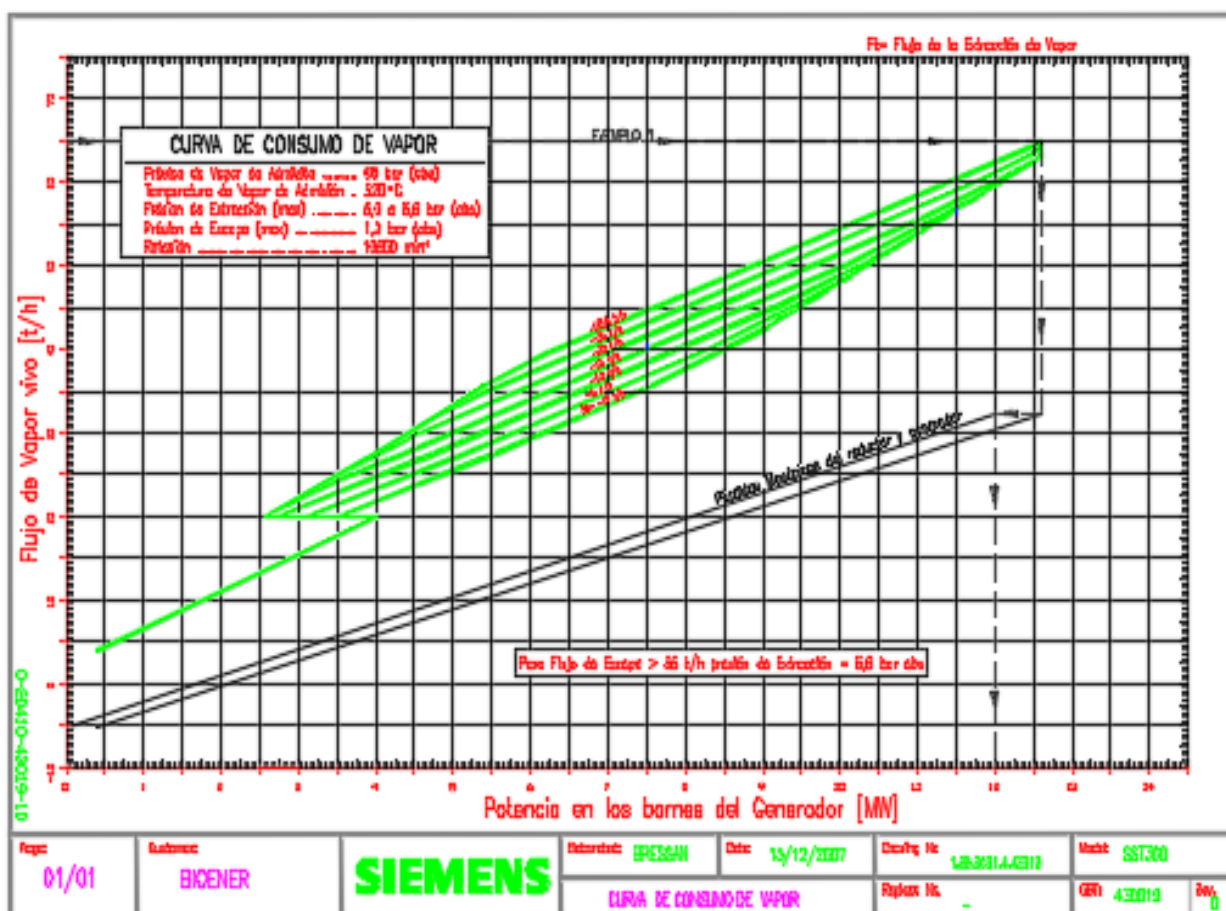
Fonte: Autor, 2015.

Além disso, nada garante que o fluxo na turbina seja constante para qualquer consumo da URUFOR, ou seja, que a quantidade reduzida num fluxo resulte no acréscimo dos demais. O correto a ser feito é refazer o balanço, atualizando os dados, para assim verificar os novos fluxos e a quantidade de combustível a ser queimado na caldeira.

O consumo teórico de vapor da turbina é determinado por uma curva que apresenta o consumo em toneladas de vapor por hora (no eixo vertical) em relação à

potência elétrica gerada (no eixo horizontal). A curva foi passada para formato dwg a fim de possibilitar um uso com maior precisão e pode ser observada na Figura 50, abaixo. A usina não tem acesso às equações que descrevem cada curva presente no gráfico que foram elaboradas pela SIEMENS (empresa que vendeu o turbo gerador e implantou o mesmo no sistema).

Figura 50 - Curva de vazão por potência do Turbo gerador



Fonte: Curva do Turbo Gerador, BIOENER, versão AutoCad. Acesso em 2017.

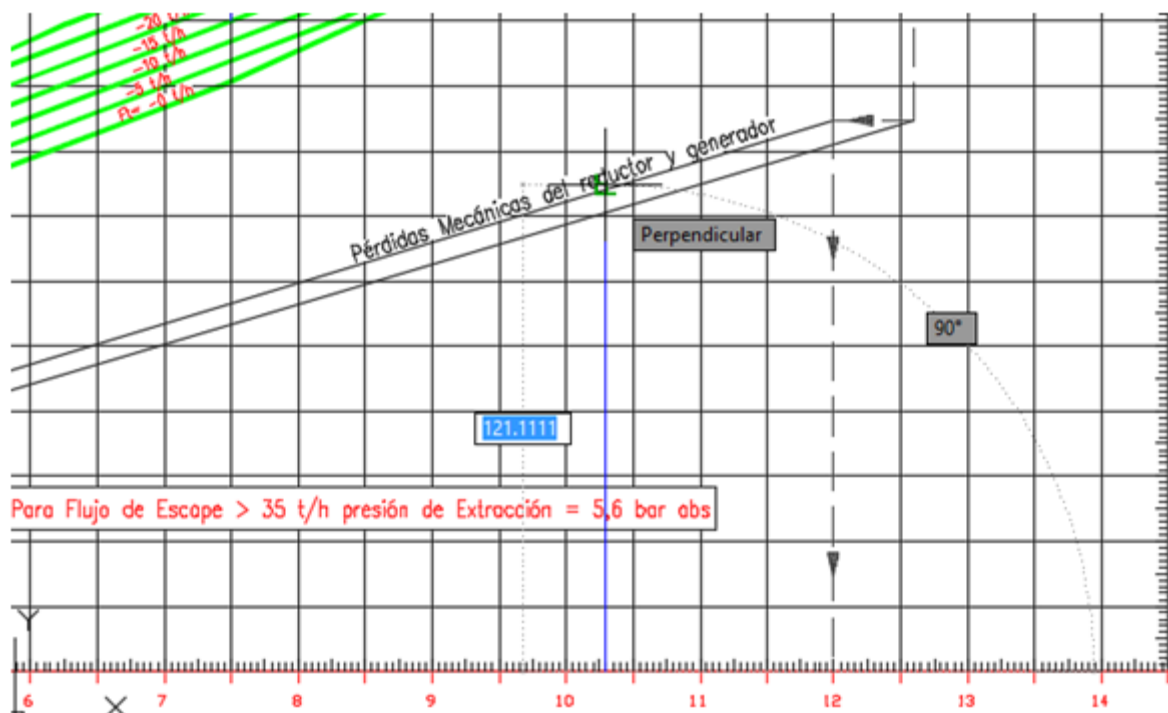
Para a realização de um novo balanço, foi escolhido um consumo de 8 ton/h de fluxo direcionado a secagem de madeira da URUFOR. A justificativa é que existem ocorrências momentâneas dessa situação, assim como também para 6, 4 e 2 ton/h.

Após definir o novo consumo da madeira, foi informado esse valor na linha 24 da aba “Relação” da tabela enviada em anexo. Isso modifica a vazão total da



extração da turbina na linha 26 que representa o total de vapor a 5 bar. A linha 29 trata da mesma vazão da linha 26, apenas modificando o nome para vazão de extração. O próximo passo foi abrir a curva de potência do turbo gerador (Figura 51), e localizar, no eixo horizontal, a potência de geração. Sabe-se, experimentalmente, que entregando 9 MW, a planta consome aproximadamente 1,3 MW, logo a potência total gerada deve ser 10,3 MW. Encontrando este valor no eixo horizontal, foi traçada uma reta até a curva cinza do gráfico, onde foi realizado um desvio que representa as perdas totais de energia do turbo-gerador para aquela potência. O desvio pode ser visto observando o traço azul na Figura 51 que percorre exatamente o que deve ser feito. Após o desvio, o traço prossegue no sentido vertical até atingir a curva verde correspondente à extração da turbina.

Figura 51 - Traço até o desvio considerando o rendimento

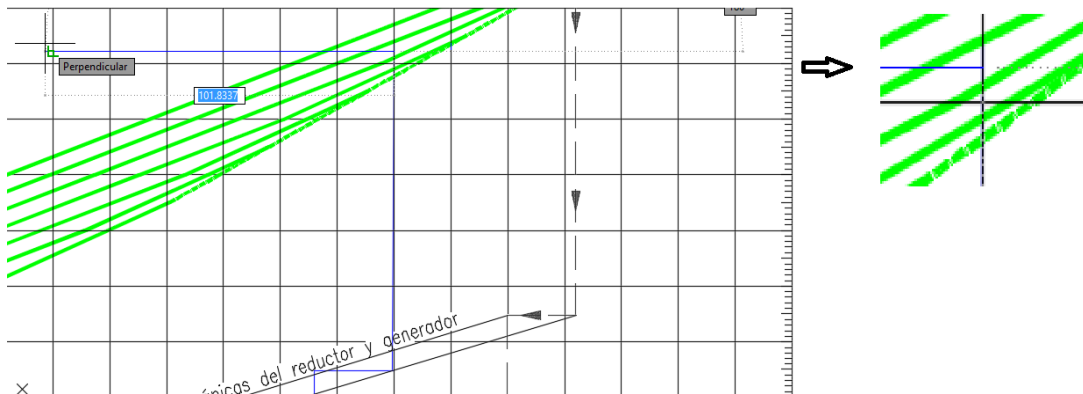


Fonte: Autor, 2017.

Procurou-se então, a extração da turbina correspondente à situação em questão. Pode ocorrer da extração resultante da linha 29 na tabela em anexo não apresentar uma curva correspondente no gráfico. Nesses casos, deve ser realizada

uma interpolação entre a curva superior e a inferior. Essa interpolação pode ser observada na Figura 52.

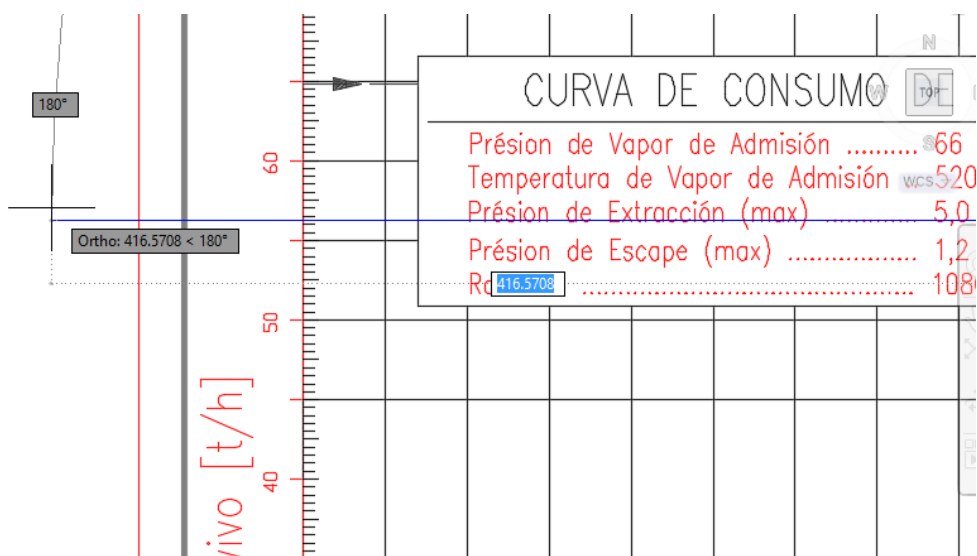
Figura 52 - Interpolação entre curvas de vazões da extração



Fonte: Autor, 2017.

Com isso, foi traçada uma reta na direção horizontal atingindo o eixo vertical e verificou-se o consumo mássico de vapor total do turbo gerador, como pode ser visto na figura 53.

Figura 53 - Determinação do consumo total do turbo gerador



Fonte: Autor, 2017.

O novo consumo total de vapor no turbo gerador resulta na nova energia para produzir vapor para o turbo gerador (linha 19), que é dada em megacalorias por quilograma (Mcal/Kg). Isso não alterou o consumo de vapor destinado a pré-aquecimento de ar, uma vez que esse fluxo é a razão entre energia aportada por aquecimento de ar de 20°C a 140°C (linha 21 da tabela, aba de pré-aquecimento) pela variação de entalpia do vapor condensado (linha 24 da tabela, aba de pré-aquecimento) e esses dados permanecem constantes. Porém ocorreu uma redução do fluxo destinado a pré-aquecimento de água que depende da energia consumida para aquecer água (linha 42 da tabela, aba de pré-aquecimento).

Figura 54 - Variação no pré-aquecimento de ar e água

5				
6				
7	<b>Energía calentamiento de aire secundario</b>			
8				
9	Energía entregada a UTE	MWH	3,2	9,0
10	Ratio	%	1,50	1,15
11	Consumo de biomassa	BDMT/h	4,8	10,4
12	Ar estiquiométrico	Kg/h	29438,4	63476,6
13	Excesso de ar CT 1	%	20,0	20,0
14	Excesso de ar CT 2	%	40,0	40,0
15	% CT 1 na relação total de energia	%	50,0	50,0
16	<b>Ar total</b>	<b>kg/h</b>	<b>38269,9</b>	<b>82519,5</b>
17	Excesso global	%	30,0	30,0
18	Oiigênio aprox	%	4,8	4,8
19	Calor específico do ar	kcal/kg °C	0,24	0,24
20	Variação da temperatura do ar	°C	120	120
21	Energía aportada por caquecimento do ar de 20 a 140°C	Mcal/h	1102	2377
22	Entapia do vapor a 4,5 bar	kcal/kg	657,5	657,5
23	Entalpia do condensado a 4,5 bar	kcal/kg	140,8	156,8
24	Variação de entalpia do vapor a condensado	kcal/kg	516,8	500,8
25	Consumo de vapor	kg/h	2,1	=L21/L24
26				
27	<b>Energía aquecimento de água alimentação caldeira</b>			
28				
29	Entapia de vapor a 4,5 bar	kcal/kg	657,5	657,5
30	Entalpia de agua a 2,6 bar	kcal/kg	140,8	140,8
31	Entalpia de condensado de aquecimento de ar	kcal/kg	140,8	156,8
32	Entalpia de condensado	kcal/kg	90,0	90,0
33	Entalpia de agua de reposição	kcal/kg	20,0	20,0
34				
35	Consumo de água para vapor da turbina	ton/h	26,0	54,7
36	Consumo de agua em serviços auxiliares da caldeira	ton/h	5,3	5,3
37	Consumo total de água em tanque de alimentação	ton/h	31,3	60,0
38	Consumo de água 20°C	ton/h	5,3	5,3
39	Consumo de condensado de aquecimento de ar	ton/h	2,13	4,75
40	Consumo de condensado 90°C en tque de água	ton/h	23,9	50,0
41				
42	Energía consumida para aquecer água	Mcal/h	1851,4	3175,4
43	Consumo de vapor a 4,5 bar para aquecimento tque de alimentação	ton/h	3,6	(L29-L30)
44				
45				
46				
47				

◀ ▶ | Relação | Combustão | **Pré-aquecimento** | Fumaça | Combustível | +  
 EDITA

Fonte: Autor, 2017.

Na aba “Relação”, o consumo para pré-aquecimento de ar e de água encontram-se respectivamente nas linhas 22 e 23.

Dando continuidade ao novo balanço, entre as linhas 33 e 36 da aba “Relação” estão apresentados os fluxos do escapamento da turbina, isto é, que não foram desviados pela extração. O consumo do secador de biomassa da planta foi mantido constante a 20 toneladas por hora. Nota-se uma alteração na linha 35 (Vapor para aero condensadores) e na linha 36 (Vapor total a 0,3 bar).

Figura 55 - Fluxos no escapamento da turbina

	Vapor de escapamento			
32				
33	Escapamento para secador e aerocondensadores	ton/h	34,4	35,8
34	Consumo secador	ton/h	20,0	20,0
35	Vapor a aerocondensador	ton/h	14,4	15,8
36	Consumo total de vapor a 0,3 bar	ton/h	34,4	35,8

Fonte: Autor, 2017.

Não foram observadas alterações na produção de vapor para serviços auxiliares que estão representados da linha 39 ate alinha 45.

O próximo bloco a ser atualizado é o balanço da linha 48 ate a linha 51, onde encontra-se a energia total consumida na caldeira, a energia aportada pelo ar quente, a energia retirada na fumaça e a energia aportada pela biomassa. A redução do consumo da madeira acarretou na redução da energia consumida pela caldeira e conseqüentemente da energia aportada pelo combustível. A energia aportada por aquecimento de ar e a retirada pela fumaça não apresentaram variações.

Figura 56 - Balanço de energia na caldeira

	Balanço de energia			
47				
48	Energia total consumida pela caldeira	Mcal/h	40470	40058
49	Energia injetada pelo ar quente	Mcal/h	2377	2377
50	Energia retirada por fumaça	Mcal/h	3760	3760
51	Energia aportada por la biomasa	Mcal/h	41853	41441

Fonte: Autor, 2017.

As perdas na caldeira são dadas no manual em valor percentual. Esses valores foram mantidos em todas as simulações.

Figura 57 - Perdas na caldeira

60	<b>Perdas na caldeira</b>			
61	Perdas por CO	%	0	0
62	Perdas por irradiação	%	1,4	1,4
63	Perdas por cinzas	%	0,6	0,6
64	Perdas totais de combustível Caldeira	%	2,0	2,0

Fonte: Autor, 2017.

Por último foi realizada a análise de consumo de combustível.

Figura 58 - Consumo de combustível

66	<b>Consumo de combustível</b>			
67	Consumo de combustível húmedo	ton/h	13,69	13,55
68	Consumo de combustivel seco	bdmt/h	10,27	10,17

Fonte: Autor, 2017.

Nota-se a variação de biomassa combustível para cada consumo da serraria. Após refazer o balanço, finalmente, é possível obter a nova relação de biomassa consumida por energia elétrica gerada.

Figura 59 – Relação biomassa consumida por energia elétrica gerada

70	<b>Relação Ratio</b>			
71	Ratio teórico	bdmt/Mwh	1,141	1,129

Fonte: Autor, 2017.

### 4.3 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR NA TURBINA PARA DIFERENTES CONSUMOS DA MADEIREIRA

Após haver sido refeito o balanço para um consumo da madeira de 8 ton/h, foram efetuados, de maneira similar, os novos balanços para:

- 6 toneladas de vapor por hora;
- 4 toneladas de vapor por hora;
- 2 toneladas de vapor por hora;

- 1 tonelada de vapor por hora;
- 11 toneladas de vapor por hora;
- 12 toneladas de vapor por hora;

Figura 60 - Balanço energético para diferentes consumos de vapor da madeireira

		Contrato Urufor 10	Contrato Urufor 8	Contrato Urufor 6	Contrato Urufor 4	Contrato Urufor 2	Contrato Urufor 1	Contrato Urufor 0	Contrato Urufor 11	Contrato Urufor 12
<b>Potência e consumos da turbina</b>										
Potencia nos bornes	Mw	10,3	10,300	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,3	10,3
Consumo interno	Mw	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,44	1,3	1,3
Potencia entregada a UTE	Mw	9,0	9,00	9,0	9,0	9,0	9,0	8,8	9,0	9,0
Temperatura vapor	°C	520	520	520	520	520	520	520	520	520
Entalpia vapor superaquecido	kcal/kg	827	827	827	827	827	827	827	827	827
Entalpia agua de alimentação	kcal/kg	141	141	141	141	141	141	141	141	141
Energia para produzir vapor p/ turbogerador	Mcal/kg	37977	37565	37290	37016	36810	36672	36604	38115	38183
<b>Consumo de vapor a 4,5 bar</b>										
Pre-aquecimento de ar	ton/h	4,746	4,746	4,746	4,746	4,746	4,746	4,619	4,746	4,746
Pre-aquecimento de ar	ton/h	6,20	6,145	6,105	6,066	6,037	6,017	6,020	6,223	6,233
Consumo de Urufor	ton/h	10,0	8,0	6,0	4,0	2,0	1,0	0,0	11,0	12,0
Injeção ao secador	ton/h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0
Consumo total de vapor a 4,5 bar	ton/h	20,9	18,9	16,9	14,8	12,8	11,8	14,8	22,0	23,0

Fonte: Autor, 2017.

Figura 61 – Redução do fluxo mássico de vapor de extração e aumento do no escapamento da turbina.

<b>Origem de vapor a 4,5 bar</b>										
Extração	ton/h	20,9	18,9	16,9	14,8	12,8	11,8	14,8	22,0	23,0
Desvio	ton/h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Vapor de escapamento</b>										
Escapamento para secador e aerocondensadore	ton/h	34,4	35,8	37,4	39,1	40,8	41,6	42,7	33,5	32,6
Consumo secador	ton/h	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Vapor a aerocondensador	ton/h	14,4	15,8	17,4	19,1	20,8	21,6	22,7	13,5	12,6
Consumo total de vapor a 0,3 bar	ton/h	34,4	35,8	37,4	39,1	40,8	41,6	42,7	33,5	32,6

Fonte: Autor, 2017.

Figura 62 – Redução da energia consumida pela caldeira.

Balço de energia										
Energia total consumida pela caldeira	Mcal/h	40470	40058	39783	39508	39302	39165	39096	40607	40676
Energia injetada pelo ar quente	Mcal/h	2377	2377	2377	2377	2377	2377	2313	2377	2377
Energia retirada por fumaça	Mcal/h	3760	3760	3760	3760	3760	3760	3659	3760	3760
Energia aportada por la biomasa	Mcal/h	41853	41441	41166	40891	40685	40548	40443	41990	42059
Combustível										
PCI combustível seco	kcal/kg	4360	4360	4360	4360	4360	4360	4360	4360	4360
Umidade	%	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Poder calorífico	kcal/h	3120	3120	3120	3120	3120	3120	3120	3120	3120

Fonte: Autor, 2017.

Figura 63 – Redução do consumo de combustível.

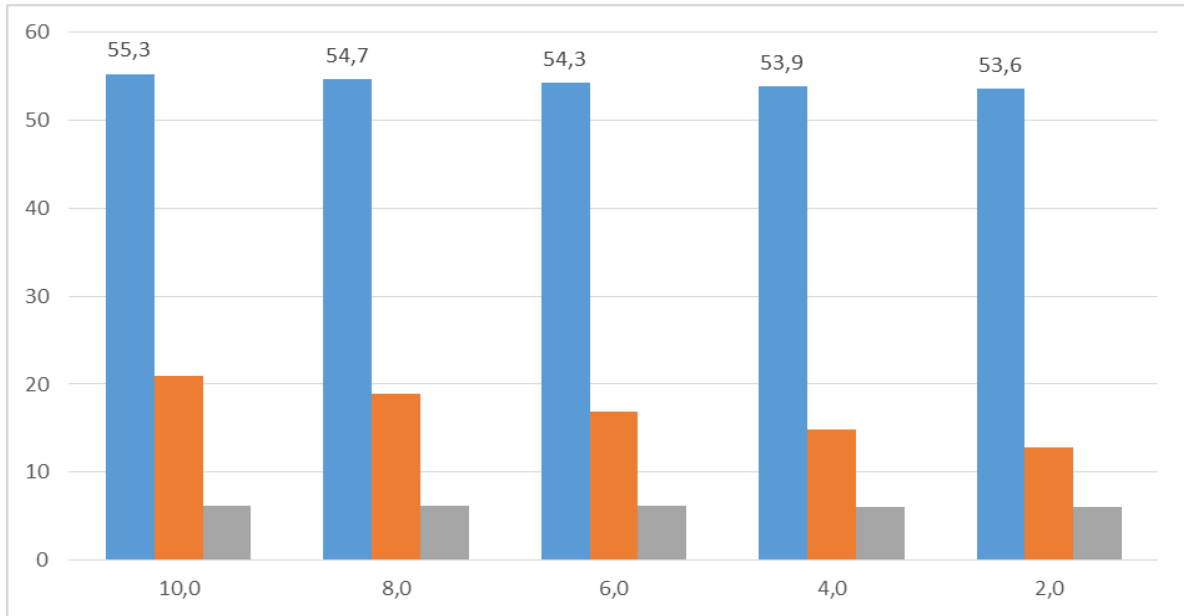
Perdas na caldera										
Perdas por CO	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Perdas por irradiação	%	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Perdas por cinzas	%	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Perdas totais de combustível Caldeira	%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Consumo de combustível										
Consumo de combustível húmido	ton/h	13,69	13,55	13,46	13,37	13,31	13,26	13,23	13,73	13,76
Consumo de combustíble seco	bdmt/h	10,27	10,17	10,10	10,03	9,98	9,95	9,92	10,30	10,32
Relação Ratio										
Ratio teórico	bdmt/Mwh	1,141	1,129	1,122	1,114	1,109	1,105	1,132	1,14	1,15

Fonte: Autor, 2017.



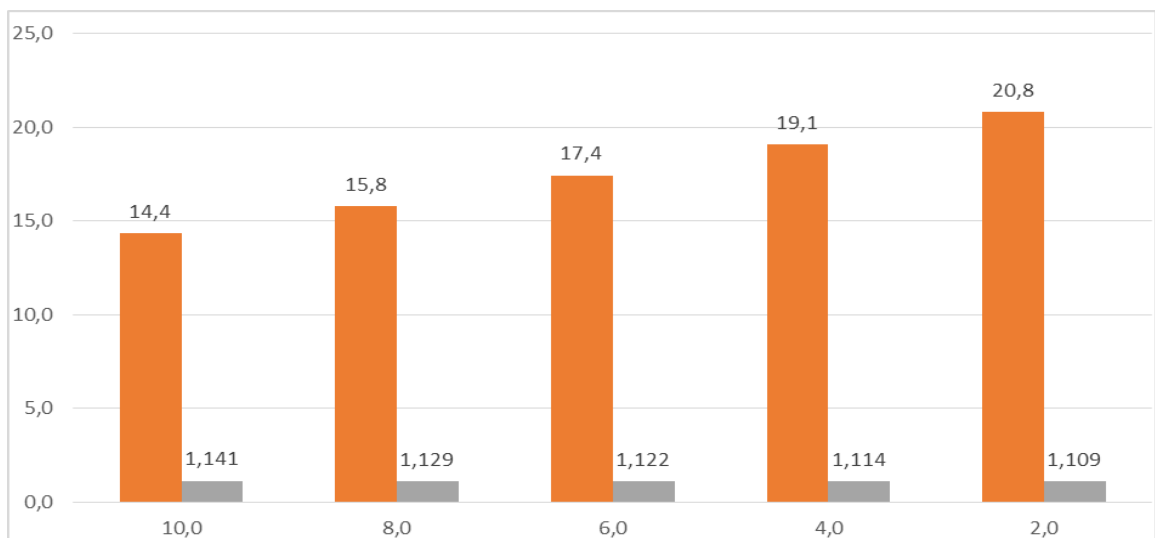
As Figuras 64, 65, 66 e 67 apresentam o comportamento de algumas variáveis da tabela em anexo em formato de gráfico.

Figura 64 – Vazão no Turbogenerador, na extração e destinada a pré aquecimento de água (Ton/h) X Consumo da madeira (ton/h).



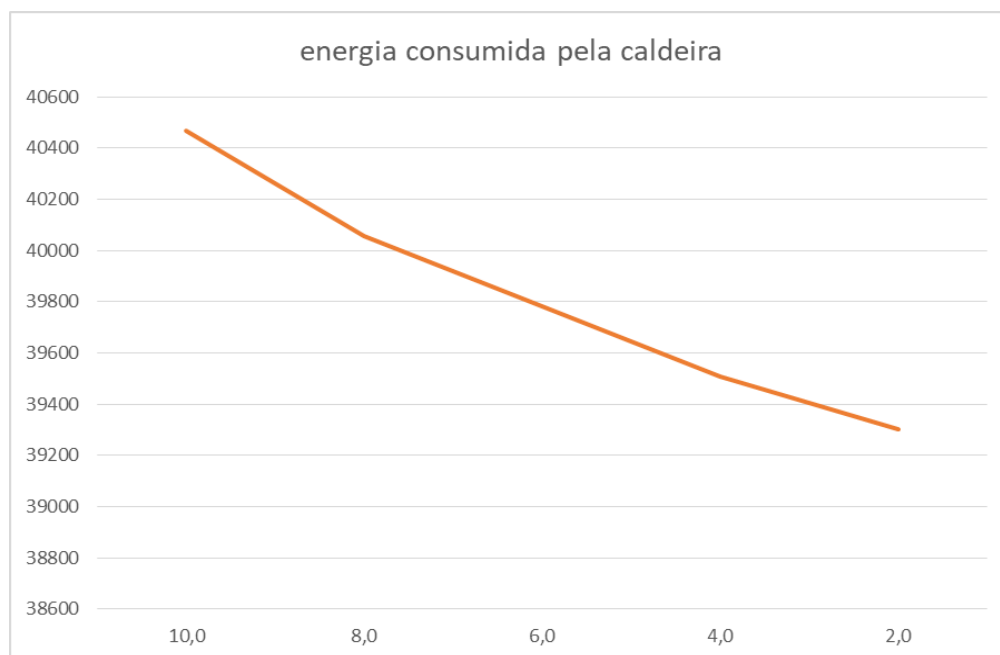
Fonte: Autor, 2017.

Figura 65 – Vazão nos aero condensadores (ton/h) e Rácio (Bdmt/MWh) X Consumo da madeira (Ton/h).



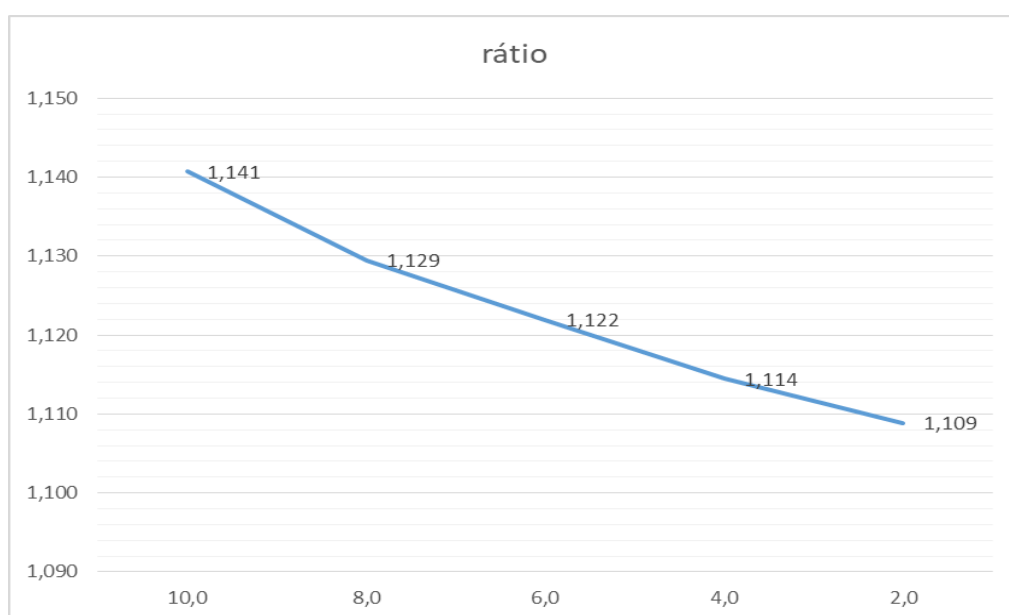
Fonte: Autor, 2017.

Figura 66 – Energia Consumida pela Caldeira em Mcal/h X Consumo madeira (Ton/h).



Fonte: Autor, 2017.

Figura 67 – Rácio (Bdmt/MWh) X Consumo madeira (Ton/h).



Fonte: Autor, 2017

## **5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Foram determinadas as vazões mássicas na entrada, saída e extração da turbina, assim como também o consumo de combustível da caldeira para cada vazão mássica de consumo da madeireira URUFOR. Foi observada uma redução na relação entre combustível consumido por energia elétrica entregue à medida que se reduz a vazão de vapor vendido à madeireira. Também foi notado que o aumento de energia elétrica consumida pelos aerocondensadores é pequeno perto da redução de energia consumida pela caldeira. Portanto, quanto menos energia vendida na forma de vapor, melhor é relação combustível queimado por energia elétrica vendida do sistema de cogeração apresentado.

Com o conhecimento dos valores de vazão mássica de vapor e consumo de combustível obtidos na tabela em anexo, podem ser desenvolvidos estudos para futuras renegociações a respeito de preço de despacho de energia elétrica e vapor para cada vazão de vapor vendido.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). Atlas da Energia Elétrica no Brasil. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica. 2010. Disponível em: [www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas\\_par2\\_cap4.pdf](http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap4.pdf). Acesso em 10/09/2017.

[2] SERF, Disponível em: [www.serf.com.br](http://www.serf.com.br) (2004). Acesso em 21 de Abril de 2017.

[3] Revista da madeira, edição 129, novembro de 2011. Acesso em 15/03/2016.

[4] INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE – IEE. Universidade Federal de São Paulo. Acesso em 10/10/2017 Disponível em: <http://www.iee.usp.br/gbio/?q=livro/fontes-de-biomassa>.

[5] Focus Solar – Energia e Serviços Especializados. Acesso em: 13/09/2016. Disponível em: [focusolar.com.br](http://focusolar.com.br)

[6] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. Brasília : MME : EPE, 2007. Acesso em 3/10/2016. Disponível em: [www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_8.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_8.pdf).

[7] COPEL. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/> Acesso em 17 de Abril de 2017.

[8] Sociedade Nacional de Agricultura. Inteligência em Agronegócio (2015). Disponível em: <http://sna.agr.br/energia-limpa-setor-de-biomassa-ganha-forca-no-pais/>. Acesso em 5 de março de 2017.

[9] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica(2016). Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=2](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=2). Acesso em 29 de Maio de 2016.

[10] Usina Santa Cruz. Disponível em: <http://usinasantacruz.com.br/contents.asp?pid=6&lang=pt>. Acesso em: 2 de Agosto de 2016.

[12] Departamento de Engenharia Naval e Oceânica - UFRJ. Disponível em: [www.oceanica.ufrj.br](http://www.oceanica.ufrj.br), Acesso em 6 de Setembro de 2016.

[13] (6th ed.) Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (1998). Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Acesso em: 14 de janeiro de 2017.

[14] PIRES, Eduardo et al. ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA PARA INSTALAÇÃO DE UM TERMOGERADOR EM QUEIMADOR DE GASES DE ESTUFAR, 2013.

[15] Notas de Aula de Co-geração do Curso de Engenharia de Equipamentos. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc\\_PDF/Apostila\\_Cogeracao\\_Otima.pdf](http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2016  
[www.professores.uff.br/dulcemar/Doc\\_PDF/Apostila\\_Cogeracao\\_Otima.pdf](http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf)

[16] NEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética (2007). Geração Distribuída e Co-geração, 2007 Disponível em: [http://www.inee.org.br/forum\\_co\\_geracao.asp?Cat=forum](http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp?Cat=forum)  
Acesso em 3 de julho de 2017.

[17] Turbina A Vapor. Disponível em : <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAA0RMAG/turbina-a-vapor?part=2> Acesso em 13 de Junho de 2016.

[18] Garrido, GARCÍA Santigado. Director Técnico de RENOVETEC. manual del curso CICLO AGUA-VAPOR EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS, publicado por RENOVETEC. Disponível em: <http://www.cicloaguavapor.com/condensador>. Acesso em 5 de Outubro de 2016.

[19] EQUIREPSA, Tecnologia de vacío-Vacuum Systems. Disponível em: [www.equirepsa.com/productos/intercambiadores-de-calor/aerocondensadores](http://www.equirepsa.com/productos/intercambiadores-de-calor/aerocondensadores). Acesso em 12 de Maio de 2017.

[20] TFatec Piracicaba. Disponível em: [www.fatecpiracicaba.edu.br/TG\\_2011\\_1/TG\\_2011\\_1\\_12.pdf](http://www.fatecpiracicaba.edu.br/TG_2011_1/TG_2011_1_12.pdf). Acesso 28 de Fevereiro de 2017.

[21] GERAÇÃO A VAPOR, Disponível em: [www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/gera\\_vapor.php](http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/gera_vapor.php). Acesso em 4 de Setembro de 2016.

[22] MFRural, Biomassa Lenha e Cavaco, Paraná e São Paulo (2014). Disponível em: <http://www.mfrural.com.br/detalhe/biomassa-lenha-e-cavaco-de-madeira-parana-e-sao-paulo-120052.aspx>. Acesso em 17 de Setembro de 2017.

# COGERAÇÃO À BIOMASSA: BALANÇO PARA DIFERENTES VAZÕES DE VAPOR

Romeo Fialho Esteves\*

## RESUMO

*O trabalho apresenta de forma sucinta o funcionamento da usina termelétrica Bioener, localizada no município de Rivera, Uruguai. A usina opera com ciclo Rankine de cogeração, onde produz vapor para a madeireira URUFOR localizada ao lado da usina e eletricidade para a Administración Nacional de Usinas y Transmisiones Eléctricas (UTE). O objeto de estudo foi a simulação de balanços energéticos variando o fluxo mássico de vapor gerado para verificar qual potência de vapor apresenta melhor relação ENERGIA VENDIDA/ COMBUSTÍVEL UTILIZADO. Possivelmente exista influência do uso dos aros condensadores, no consumo elétrico interno da planta, alterando assim a energia final líquida entregue pela empresa para a UTE. Para isso foram analisadas as propriedades do fluido e do combustível em diferentes equipamentos e máquinas presentes no ciclo do vapor e no ciclo da biomassa na tentativa de incluir o máximo possível de pontos da usina no balanço.*

*Palavras chave: Cogeração, biomassa, balanço de energia.*

## 1 INTRODUÇÃO

Dentre os meios de geração de energia elétrica, existem as termelétricas, isto é, usinas que operam com um fluido de trabalho num ciclo termodinâmico. Esse método de geração de energia elétrica é baseado na geração de calor liberada por uma fonte calorífica, a conversão do mesmo em energia mecânica de fluido e no acionamento de uma turbina à vapor acoplada a um gerador elétrico. As centrais que utilizam unidades motoras a vapor têm seu princípio de funcionamento com base no ciclo Rankine. Existem diferentes tipos de plantas de geração termelétrica. Alguns exemplos são as usinas a carvão, nucleares ou à biomassa.

## 1.1 DESCRIÇÃO DO TRABALHO

Na usina, a energia elétrica gerada é vendida para a rede de distribuição nacional (descontando o consumo interno) e o vapor é vendido para terceiros (também descontando o consumo interno). Este estudo é um balanço de energia envolvendo alguns equipamentos da planta, o combustível, a influência da variação de vapor gerado no consumo de combustível e a influência dos condensadores na energia elétrica líquida entregue pela usina.

A planta possui duas caldeiras e uma turbina. A caldeira principal opera a 1100°C e gera cerca de cinquenta e seis toneladas de vapor por hora, a 525°C e 65 bar quando a planta encontra-se na potência contratada. Da caldeira, o fluido é direcionado nessas condições à turbina. A turbina apresenta uma extração de cerca de 20 toneladas de vapor por hora e ocorre num ponto da máquina em que o fluido encontra-se a 5 bar e 140°C. Esta extração da turbina é devido ao contrato de vapor com a madeireira. No escapamento final da turbina, o vapor encontra-se a aproximadamente 100°C, 1.3 bar e a uma vazão de cerca de trinta e seis toneladas de vapor por hora. A outra caldeira é de baixa potência e tem a função de suprir a demanda de vapor contratada pela madeireira em caso de falta da principal. Portanto, normalmente encontra-se parada.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O Ministério de Minas e Energia – BEM apontava, em 2004, que as energias renováveis ocupavam um valor percentual de 14% da energia produzida no mundo sendo 70% disso representado pela geração através de biomassa. Em 2015, segundo a Agência Internacional de Energia (AIE) esse valor subiu para 18% e a perspectiva é que em 2040 a porcentagem de energia gerada a partir de fontes renováveis alcance os 25%. Segundo a ANEEL, a capacidade de geração de energia instalada com biomassa apresentou crescimento de 196% de 2008 para 2015, crescendo menos percentualmente apenas que a eólica. Em suma, o ciclo Rankine de cogeração ocupa um lugar de extrema importância na utilização dessa fonte, uma vez que apresenta geração elétrica e térmica, que pode ajudar no tratamento do próprio combustível ou ser direcionado para fins industriais.



### 1.3 METODOLOGIA

O trabalho será realizado com dados de cogeração da usina Bioener. Como parte da metodologia do trabalho, deve ser considerado o estágio realizado pelo aluno onde foi possível conhecer a planta e entender o funcionamento. Logo, serão realizados balanços de energia para diferentes consumos de vapor da Madeireira URUFOR (cliente de vapor da Bioener), supondo a planta operando na potência elétrica de contrato. Os balanços serão elaborados em tabelas em excel. Será utilizado o aplicativo TLV toolbox como tabela termodinâmica para determinação teórica de propriedades do fluido de trabalho em diferentes equipamentos. O aluno terá acesso aos manuais da caldeira e da turbina e também à curva de vapor por potência do turbo gerador. Será utilizado o software MatLab para a determinação do poder calorífico da mistura combustível, que conta com biomassa de duas origens diferentes. Também no MatLab serão elaborados alguns gráficos que apresentem o fluxo de vapor em alguns equipamentos do circuito do fluido de trabalho para diferentes consumos de vapor na cogeração.

### 1.4 OBJETIVO

Existe um aumento do consumo elétrico interno da planta quando aumenta-se a potência dos ventiladores dos aero condensadores. Isso ocorre devido à redução do consumo de vapor pela madeireira URUFOR, pois quanto menos vapor for desviado para o setor de secagem de madeira na URUFOR, maior será a quantidade de fluido a ser condensado na planta. Por outro lado, quando opera-se com um consumo menor de vapor na cogeração, é necessário queimar menos combustível. Portanto, existe mais de uma variável no balanço de energia a ser estudado na planta.

O trabalho pretende apresentar em tabelas e gráficos, o balanço energético para algumas situações, o rácio correspondente e um comparativo entre as situações. O objetivo é verificar o quanto influencia o aumento do consumo dos aero condensadores e a redução de queima de combustível no balanço de energia da planta.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 GERAÇÃO TERMELÉTRICA

No ciclo simples a queima de um determinado combustível em caldeiras simples, turbinas ou em motores, fornece a energia mecânica para o gerador de energia elétrica. No ciclo combinado a queima do combustível fornece energia mecânica para o gerador de energia elétrica, e os gases da queima do combustível são direcionados a uma caldeira de recuperação de calor para produzirem vapor, e este vapor irá movimentar uma turbina a vapor que estará ligada a outro gerador de energia. O ciclo de cogeração é semelhante ao ciclo de sistema combinado, no qual o vapor produzido na caldeira de recuperação de calor será também utilizado no processo industrial de papel, bebida, alimentos, etc. [1]

### 2.2 BIOMASSA PARA GERAÇÃO ENERGIA

Biomassa é qualquer matéria orgânica, de origem não fóssil, que possa ser transformada, de alguma forma, em energia térmica, mecânica ou elétrica. É classificada de acordo com a sua origem, pode ser: florestal, agrícola e rejeitos urbanos e industriais sólidos ou líquidos, como o lixo ou resíduos. [2]

### 2.3 GERAÇÃO ENERGÉTICA À BIOMASSA NO BRASIL

De acordo com a Sociedade Nacional de Agricultura, em Abril de 2015, o Brasil atingia 12,4 GW de potência instalada a partir de biomassa, representando segundo o Ministério de Minas e Energia (MME) a terceira fonte mais importante na matriz nacional. [8]. Hoje a potência instalada já ultrapassa 14GW e conta com 535 usinas (Banco de Informação de Geração – ANEEL, 2017).

### 2.4 REAPROVEITAMENTO TÉRMICO E CICLO COM COGERAÇÃO

#### 2.4.1 CICLO COM REAQUECIMENTO

O vapor que escoa por uma turbina tem que estar em estado de vapor superaquecido. O reaquecimento é a elevação da sua temperatura para a temperatura de superaquecido na pressão que ele se encontra. Para isso, o vapor é desviado e canalizado de volta à caldeira, reaquecido e retornado para a turbina ao

próximo andar. Cada novo aquecimento ocorre a uma nova pressão (sempre menor que a anterior). Quanto mais estágios de aquecimento houver, melhor será o desempenho da máquina, pois este processo aumenta muito o rendimento de uma turbina. [4]

#### 2.4.2 CICLO REGENERATIVO

O ciclo de Rankine regenerativo recebe este nome por o fluido de trabalho ser aquecido após passar pelo condensador. Parte do calor do fluido que passa pela turbina é transferido para o fluido que está por retornar ao ciclo. Isso aumenta a temperatura média do fluido no ciclo o que eleva a eficiência do mesmo.

#### 2.4.3 CICLO COM COGERAÇÃO

A cogeração é entendida como a geração combinada e simultânea, de energia térmica e energia mecânica ou elétrica, a partir de uma mesma fonte energética. A vantagem principal é o maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção da energia nas duas formas citadas. [4]

A cogeração apresenta alguns aspectos que atraem empresas para esta alternativa. Primeiramente quanto à redução de custos operacionais. Muitas vezes a participação do custo energético no custo do final de produção pode ser elevado. Qualquer possibilidade de otimizar a eficiência no aproveitamento energético é atraente. [4]

#### 2.4 CONDENSADORES NO CICLO RANKINE

Um dos quatro principais equipamentos do ciclo Rankine é o condensador. Se enumerarmos os quatro processos característicos do ciclo, iniciando pelo bombeamento isentrópico da bomba para a caldeira, o condensador encontra-se presente no último, o qual refere-se à rejeição de calor à pressão constante. Essa troca de calor isobárica é fundamental para o fechamento do ciclo do fluido de trabalho. Nesse processo a água muda de estado físico de gasoso para líquido. [5]

## 2.4.1 AERO CONDENSADORES

Este tipo de condensadores se torna vantajoso nas plantas que apresentam limitações na disponibilidade de água de refrigeração. Este equipamento não precisa de um circuito de recuperação de água, o que acarretaria na necessidade de: bombas, torres de refrigeração, tratamento de água, entre outros.

## 2.5 BALANÇO ENERGÉTICO E RENDIMENTO

### 2.5.1 BALANÇO ENERGÉTICO

Segundo Silveira Neto *et al.*, 2010, o balanço energético de um sistema é o estudo dos fluxos e conversões energéticas do mesmo. Esse balanço tem como base teórica a primeira lei da termodinâmica que explica que a energia não pode ser criada nem destruída. Num balanço encontram-se entradas e saídas, nas quais existem conversões e perdas inversamente proporcionais à eficiência de cada transformação.

De acordo com LORA & Nascimento (2004), o vapor de água, como transportador de energia, traz significativas vantagens, que explicam sua disseminação. A água é um recurso de grande disponibilidade, de pouca agressão química e com grande capacidade de transportar energia.

### 2.5.2 RENDIMENTO

É importante conhecer os detalhamentos de todas as conversões para poder analisar o rendimento total da planta. O cálculo de rendimento total é definido pela razão da energia na saída pela energia na entrada, de acordo com a equação 1 abaixo:

$$\eta = E_s/E_e \quad [1]$$

A energia de saída é menor que a de entrada, pela existência das perdas nos equipamentos e processos de conversões energéticas. São exemplos as perdas do combustível, que ocorrem no processo de armazenagem e tratamento, as

perdas mecânicas nas bombas, caldeira e turbina, assim como também por atrito, ventilação, barulho, entre outros nos demais equipamentos. Por último, existe a perda no gerador elétrico devido ao seu rendimento não unitário.

### 3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 COMBUSTÍVEL UTILIZADO

A matéria utilizada como combustível na usina é do tipo resíduo madeireiro. A grande parte da biomassa consumida pela planta é oriunda da madeireira URUFOR, localizada ao lado da usina. Porém, existem outras madeireiras que vendem o combustível para a Bioener. Foi desenvolvido no software MatLab, um simples código para a determinação do poder calorífico da mistura final da biomassa que entra no sistema de geração a partir de proporção de mistura de eucaliptos por pinheiros. O programa também determina, em quilogramas, o consumo de ar, a produção de água resultante e a liberação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da mistura. O código foi desenvolvido com base na determinação experimental do poder calorífico da biomassa comprada tipo Eucalipto como sendo quatro mil duzentos e quarenta e oito quilocalorias por quilo grama (4.248 Kcal/Kg) e do tipo Pinus como quatro mil quinhentos e oitenta e dois quilocalorias por quilograma (4.582 Kcal/Kg). O consumo de ar seco, a produção de água e a liberação de CO<sub>2</sub> oriundos de cada tipo de madeira foram fornecidos pela empresa ao aluno. Esses valores foram utilizados no código e podem ser observados abaixo, junto com o mesmo nas Figuras 45 e 46.

Figura 1 - Código combustível parte 1

```
1 - PCeucaliptus = 4248
2 - PCpino = 4582
3
4 - proporcao = input('informe proporção eucaliptus por pino:');
5
6
7 - if (proporcao < 1)
8 -     PCmezcla = ((1/proporcao)*PCpino+PCeucaliptus)/(1+1/proporcao)
9 - else
10 -     PCmezcla = (proporcao*PCeucaliptus+PCpino)/(1+proporcao)
11 - end
12
13 %consumo de aire en kg;
14
15 - consumoairepinoseco = 6.261;
16 - consumoaireeucaliptuseco = 6.069;
17
18 %produccion de agua en kg;
19
20 - produceaguapinoseco = 0.648;
21 - produceaguaeucaliptuseco = 0.630;
22
23 %liberacion CO2 en kg;
24
25 - liberaCO2pinoseco = 1.815;
26 - liberaCO2eucaliptuseco = 1.793;
27
```

Fonte: Autor, 2017.

Figura 2 - Código combustível parte 2

```
28 - if (proporcao < 1)
29
30 - CONSUMOdeAIREmezcla = ((1/proporcao)*consumoairepinoseco+consumoaireeucaliptuseco)/(1+1/proporcao)
31
32 - PRODUCEdeAGUamezcla = ((1/proporcao)*produceaguapinoseco+produceaguaeucaliptuseco)/(1+1/proporcao)
33
34 - LIBERAdedeCO2mezcla = ((1/proporcao)*liberaCO2pinoseco+liberaCO2eucaliptuseco)/(1+1/proporcao)
35
36 - else
37
38 - CONSUMOdeAIREmezcla = (proporcao*consumoaireeucaliptuseco+consumoairepinoseco)/(1+proporcao)
39
40 - PRODUCEdeAGUamezcla = (proporcao*produceaguaeucaliptuseco+produceaguapinoseco)/(1+proporcao)
41
42 - LIBERAdedeCO2mezcla = (proporcao*liberaCO2eucaliptuseco+liberaCO2pinoseco)/(1+proporcao)
43
44 - end
45
```

Fonte: Autor, 2017.

Para a realização do balanço energético simplificado da planta foi utilizada a relação de eucaliptos por pinus com que a usina estava trabalhando em fevereiro de 2017. A relação de eucaliptos por pinus era igual a 2. Utilizando o programa, o poder calorífico, o consumo de ar, a liberação de água e de CO<sub>2</sub> da mistura obtida foram de:

Poder calorífico: 4.359,3 Kcal/Kg.

Consumo de ar: 6,133 Kg.

Produção de água: 0,636 Kg

Liberação de CO<sub>2</sub>: 1,8003 Kg

#### 4 RESULTADOS

##### 4.1 BALANÇO ENERGÉTICO PARA POTÊNCIA NOMINAL DE VAPOR E ELETRICIDADE

Foi elaborado junto ao engenheiro mecânico da usina tabelas que apresentam as conversões energéticas, acompanhados de vazões, poder calorífico e outras propriedades de todos os equipamentos envolvidos no pré-aquecimento de ar, no pré-aquecimento de água e na queima do combustível. A tabela apresenta o balanço energético da planta envolvendo os itens mencionados para a usina operando na potência elétrica nominal e a madeira consumindo a demanda contratada (10 toneladas de vapor por hora). A tabela por ser observada nas Figuras abaixo.

Figura 3 - Balanço energético da planta a 9MW com extração de 20 ton/h

Cálculo de ratio BDMT / MWH			
<b>Contrato Urufor 10</b>			
	<b>Potência e consumos da turbina</b>	<b>Unidade</b>	
10	Potencia nos bornes	Mw	10,3
11	Consumo interno	Mw	1,3
12	Potencia entregada a UTE	Mw	9,0
	<b>Producción de vapor para turbogerador</b>		
15	Consumo do turbogenerador	ton/h	55,3
16	Temperatura vapor	°C	520
17	Entalpia vapor superaquecido	kcal/kg	827
18	Entalpia agua de alimentação	kcal/kg	141
19	Energía para produzir vapor p/ turbogerador	Mcal/kg	37977
	<b>Consumo de vapor a 4,5 bar</b>		
22	Pre-aquecimento de ar	ton/h	4,746
23	Pre-aquecimento de ar	ton/h	6,20
24	Consumo de Urufor	ton/h	10,0
25	Injeção ao secador	ton/h	0,0
26	Consumo total de vapor a 4,5 bar	ton/h	20,9

Fonte: Autor, 2017.



Figura 4 - Balanço energético da planta a 9MW com extração de 20 ton/h

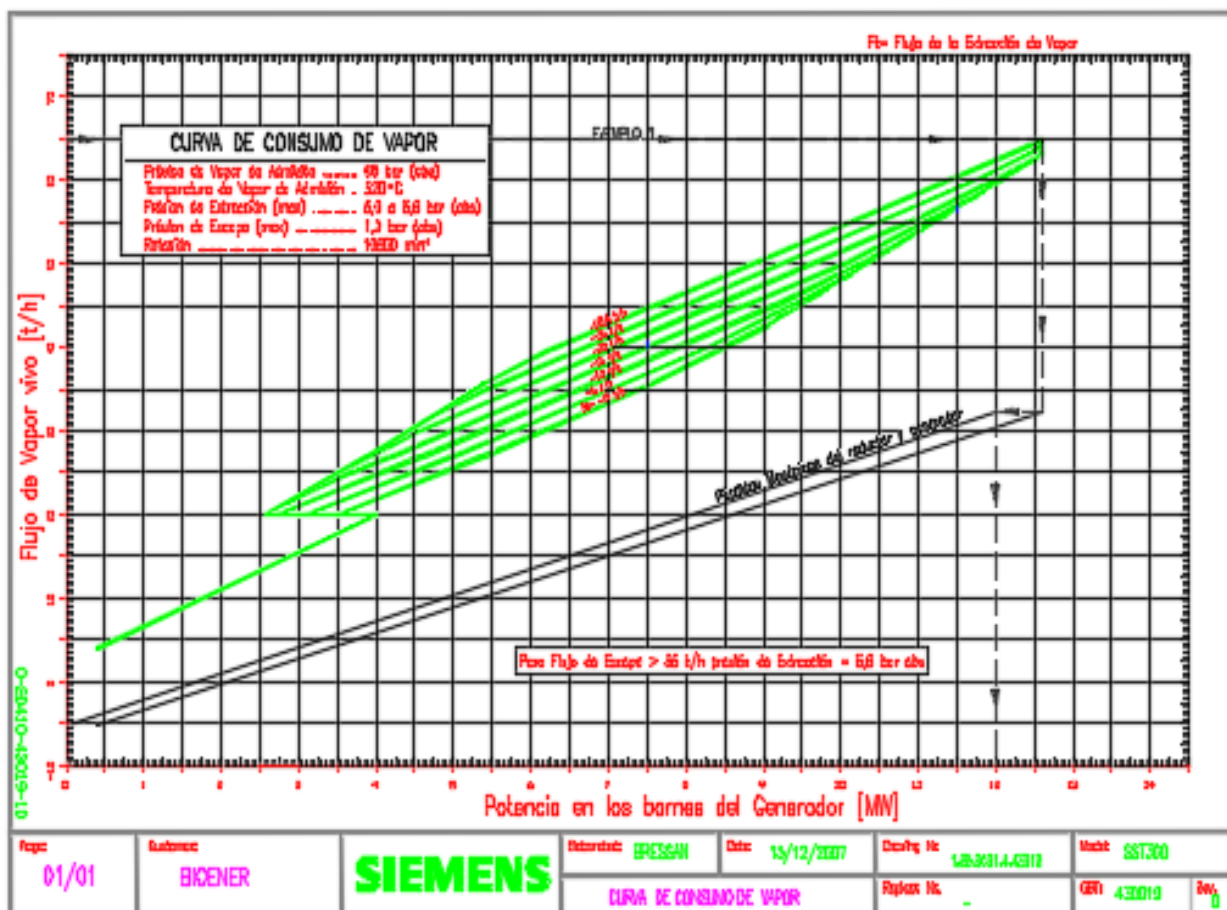
23	Pre-aquecimento de ar	ton/h	6,20
24	Consumo de Urufor	ton/h	10,0
25	Injeção ao secador	ton/h	0,0
26	Consumo total de vapor a 4,5 bar	ton/h	20,9
27			
28	<b>Origem de vapor a 4,5 bar</b>		
29	Extração	ton/h	20,9
30	Desvio	ton/h	0,0
31			
32	<b>Vapor de escapamento</b>		
33	Escapamento para secador e aerocondens.	ton/h	34,4
34	Consumo secador	ton/h	20,0
35	Vapor a aerocondensador	ton/h	14,4
36	Consumo total de vapor a 0,3 bar	ton/h	34,4
37			
38	<b>Produção de vapor para serviços auxiliares</b>		
39	Purga (50%)	ton/h	2,80
40	Energia purga	Mcal/h	833,83
41	Injeção aos gaseificadores	ton/h	0,50
42	Energia da injeção aos gaseificadores	Mcal/h	331,77
43	sopradors	ton/h	2,00
44	Energia sopradors	Mcal/h	1327,09
45	Energia total servicios auxiliares	Mcal/h	2492,70
46			
47	<b>Balanço de energia</b>		
48	Energia total consumida pela caldeira	Mcal/h	40470
49	Energia injetada pelo ar quente	Mcal/h	2377
50	Energia retirada por fumaça	Mcal/h	3760
51	Energia aportada por la biomasa	Mcal/h	41853
52			
53			
54			
55	<b>Combustível</b>		
56	PCI combustível seco	kcal/kg	4360
57	Umidade	%	25
58	Poder calorífico	kcal/h	3120
59			
60	<b>Perdas na caldeira</b>		
61	Perdas por CO	%	0
62	Perdas por irradiação	%	1,4
63	Perdas por cinzas	%	0,6
64	Perdas totais de combustível Caldeira	%	2,0
65			
66	<b>Consumo de combustível</b>		
67	Consumo de combustível húmedo	ton/h	13,69
68	Consumo de combustible seco	bdmt/h	10,27
69			
70	<b>Relação Ratio</b>		
71	Ratio teórico	bdmt/Mwh	1,141
72			
73			
74			
80			

Fonte: Autor, 2017.

## 4.2 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR NA TURBINA PARA UM NOVO CONSUMO DA MADEIREIRA

Nada garante que o fluxo na turbina seja constante para qualquer consumo da URUFOR, ou seja, que a quantidade reduzida num fluxo resulte no acréscimo dos demais. O consumo teórico de vapor da turbina é determinado por uma curva que apresenta o consumo em toneladas de vapor por hora (no eixo vertical) em relação à potência elétrica gerada (no eixo horizontal). A curva foi passada para “cad” a fim de possibilitar um uso com maior precisão e pode ser observada na Figura abaixo.

Figura 5 - Curva de vazão por potência do Turbo gerador



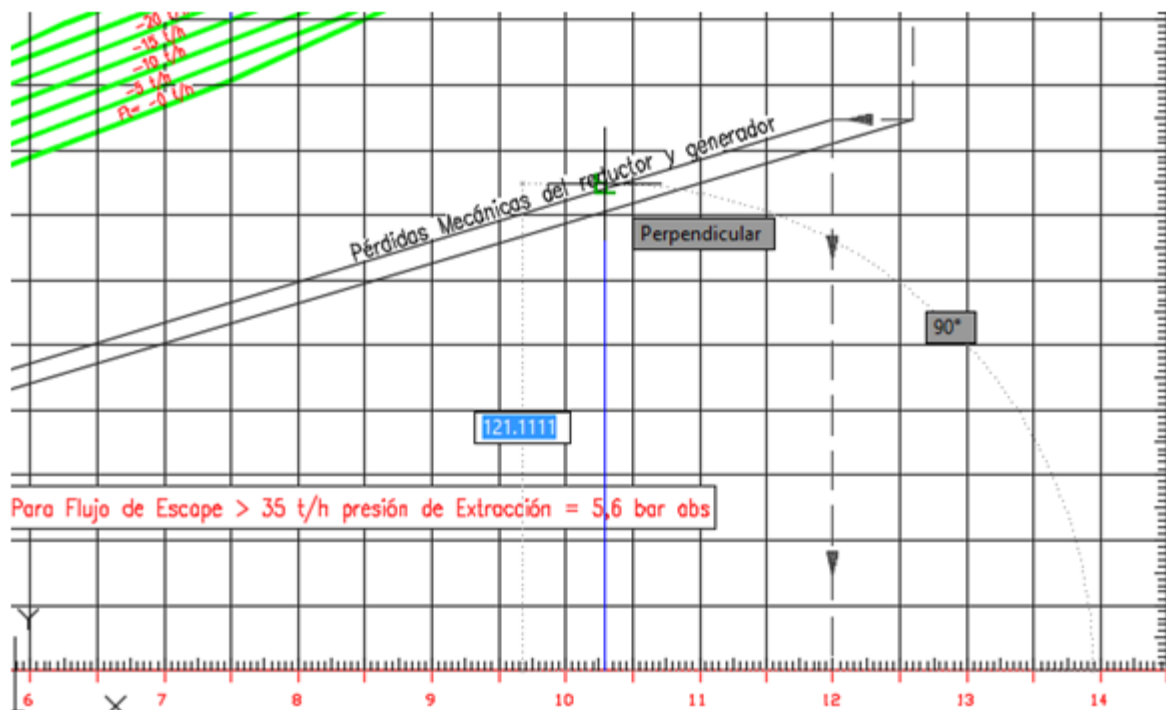
Fonte: Curva do Turbo Gerador, BIOENER, versão AutoCad. Acesso em 2017.

Para a realização de um novo balanço, foi escolhido um consumo de oito toneladas de vapor por hora (8 ton/h) a que diz respeito ao fluxo direcionado a

secagem de madeira da URUFOR. A justificativa é que existem a ocorrências momentâneas dessas situações.

Após definir o novo consumo da madeira, foi informado esse valor na linha 24 da aba "Rácio" da tabela. Isso modifica a vazão total da extração da turbina na linha 26 que representa o total de vapor a 4,5 bar. A linha 29 trata da mesma vazão da linha 26, apenas modificando o nome para vazão de extração. O próximo passo foi abrir a curva de potência do turbo gerador (Figura 51), e localizar, no eixo horizontal, a potência de geração. Sabe-se, experimentalmente, que entregando 9 MW, a planta consome aproximadamente 1,3 MW, logo a potência total gerada deve ser 10,3 MW. Encontrando este valor no eixo horizontal, foi traçada uma reta até a curva cinza do gráfico, onde foi realizado um desvio que representa o rendimento. O desvio pode ser visto observando o traço azul na Figura 52 abaixo, que percorre exatamente o que deve ser feito. Após o desvio, o traço prossegue no sentido vertical até atingir a curva verde correspondente à extração da turbina.

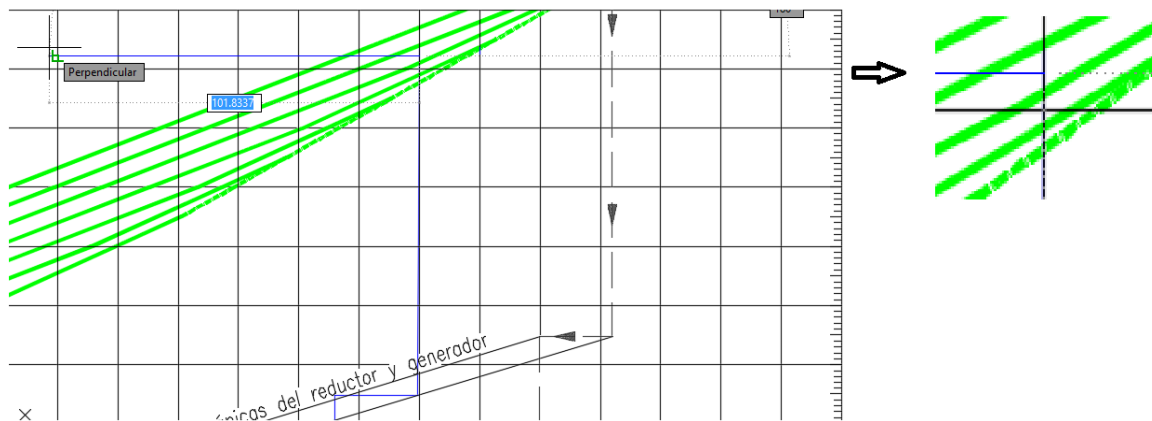
Figura 6 - Traço até o desvio considerando o rendimento



Fonte: Autor, 2017.

Procurou-se então, a extração da turbina correspondente à situação em questão. Pode ocorrer da extração resultante da linha 29 na tabela do excel não apresentar uma curva correspondente no gráfico. Nesses casos, deve ser realizada uma interpolação entre a curva superior e a inferior. Essa interpolação pode ser observada na Figura 53, abaixo.

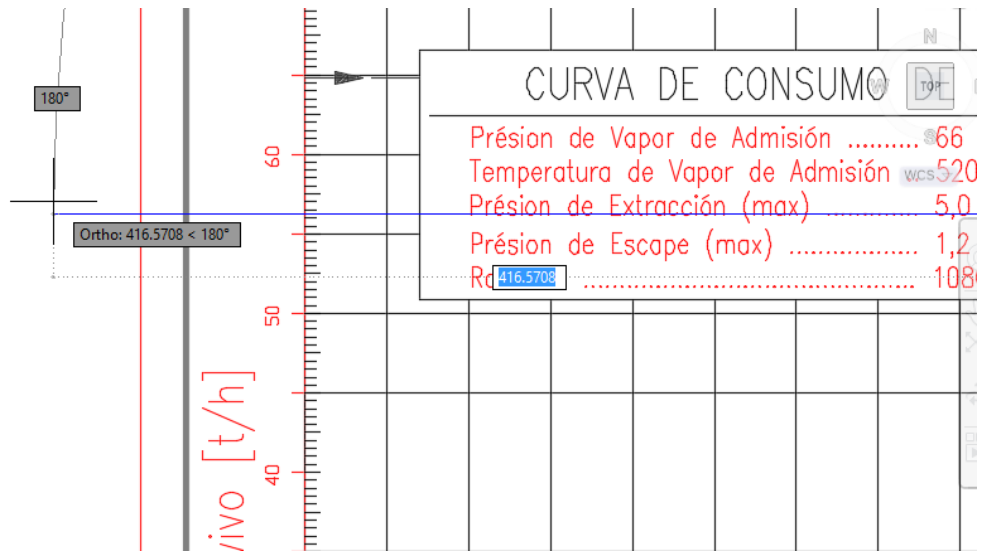
Figura 7 - Interpolação entre curvas de vazões da extração



Fonte: Autor, 2017.

Com isso, foi traçada uma reta na direção horizontal atingindo o eixo vertical e verificou-se o consumo mássico de vapor total do turbo gerador, como pode ser visto na figura 54.

Figura 8 - Determinação do consumo total do turbo gerador



Fonte: Autor, 2017.

O novo consumo total de vapor no turbo gerador resulta na nova energia para produzir vapor para o turbo gerador (linha 19), que é dada em mega calorías por quilograma (Mcal/Kg). Isso não alterou o consumo de vapor destinado a pré-aquecimento de ar, uma vez que esse fluxo é a razão entre energia aportada por aquecimento de ar de 20°C a 140°C (linha 21 da tabela, aba de pré-aquecimento) pela variação de entalpia do vapor condensado (linha 24 da tabela, aba de pré-aquecimento) e esses dados permanecem constantes. Porém ocorreu uma redução do fluxo destinado a pré-aquecimento de água que depende da energia consumida para aquecer água (linha 42 da tabela, aba de pré-aquecimento).

Figura 9 - Variação no pré-aquecimento de ar e água

5				
6				
7	<b>Energía calentamiento de aire secundario</b>			
8				
9	Energía entregada a UTE	MWH	3,2	9,0
10	Ratio	%	1,50	1,15
11	Consumo de biomassa	BDMT/h	4,8	10,4
12	Ar estiquiométrico	Kg/h	29438,4	63476,6
13	Excesso de ar CT 1	%	20,0	20,0
14	Excesso de ar CT 2	%	40,0	40,0
15	% CT 1 na relação total de energia	%	50,0	50,0
16	<b>Ar total</b>	<b>kg/h</b>	<b>38269,9</b>	<b>82519,5</b>
17	Excesso global	%	30,0	30,0
18	Oiigênio aprox	%	4,8	4,8
19	Calor específico do ar	kcal/kg °C	0,24	0,24
20	Variação da temperatura do ar	°C	120	120
21	Energía aportada por caquecimento do ar de 20 a 140°C	Mcal/h	1102	2377
22	Entapia do vapor a 4,5 bar	kcal/kg	657,5	657,5
23	Entalpia do condensado a 4,5 bar	kcal/kg	140,8	156,8
24	Variação de entalpia do vapor a condensado	kcal/kg	516,8	500,8
25	Consumo de vapor	kg/h	2,1	=L21/L24
26				
27	<b>Energía aquecimento de água alimentação caldeira</b>			
28				
29	Entapia de vapor a 4,5 bar	kcal/kg	657,5	657,5
30	Entalpia de agua a 2,6 bar	kcal/kg	140,8	140,8
31	Entalpia de condensado de aquecimento de ar	kcal/kg	140,8	156,8
32	Entalpia de condensado	kcal/kg	90,0	90,0
33	Entalpia de agua de reposição	kcal/kg	20,0	20,0
34				
35	Consumo de água para vapor da turbina	ton/h	26,0	54,7
36	Consumo de agua em serviços auxiliares da caldeira	ton/h	5,3	5,3
37	Consumo total de água em tanque de alimentação	ton/h	31,3	60,0
38	Consumo de água 20°C	ton/h	5,3	5,3
39	Consumo de condensado de aquecimento de ar	ton/h	2,13	4,75
40	Consumo de condensado 90°C en tque de água	ton/h	23,9	50,0
41				
42	Energía consumida para aquecer água	Mcal/h	1851,4	3175,4
43	Consumo de vapor a 4,5 bar para aquecimento tque de alimentação	ton/h	3,6	(L29-L30)
44				
45				
46				
47				

Fonte: Autor, 2017.

Na aba “Rácio”, o consumo para pré-aquecimento de ar e de água encontram-se respectivamente nas linhas 22 e 23. Dando continuidade ao novo balanço, entre

as linhas 33 e 36 da aba “Rácio” estão apresentados os fluxos do escapamento da turbina, isto é, que não foram desviados pela extração. O consumo do secador de biomassa da planta foi mantido constante a 20 toneladas por hora. Nota-se uma alteração na linha 35 (Vapor para aero condensadores) e na linha 36 (Vapor total a 0,3 bar).

Figura 10 - Fluxos no escapamento da turbina

	Vapor de escapamento			
32				
33	Escapamento para secador e aerocondensadores	ton/h	34,4	35,8
34	Consumo secador	ton/h	20,0	20,0
35	Vapor a aerocondensador	ton/h	14,4	15,8
36	Consumo total de vapor a 0,3 bar	ton/h	34,4	35,8

Fonte: Autor, 2017.

Não foram observadas alterações na produção de vapor para serviços auxiliares que estão representados da linha 39 ate alinhha 45.O próximo bloco a ser atualizado é o balanço da linha 48 ate a linha 51, onde encontra-se a energia total consumida na caldeira, a energia aportada pelo ar quente, a energia retirada na fumaça e a energia aportada pela biomassa. A redução do consumo da madeira acarretou na redução da energia consumida pela caldeira e consequentemente da energia aportada pelo combustível. A energia aportada por aquecimento de ar e a retirada pela fumaça não apresentaram variações.

Figura 11 - Balanço de energia na caldeira

	Balanço de energia			
47				
48	Energia total consumida pela caldeira	Mcal/h	40470	40058
49	Energia injetada pelo ar quente	Mcal/h	2377	2377
50	Energia retirada por fumaça	Mcal/h	3760	3760
51	Energia aportada por la biomasa	Mcal/h	41853	41441

Fonte: Autor, 2017.

As perdas na caldeira são dadas no manual em valor percentual. Esses valores foram mantidos em todas as simulações.

Figura 12 - Perdas na caldeira

60	<b>Perdas na caldeira</b>				
61	Perdas por CO	%	0	0	
62	Perdas por irradiação	%	1,4	1,4	
63	Perdas por cinzas	%	0,6	0,6	
64	Perdas totais de combustível Caldeira	%	2,0	2,0	

Fonte: Autor, 2017.

Por último foi realizada a análise de consumo de combustível.

Figura 13 - Consumo de combustível

66	<b>Consumo de combustível</b>				
67	Consumo de combustível húmedo	ton/h	13,69	13,55	
68	Consumo de combustível seco	bdmt/h	10,27	10,17	

Fonte: Autor, 2017.

Nota-se a variação de biomassa combustível para cada consumo da serraria. Após refazer o balanço, finalmente, é possível obter a nova relação de biomassa consumida por energia gerada, ou seja, o novo Rácio.

Figura 14 - Rácio

70	<b>Relação Ratio</b>				
71	Ratio teórico	bdmt/Mwh	1,141	1,129	

Fonte: Autor, 2017.

#### 4.3 DETERMINAÇÃO DO CONSUMO DE VAPOR NA TURBINA PARA DIFERENTES CONSUMOS DA MADEIREIRA

Após haver sido refeito o balanço para um consumo da madeira de 8 ton/h, foram efetuados, de maneira similar, os novos balanços para:

- 6 toneladas de vapor por hora;
- 4 toneladas de vapor por hora;



- 2 toneladas de vapor por hora;
- 1 tonelada de vapor por hora;
- 11 toneladas de vapor por hora;
- 12 toneladas de vapor por hora;

Figura 15 - Balanço para diferentes consumos de vapor da madeireira

		Contrato Urufor 10	Contrato Urufor 8	Contrato Urufor 6	Contrato Urufor 4	Contrato Urufor 2	Contrato Urufor 1	Contrato Urufor 0	Contrato Urufor 11	Contrato Urufor 12
<b>Potência e consumos da turbina</b>										
Potencia nos bornes	Mw	10,3	10,300	10,3	10,3	10,3	10,3	10,2	10,3	10,3
Consumo interno	Mw	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,3	1,44	1,3	1,3
Potencia entregada a UTE	Mw	9,0	9,00	9,0	9,0	9,0	9,0	8,8	9,0	9,0
Temperatura vapor	°C	520	520	520	520	520	520	520	520	520
Entalpia vapor superaquecido	kcal/kg	827	827	827	827	827	827	827	827	827
Entalpia agua de alimentação	kcal/kg	141	141	141	141	141	141	141	141	141
Energia para produzir vapor p/ turbogenerador	Mcal/kg	37977	37565	37290	37016	36810	36672	36604	38115	38183
<b>Consumo de vapor a 4,5 bar</b>										
Pre-aquecimento de ar	ton/h	4,746	4,746	4,746	4,746	4,746	4,746	4,619	4,746	4,746
Pre-aquecimento de ar	ton/h	6,20	6,145	6,105	6,066	6,037	6,017	6,020	6,223	6,233
Consumo de Urufor	ton/h	10,0	8,0	6,0	4,0	2,0	1,0	0,0	11,0	12,0
Injeção ao secador	ton/h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	4,2	0,0	0,0
Consumo total de vapor a 4,5 bar	ton/h	20,9	18,9	16,9	14,8	12,8	11,8	14,8	22,0	23,0

Fonte: Autor, 2017.

Figura 16 - Redução do fluxo mássico de vapor de extração e aumento do no escapamento da turbina

<b>Origem de vapor a 4,5 bar</b>										
Extração	ton/h	20,9	18,9	16,9	14,8	12,8	11,8	14,8	22,0	23,0
Desvio	ton/h	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
<b>Vapor de escapamento</b>										
Escapamento para secador e aerocondensadores	ton/h	34,4	35,8	37,4	39,1	40,8	41,6	42,7	33,5	32,6
Consumo secador	ton/h	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0	20,0
Vapor a aerocondensador	ton/h	14,4	15,8	17,4	19,1	20,8	21,6	22,7	13,5	12,6
Consumo total de vapor a 0,3 bar	ton/h	34,4	35,8	37,4	39,1	40,8	41,6	42,7	33,5	32,6

Fonte: Autor, 2017.

Figura 17 - Redução da energia consumida pela caldeira.

Balance de energía										
Energía total consumida por la caldera	Mcal/h	40470	40058	39783	39508	39302	39165	39096	40607	40676
Energía aportada por el aire caliente	Mcal/h	2377	2377	2377	2377	2377	2377	2313	2377	2377
Energía retirada por humos	Mcal/h	3760	3760	3760	3760	3760	3760	3659	3760	3760
Energía aportada por la biomasa	Mcal/h	41853	41441	41166	40891	40685	40548	40443	41990	42059
Combustible										
PCI combustível seco	kcal/kg	4360	4360	4360	4360	4360	4360	4360	4360	4360
Humedad	%	25	25	25	25	25	25	25	25	25
Poder calorífico	kcal/h	3120	3120	3120	3120	3120	3120	3120	3120	3120

Fonte: Autor, 2017.

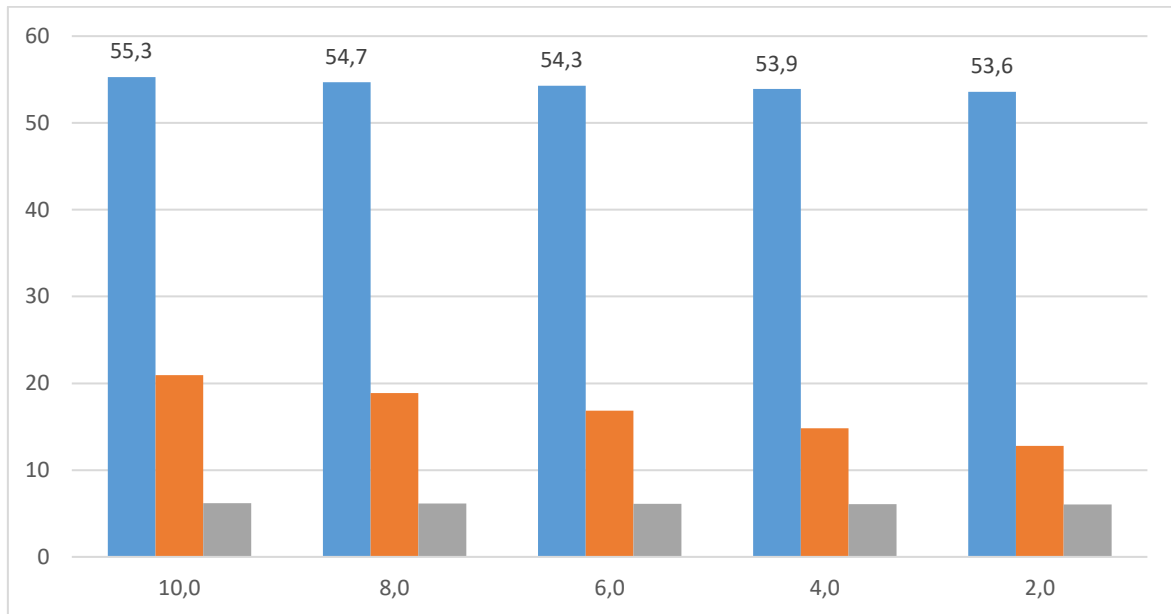
Figura 18 - Redução do consumo de combustível.

Pérdidas en caldera										
Pérdidas por CO	%	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Pérdidas por irradiación	%	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
Pérdidas por cenizas	%	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
Pérdidas totales de combustible en caldera	%	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
Consumo de combustible										
Consumo de combustível húmedo	ton/h	13,69	13,55	13,46	13,37	13,31	13,26	13,23	13,73	13,76
Consumo de combustível seco	bdmt/h	10,27	10,17	10,10	10,03	9,98	9,95	9,92	10,30	10,32
Ratio										
Ratio teórico	bdmt/Mwh	1,141	1,129	1,122	1,114	1,109	1,105	1,132	1,14	1,15

Fonte: Autor, 2017.

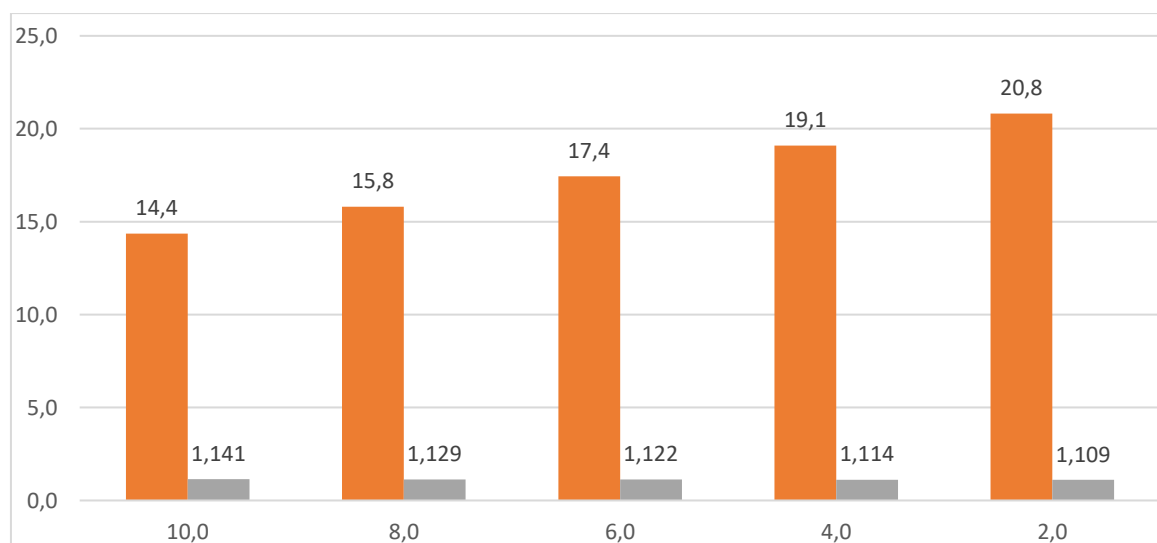
As Figuras 19,20, 21 e 22 apresentam o comportamento de algumas variáveis da tabela em anexo em formato de gráfico.

Figura 19 – Vazão no Turbogenerador, na extração e destinada a pré aquecimento de água (Ton/h) X Consumo da madeira (ton/h).



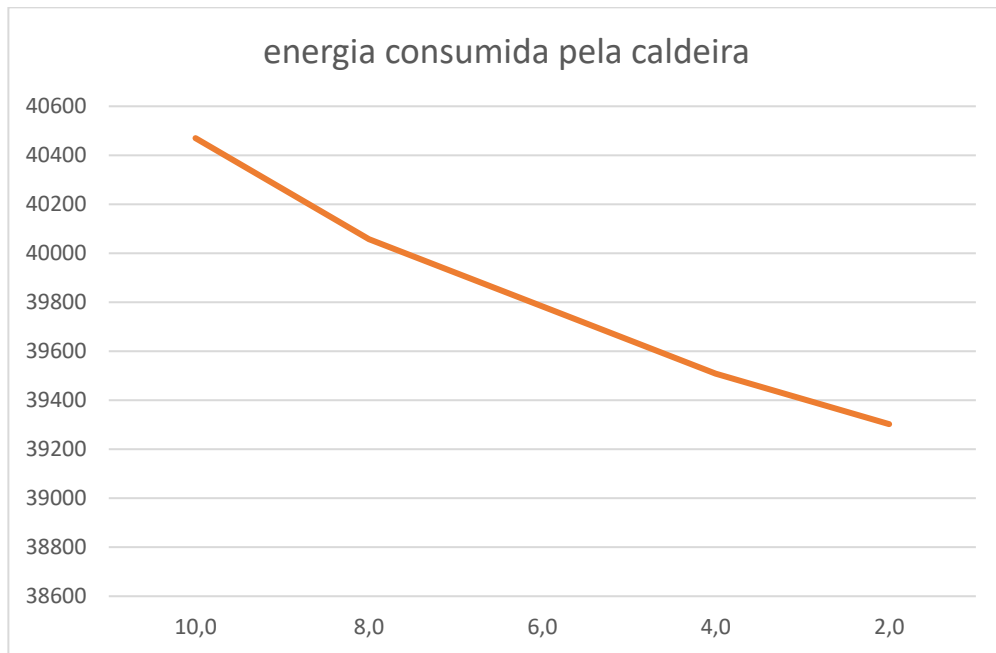
Fonte: Autor, 2017.

Figura 20 – Vazão nos aero condensadores (ton/h) e Rácio (Bdmt/MWh) X Consumo da madeira (Ton/h).



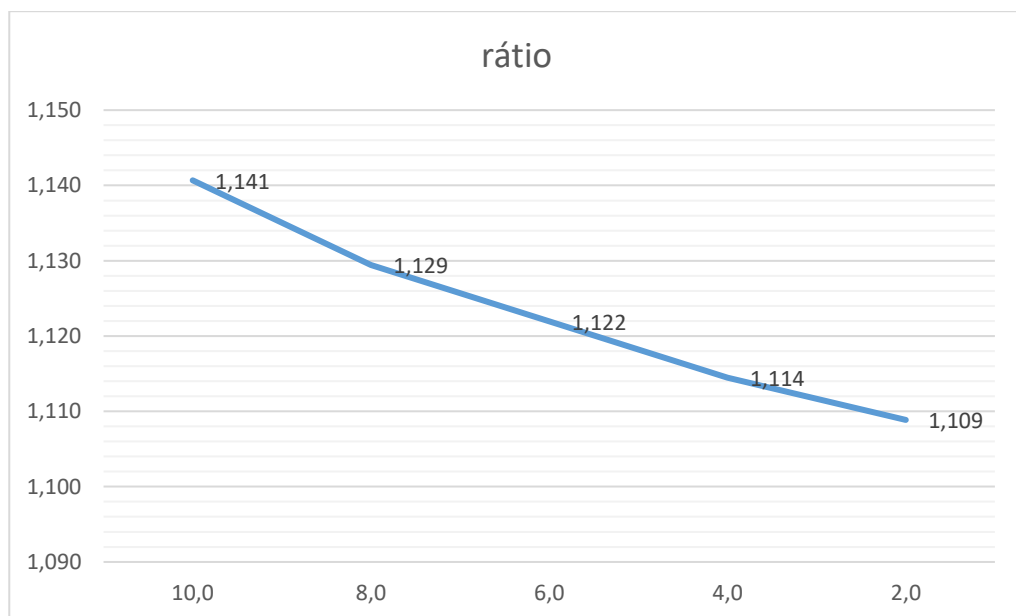
Fonte: Autor, 2017.

Figura 21 – Energia Consumida pela Caldeira em Mcal/h X Consumo madeireira (Ton/h).



Fonte: Autor, 2017.

Figura 2219 – Rácio (Bdmt/MWh) X Consumo madeireira (Ton/h).



Fonte: Autor, 2017

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Foram determinadas as vazões mássicas na entrada, saída e extração da turbina, assim como também o consumo de combustível da caldeira para cada vazão mássica de consumo da madeireira URUFOR. Foi observada uma redução na relação entre combustível consumido por energia elétrica entregue à medida que se reduz a vazão de vapor vendido à madeireira. Também foi notado que o aumento de energia elétrica consumida pelos aerocondensadores é pequeno perto da redução de energia consumida pela caldeira. Portanto, quanto menos energia vendida na forma de vapor, melhor é relação combustível queimado por energia elétrica vendida do sistema de cogeração apresentado.

Com o conhecimento dos valores de vazão mássica de vapor e consumo de combustível obtidos na tabela em anexo, podem ser desenvolvidos estudos para futuras renegociações a respeito de preço de despacho de energia elétrica e vapor para cada vazão de vapor vendido.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] COPEL. Disponível em: <http://www.copel.com/hpcopel/root/>. Acesso em 17 de Abril de 2017.
- [2] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica(2016). Disponível em: [www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=2](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=2). Acesso em 29 de Maio de 2016.
- [3] PIRES, Eduardo et al. ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA/ECONÔMICA PARA INSTALAÇÃO DE UM TERMOGERADOR EM QUEIMADOR DE GASES DE ESTUFAR, 2013.
- [4] Notas de Aula de Co-geração do Curso de Engenharia de Equipamentos. Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc\\_PDF/Apostila\\_Cogeracao\\_Otima.pdf](http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf)>. Acesso em: 14 set. 2016  
[www.professores.uff.br/dulcemar/Doc\\_PDF/Apostila\\_Cogeracao\\_Otima.pdf](http://www.professores.uff.br/dulcemar/Doc_PDF/Apostila_Cogeracao_Otima.pdf)
- [5] NEE – Instituto Nacional de Eficiência Energética (2007). Geração Distribuída e Co-geração, 2007 Disponível em: [http://www.inee.org.br/forum\\_co\\_geracao.asp?Cat=forum](http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp?Cat=forum). Acesso em 3 de julho de 2017.
- [6] MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (MME). Plano Nacional de Energia 2030. Ministério de Minas e Energia / Empresa de Pesquisa Energética. Brasília : MME : EPE, 2007. Acesso em 3/10/2016. Disponível em: [www.epe.gov.br/PNE/20080512\\_8.pdf](http://www.epe.gov.br/PNE/20080512_8.pdf).
- [7] (6th ed.) Moran, M. J., & Shapiro, H. N. (1998). Fundamentals of Engineering Thermodynamics. Acesso em: 14 de janeiro de 2017.
- [8] Garrido, GARCÍA Santigado. Director Técnico de RENOVETEC. *manual del curso CICLO AGUA-VAPOR EN CENTRALES TERMOELÉCTRICAS, publicado por RENOVETEC*. Disponível em: <http://www.cicloaguavapor.com/condensador>. Acesso em 5 de Outubro de 2016.

[9] EQUIREPSA, Tecnologia de vacío-Vacuum Systems. Disponível em: [www.equirepsa.com/productos/intercambiadores-de-calor/aerocondensadores](http://www.equirepsa.com/productos/intercambiadores-de-calor/aerocondensadores). Acesso em 12 de Maio de 2017.

[10] TFatec Piracicaba. Disponível em: [www.fatecpiracicaba.edu.br/TG\\_2011\\_1/TG\\_2011\\_1\\_12.pdf](http://www.fatecpiracicaba.edu.br/TG_2011_1/TG_2011_1_12.pdf). Acesso 28 de Fevereiro de 2017.

[11] GERAÇÃO A VAPOR. Disponível em: [www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/gera\\_vapor.php](http://www.antonioguilherme.web.br.com/Arquivos/gera_vapor.php). Acesso em 4 de Setembro de 2016.