

Luiz Felipe Rolim Santos  
Julianno Pizzano Ayoub  
Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira

# SUSTENTABILIDADE

A VIABILIDADE DE UM COMBUSTÍVEL  
ALTERNATIVO PARA USO EM  
CALDEIRAS DE BIOMASSA

2020

  
Pascal  
Editora

**Luiz Felipe Rolim Santos  
Julianno Pizzano Ayoub  
Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira**

**SUSTENTABILIDADE:**  
**A viabilidade de um combustível  
alternativo para uso em caldeiras  
de biomassa**

**Editora Pascal**

**2020**

**2020 - Copyright© da Editora Pascal**

**Editor Chefe:** Dr. Patrício Moreira de Araújo Filho

**Edição e Diagramação:** M.Sc. Eduardo Mendonça Pinheiro

**Edição de Arte:** Marcos Clyver dos Santos Oliveira

**Revisão:** Os autores

### **Conselho Editorial**

Dra. Camila Pinheiro Nobre

Dr. William de Jesus Ericeira Mochel Filho

M.Sc. André Leonardo Demaison Medeiros Maia

### **Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**

<b>S964bio</b>
Santos, Luiz Felipe Rolim; Ayoub, Julianno Pizzano; Oliveira, Marcel Ricardo Nogueira de
Sustentabilidade: a viabilidade de um combustível alternativo para uso em caldeiras de biomassa / Luiz Felipe Rolim Santos, Julianno Pizzano Ayoub, Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira 1ª ed. — São Luís: Editora Pascal, 2020.
87 f. ; il.
Formato: PDF
Modo de acesso: World Wide Web
ISBN: 978-65-86707-00-7
D.O.I.: 10.29327/513784
1. Bioenergia. 2. Biocombustível. 3. Eficiência Energética. 4. Engenharia. I. , II. Título.
CDD: 333.796
CDU: 620.95

Qualquer parte deste livro poderá ser reproduzida ou transmitida, sejam quais forem os meios empregados: eletrônicos, mecânicos, fotográficos, gravação ou quaisquer outros, desde que seja citado o autor.

**2020**

[www.editorapascal.com.br](http://www.editorapascal.com.br)

contato@editorapascal.com.br

## **AGRADECIMENTO**

Agradecimento é a palavra que melhor expressa a sensação dos autores por esse livro. Primeiro à Deus.

Seguido pelo agradecimento aos mais que colegas de engenharia, amigos, que dividem a autoria dessa obra, após trabalho árduo, e dedicação.

Aos professores, os quais passaram pelas nossas vidas ao longo de tantos anos dentro de sala de aula, e que contribuíram ao nosso conhecimento. E a todos os envolvidos que direta ou indiretamente, influenciaram essa obra.

Muito obrigado!



# SUMÁRIO

Resumo

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 OBJETIVOS GERAIS.....	3
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	3
1.3 JUSTIFICATIVA .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>4</b>
2.1 BIOMASSA NO BRASIL.....	4
2.1.1 Resíduos Agrícolas.....	5
2.1.2 Resíduos Urbanos.....	6
2.1.3 Resíduos Industriais .....	6
2.2 CALDEIRAS .....	6
2.2.1 Formato.....	7
2.2.2 Disposição Interna .....	7
2.2.2.1 Caldeira Fogotubular .....	7
2.2.2.2 Caldeira aquatubular.....	9
2.2.3 Pressão.....	10
2.2.4 Capacidade .....	10

2.2.5 Tipo de combustível .....	11
2.3 PRIMEIRA LEI DA TERMODINAMICA.....	11
2.4 COMBUSTÃO .....	12
2.4.1 Combustão Completa.....	12
2.4.2 Combustão Incompleta .....	12
2.4.3 Ar estequiométrico .....	13
2.5 PERDA DE ENERGIA .....	14
2.5.1 Perda Energética na Combustão Incompleta.....	14
2.5.2 Perda Energética por Excesso de Ar na Combustão ...	15
2.6 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA POR RADIAÇÃO .....	15
2.7 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA POR CONVECÇÃO .....	16
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>17</b>
3.1 COLETA DE DADOS .....	21
3.2 PERÍODO DE ANÁLISE .....	22
3.3 CAPACIDADE MÉDIA DWS .....	28
3.4 CAPACIDADE MÉDIA PSS .....	30
3.5 HORAS DE FUNCIONAMENTO DO PSS .....	32
3.6 ENERGIA REAL MÉDIA .....	32
3.7 TOTAL DE MOVIMENTOS DO PUSHER.....	35

3.8 TOTAL DE ENERGIA GERADA .....	37
3.9 TOTAL DE ENERGIA GERADO NA DWS E NO PSS .....	37
3.10 TOTAL DE BIOMASSA CONSUMIDA .....	38
3.11 RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA GERADA E O CONSUMO DE BIOMASSA .....	39
3.12 RELAÇÃO REAIS GASTO POR ENERGIA GERADA .....	39
<b>4. ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>40</b>
4.1 EXPOSIÇÃO DOS RESULTADOS .....	40
4.2 CONSUMO x EFICIÊNCIA .....	43
4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS .....	48
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>52</b>
APÊNDICE A – Gráficos das análises do cavaco da madeira pinus .....	54
APÊNDICE B – Gráficos das análises da casca da madeira pinus	64
<b>AUTORES.....</b>	<b>74</b>



## Resumo

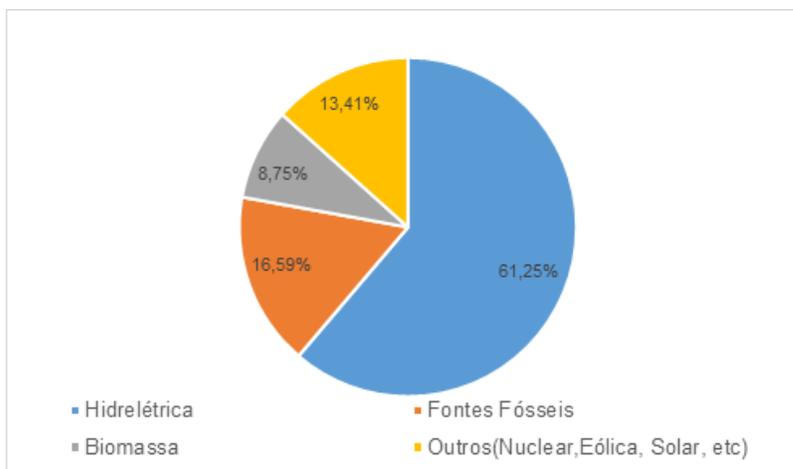
A principal fonte de energia utilizada nos processos de várias indústrias é a energia térmica gerada por caldeiras de biomassa. Estas, por sua vez, obtêm a energia através da combustão da madeira, na maioria dos casos. Uma indústria do setor de grãos, situada no interior do PR, utiliza quatro geradores de água superaquecida de biomassa como principal meio de energia em seus processos, chegando a alcançar uma capacidade líquida de 15,5 MW por caldeira. O principal material utilizado como combustível é o cavaco de madeira de eucalipto, produzido pela unidade florestal da própria indústria. Porém, esta unidade não é auto suficiente para o suprimento das demandas da indústria. Outros produtos queimados são os resíduos de cereais tais como soja, trigo, milho e cevada, provenientes de outros setores da indústria estudada. O cavaco, que possui uma umidade média de 45%, é queimado na grelha, junto com os resíduos grossos dos cereais, enquanto o pó dos cereais, um material de baixa umidade, (em torno de 13%) é queimado em suspensão, acima da chama produzida pela combustão do cavaco. Em função do alto consumo de biomassa e da necessidade de compra de biomassa do mercado, o que possui um valor elevado, a Indústria realizou testes de eficiência energética em suas caldeiras. Utilizando partes menos nobres do próprio pinus, como a casca e serragem com 50% de umidade, gerados por outra empresa local, os testes tiveram o objetivo de analisar o potencial energético e a relação custo/consumo dos materiais que serão queimados junto com os combustíveis já utilizados nas caldeiras. Os resultados mostraram que a casca da madeira pinus tem total capacidade de suprir a demanda energética da empresa, apresentando um potencial energético de 2,29 MWh/ton, enquanto o valor do cavaco da madeira pinus, combustível já utilizado pela indústria, foi de 2,55 MWh/ton.

**Palavras-chave:** Bioenergia. Biocombustível. Eficiência Energética. Engenharia.



## 1. INTRODUÇÃO

Dois dos principais fatores que fizeram a humanidade voltar os olhos novamente para a utilização da biomassa como fonte de energia, foram primeiramente, a conscientização de que a queima excessiva de combustíveis fósseis está diretamente ligada com as mudanças climáticas que vem ocorrendo ao longo tempo devido ao efeito estufa. Em segundo, a percepção de que a utilização de combustíveis fósseis é um ato extrativista, e que a reserva destes em algum momento irá se esgotar, por tratar-se de uma fonte de energia não renovável.



**Gráfico 1 - Matriz elétrica no Brasil**

Fonte: Anael – Agência Nacional de Energia Elétrica (2017)

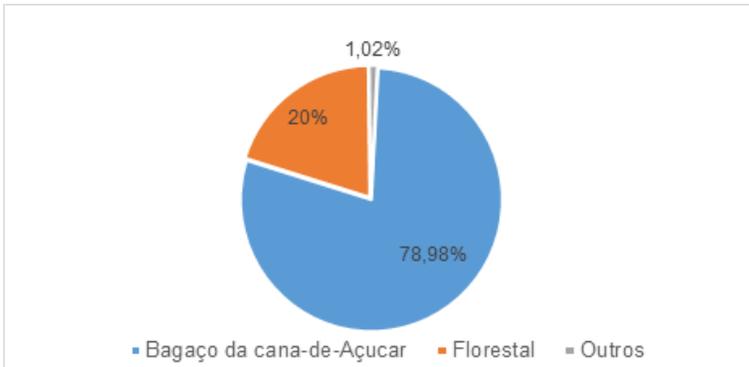


Gráfico 2 – Consumo de biomassa no Brasil

Fonte: Anel – Agência Nacional de Energia Elétrica (2017)

Deste modo, a humanidade vem em uma constante procura por fontes de energia renováveis. De acordo com o gráfico 1 é possível ver que a matriz elétrica brasileira é predominantemente de origem hídrica, onde esses 61,25 % representam um total de 99.374.508 kW gerados. Já a terceira maior fonte de energia elétrica no Brasil é a biomassa, gerando um total de 14.193.000,4 kW. O gráfico 2 mostra que os materiais de origem florestal são responsáveis por 20% do total gerado pelos combustíveis considerados biomassa, totalizando 2.848.418 kW. Os combustíveis de origem fóssil ainda representam uma grande gama da matriz energética do país, com um total de 16,59% do que é gerado. Mas ao comparar apenas combustíveis renováveis e não renováveis a perspectiva para o Brasil é excelente, pois 80,6% de toda a energia produzida vêm das fontes renováveis, enquanto apenas 19,4% é derivada de das fontes não renováveis.

Entretanto, sendo de fonte renovável ou não, toda energia consumida acaba tendo um preço. Assim, visando economia, muitas empresas acabam optando por gerar sua própria energia. Seguindo esta motivação, uma indústria de grande porte, situada no interior do PR conta com 4 caldeiras de biomassa para suprir as necessidades energéticas em seus processos. O tipo de biomassa mais utilizado pela mesma é o cavaco da madeira eucalipto, sendo a maior parte produzida pelo próprio setor florestal da indústria, e o restante comprado de terceiros.

Mas por se tratar de uma madeira nobre seu preço é elevado.

Com o intuito de encontrar um combustível alternativo que possa substituir o cavaco de eucalipto, neste trabalho realizaremos testes de eficiência utilizando uma mistura da casca do *Pinus Elliottii* com serragem (utilizaremos apenas o termo “casca” para nos referir a mistura), em uma proporção de 80% e 20% respectivamente. Os testes terão como objetivo analisar períodos onde as caldeiras trabalham normalmente, porém alterando os tipos combustíveis. No final, é esperado realizar uma comparação entre o cavaco da madeira e a mistura de casca e serragem para ver se o combustível alternativo é rentável e atende as necessidades energéticas da indústria estudada.

## **1.1 OBJETIVOS GERAIS**

O objetivo geral deste trabalho é realizar um teste de viabilidade com combustível alternativo (casca da madeira pinus) para caldeiras de biomassa.

## **1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

Como objetivo principal, este trabalho pretende analisar a eficiência energética, e a relação custo/consumo da casca da madeira pinus visando a viabilidade deste combustível alternativo.

## **1.3 JUSTIFICATIVA**

Justifica-se através da constante procura por combustíveis renováveis que sejam capazes de substituir combustíveis fósseis e não renováveis. Deste modo, este trabalho pretende realizar um teste de um combustível alternativo (casca do pinus) para caldeiras de biomassa, efetuando neste, análises de eficiência energética. Soma-se a isso a necessidade de compra de biomassa da indústria estudada, assim, o presente trabalho irá

fornecer uma relação custo/consumo entre a casca de árvore o cavaco de madeira, sendo este, o combustível mais utilizado pela indústria e que possui elevado valor de compra quando comparado com a casca.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 BIOMASSA NO BRASIL

As principais fontes de biomassa obtidas no Brasil são derivadas de vegetais lenhosos, como é o caso da madeira e seus resíduos, de resíduos orgânicos, onde encontramos os resíduos agrícolas, urbanos e industriais e também dos biofluidos, que é o caso dos óleos vegetais (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

A seguir a Figura 1 apresenta um esquema das fontes de biomassa no Brasil.

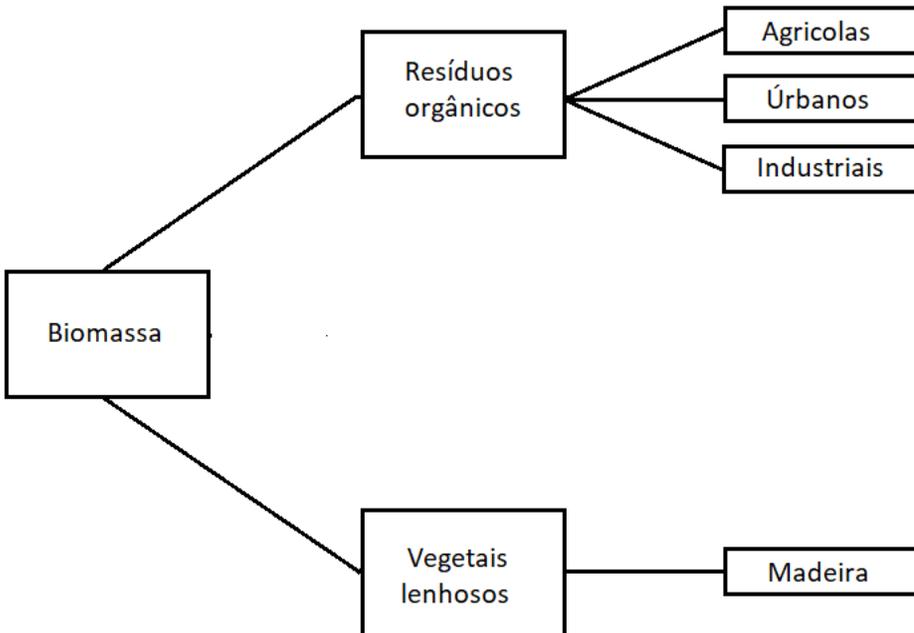


Figura 1 - Fontes de biomassa no Brasil

Fonte: Cortez; Lora; Gómez (2008)

## 2.1.1 Resíduos Agrícolas

Os resíduos agrícolas são resultantes das atividades da colheita dos produtos agrícolas produzidos no campo. O Brasil é um dos maiores produtores agrícolas do mundo, e a cada ano a área plantada e a produção vem aumentando. Atualmente existem várias tecnologias que possibilitam a utilização energética desses resíduos, mas mesmo assim estima-se que 200 milhões de toneladas destes resíduos não são utilizados (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Da Tabela 1 é possível inferir que o Brasil se destaca na produção de soja e milho, tendo essas culturas uma produtividade muito maior que as demais presentes na tabela. Porém, mesmo as porcentagens do fator de disponibilidade de resíduos para coleta serem praticamente as mesmas para todos os produtos, por possuírem uma produtividade mais elevada que os demais, as culturas de soja e milho são também as que mais fornecem resíduos por safra. Estes resíduos são constituídos basicamente por folhas, palha e caules, e possuem poder calorífico médio de 14,89 GJ/ton de matéria seca.

Tabela 1 - Síntese de Indicadores de Produção, Disponibilidade e Poder Calorífico dos Resíduos Agrícolas

	Soja	Milho	Arroz	Feijão	Trigo	Algodão
Produção por safra (tons)	68.756	55.395	11.236	3.159	6.171	2.950
Fator de disponibilidade para coleta	30%	40%	40%	40%	40%	40%
PCI [Gj/t]	14,6	17,7	16,0	14,0	12,4	14,6

Fonte: Ministério de Minas e Energia (2014)

Se tratando particularmente do estado do Paraná, este é o maior produtor de milho e o segundo maior produtor de soja do Brasil, com uma colheita no ano de 2010 de 13.567 toneladas e 14.092 toneladas respectivamente.

### **2.1.2 Resíduos Urbanos**

Os resíduos sólidos urbanos são derivados dos resíduos domiciliares e comerciais, e a quantidade de lixo gerado cresce a uma taxa de 5% ao ano. Porém este lixo gerado possui um teor de matéria orgânica, como Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e Nitrogênio (C, H, O e N) de aproximadamente 60%, tendo assim um potencial calorífico médio de 5,44 MJ/kg (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

### **2.1.3 Resíduos Industriais**

São considerados resíduos industriais aqueles provenientes do beneficiamento de produtos agrícolas e florestais, do uso de carvão vegetal no setor siderúrgico de ferro-gusa e aço e do gás de alto-forno a carvão vegetal. A indústria madeireira produz resíduos a partir do beneficiamento de toras, sendo estas cascas, cavaco, pó de serra e aparas. Porém só podem ser queimados resíduos com umidade inferior a 50%.

## **2.2 CALDEIRAS**

Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, projetados conforme códigos pertinentes, executando-se refervedores e similares (NR 13). O vapor produzido pelas caldeiras é geralmente utilizado para movimentar eixos de máquinas térmicas ou como fonte de calor para processos. Porém as caldeiras nem sempre tem o vapor como fluido de trabalho, existem também caldeiras de

água superaquecida, onde o fluido dentro das tubulações não vaporiza após ter atingido 100°C, sendo aproveitado mesmo na fase líquida podendo atingir temperaturas superiores a 160°C.

Algumas vantagens da água superaquecida em relação ao vapor, é que o primeiro causa menos problemas de corrosão nas tubulações e equipamentos da caldeira. Outra vantagem, é que caldeiras de água superaquecida trabalham em um circuito fechado onde ocorre pouca perda de energia, já caldeiras a vapor precisam de um sistema de recuperação de condensadores para diminuir as perdas térmicas.

Segundo (BOTELHO; BIFANO, 2011) as caldeiras podem ser classificadas de 5 diferentes maneiras, de acordo com seu formato, pressão de trabalho, capacidade, tipo de combustível e disposição interna.

### **2.2.1 Formato**

As caldeiras podem ser de eixo horizontal, sendo estas as mais comuns, ou de eixo vertical, sendo menos comum e normalmente de menor tamanho (BOTELHO; BIFANO, 2011).

### **2.2.2 Disposição Interna**

Tratando-se da disposição interna e do tipo de funcionamento das caldeiras, estas podem ser divididas em dois grupos, caldeiras do tipo fogotubular e do tipo aguatutubular (BOTELHO; BIFANO, 2011).

#### **2.2.2.1 Caldeira Fogotubular**

Neste tipo de caldeira, que também podem ser chamadas de flamatubular ou flamatubular (figuras 2 e 3), os gases quentes provenientes da queima do combustível circulam no

interior de tubos envolvidos pela água existente dentro da caldeira. Este tipo de caldeira é a mais comum, e é encontrada em hospitais, hotéis, indústrias alimentícias, entre outros (BOTELHO; BIFANO, 2011).

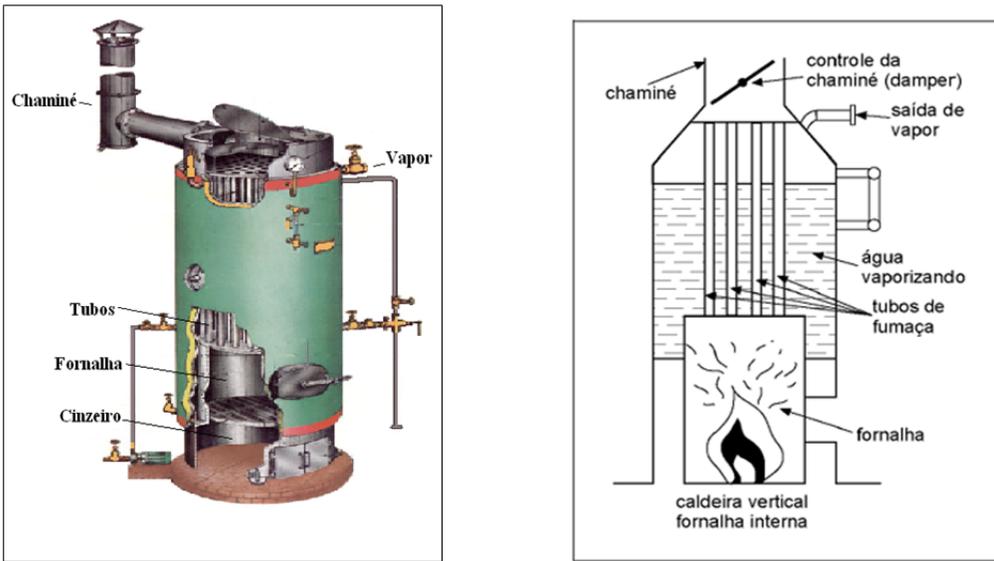


Figura 2 - Caldeira fogotubular vertical

Fonte: Botelho; Bifano (2011)

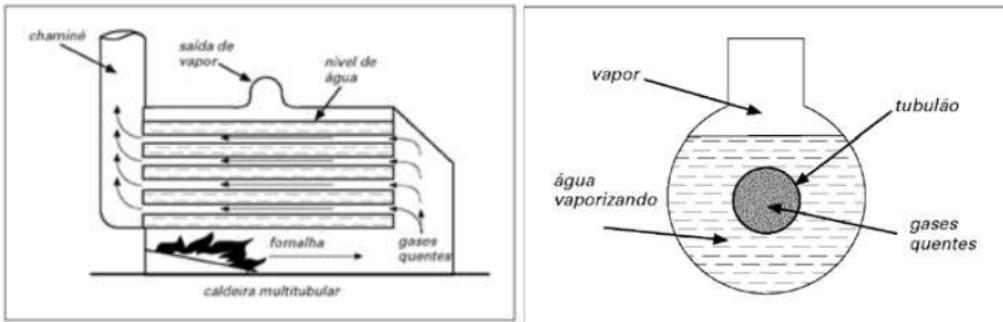


Figura 3 - Caldeira fogotubular horizontal

Fonte: Botelho; Bifano (2011)

## 2.2.2.2 Caldeira aquatubular

Nas caldeiras aquatubulares (figuras 4 e 5), a água circula dentro das serpentinas, sendo envolvida pelos gases quentes da combustão, onde é aquecida gerando o vapor (BOTELHO; BIFANO, 2011).

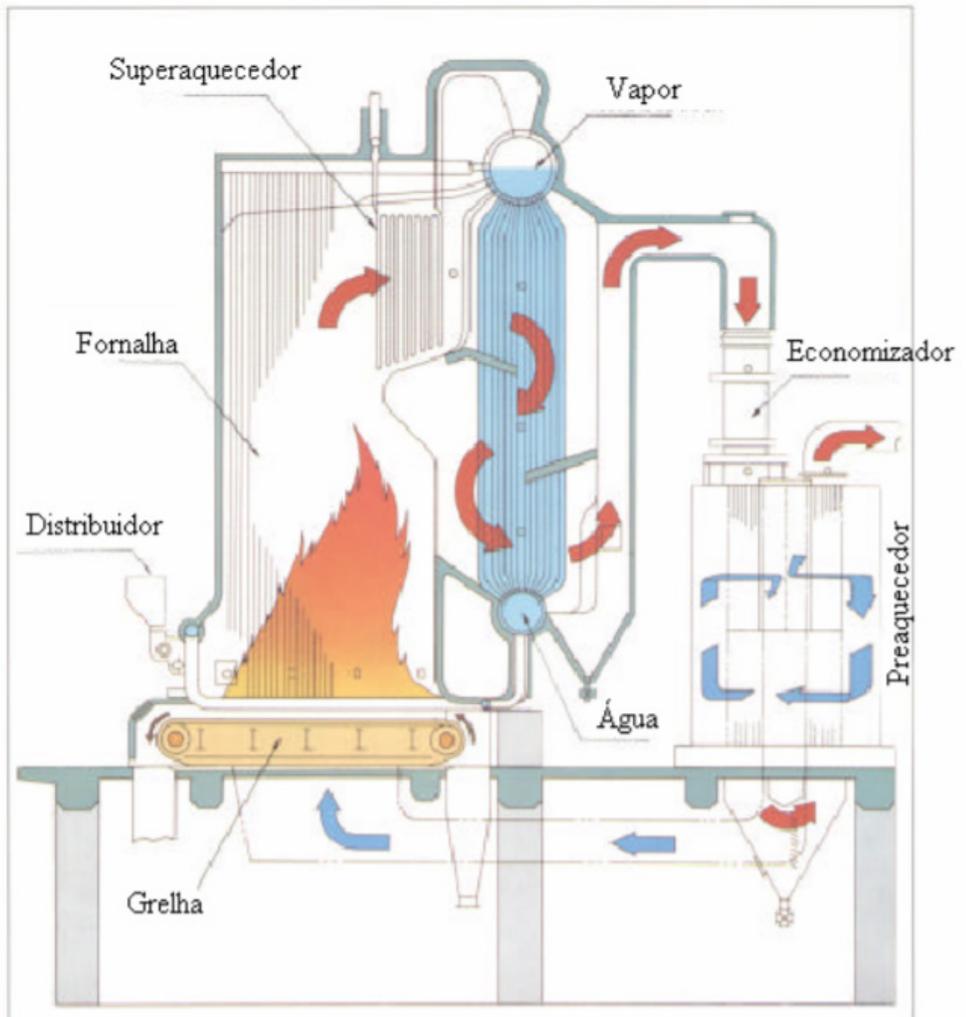


Figura 4 - Caldeira aquatubular vertical

Fonte: Botelho; Bifano (2011)

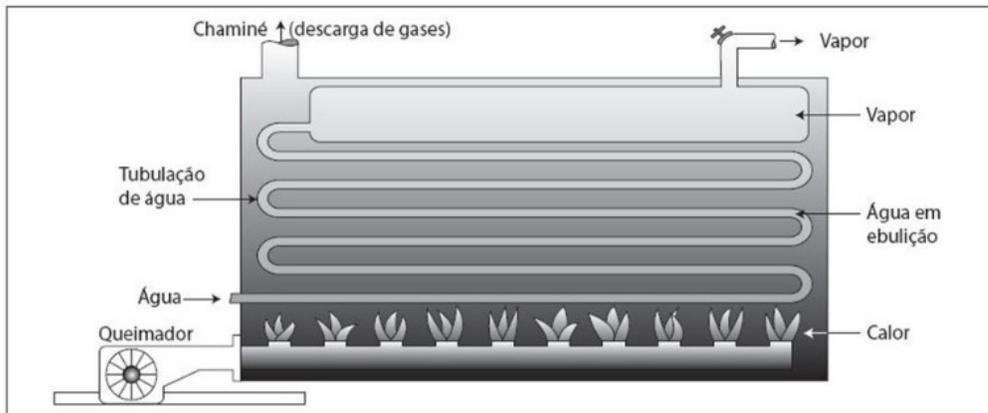


Figura 5 - Caldeira aquatubular horizontal

Fonte: Botelho; Bifano (2011)

### 2.2.3 Pressão

A tabela 2 fornece a divisão das caldeiras quanto à pressão de trabalho.

Tabela 2 – Tipos de caldeiras

Tabela de Categorias de calderias		
Categoria A	Categoria B	Categoria C
Pressão interna maior que 19,98 Kgf/cm <sup>2</sup> e volume superior a 50L	Pressão interna superior a 0,61 Kgf/cm <sup>2</sup> e inferior a 19,8 Kgf/cm <sup>2</sup> com volume superior a 50L	Calderias que não se enquadram nos dois casos

Fonte: Botelho; Bifano (2011)

### 2.2.4 Capacidade

Para uma mesma pressão de trabalho, uma caldeira pode ser produzida maior ou menor em termos de capacidade de gerar vapor. É uma questão de tamanho do cilindro, capacidade de alimentação de combustível e capacidade da fornalha (BOTELHO; BIFANO, 2011).

## 2.2.5 Tipo de combustível

Uma caldeira pode ter vários tipos de combustíveis, mas o mais importante para seu funcionamento é a quantidade de calor que este pode fornecer. Sendo cedido o combustível, pouca coisa interfere no funcionamento posterior da caldeira (BOTELHO; BIFANO, 2011). Os principais combustíveis são:

- Madeira, cavaco, casca de cereais serragem, bagaço de cana etc.
- Gás Liquefeito de Petróleo (GLP) ou gás natural
- Óleo combustível, diesel ou BPF.

## 2.3 PRIMEIRA LEI DA TERMODINAMICA

O princípio fundamental da primeira lei da termodinâmica é o de conservação de energia. Segundo ela, a variação total de energia de um sistema fechado é igual à transferência de calor da vizinhança menos o trabalho realizado pelo sistema em sua vizinhança. Assim, para uma variação finita entre os estados 1 e 2, temos que:

$${}_1Q_2 - {}_1W_2 = \Delta E_{1-2}$$

Onde:

${}_1Q_2$ : Transferência de calor para o sistema entre os estados 1 e 2;

${}_1W_2$ : Trabalho realizado pelo sistema entre os estados 1 e 2;

$\Delta E_{1-2}$ : Variação total de energia entre os estados 1 e 2.

## 2.4 COMBUSTÃO

Ao decorrer de uma reação química, as ligações no interior das moléculas dos reagentes se quebram, e os átomos e elétrons se reorganizam formando os produtos. No caso da combustão, a rápida oxidação dos elementos do combustível resulta em uma liberação de energia à medida que os produtos da combustão são gerados. Em uma combustão exclusiva de hidrocarbonetos, são gerados como produtos apenas dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Entretanto, os hidrocarbonetos geralmente estão misturados com outros elementos como nitrogênio (N), enxofre (S) e ferro (Fe). A queima destes elementos tem como resultado a formação de outros óxidos, como o dióxido de nitrogênio ( $\text{NO}_2$ ), dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ) e óxido de ferro III ( $\text{FeO}_3$ ). (MORAN; SHAPIRO 2008).

O processo de combustão pode ser classificado em:

- Combustão completa
- Combustão incompleta

### 2.4.1 Combustão Completa

Segundo (SALUM, 2011), quando todo o combustível presente nos queimadores reage completamente com o oxigênio, tem-se uma combustão completa. Quando há uma combustão completa, ocorre a produção de um número limitado de produtos.

### 2.4.2 Combustão Incompleta

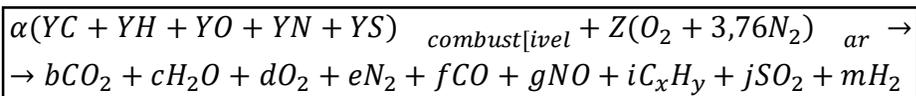
Quando não ocorre a completa oxidação dos elementos do combustível, a combustão é dita incompleta. É altamente indesejável que isso ocorra, pois a combustão incompleta além de não queimar por completo o combustível que acaba sendo liberado pela chaminé, produzindo inúmeros produtos nocivos

ao meio ambiente, como o monóxido de carbono (CO) (SALUM, 2011). Um dos fatores que levam a queima incompleta é a falta de oxigênio durante a reação.

### 2.4.3 Ar estequiométrico

Com base na estequiometria da reação e conhecendo a composição do combustível, é possível calcular o ar necessário para uma queima eficiente do combustível. Assim, "ar teórico" ou "ar estequiométrico" é a quantidade de ar com suficiente oxigênio para a combustão. Porém, na prática, apenas com o ar estequiométrico é difícil garantir uma ótima combustão, sendo necessário recorrer a um percentual seguro de excesso de ar para evitar a combustão incompleta (SALUM, 2011).

Tendo o conhecimento da composição química do combustível e do oxidante, e também das condições ambientais locais, é então possível desenvolver o balanço de energia, volume e massa. Estes são capazes de mostrar os fluxos gerados em base mássica, molar e volumétrica juntamente com ar estequiométrico e as concentrações dos poluentes formados (FRANCISCO, 2012). Assim, é possível utilizar a seguinte equação global de combustão.



Segundo MORAN; SHAPIRO (2008), a equação para encontrar a porcentagem de ar teórico de uma reação é:

$$\% \text{ de ar teórico} = \overline{AC} / \overline{AC_{teo}}$$

Onde:

AC: Razão ar-combustível em base molar

$AC_{\text{teo}}$ : Razão ar-combustível teórica em base molar.

A própria empresa responsável pelas caldeiras, forneceu que o valor de porcentagem de ar teórico, tanto para o cavaco, como para a casca é de 7%.

## 2.5 PERDA DE ENERGIA

De acordo com ÇENGEL, BOLES (2013) as máquinas de combustão externa são aquelas em que o fluido de trabalho é completamente separado do ar e do combustível. Deste modo, as caldeiras podem ser consideradas máquinas de combustão externa, já que o fluido de trabalho (vapor, água superaquecida ou óleo) não entra em contato com o combustível ou com os gases provenientes da combustão. Logo, sendo máquinas, as caldeiras possuem uma determinada eficiência, que acaba sendo afetada devido às perdas de energia que ocorrem durante a combustão e o processo de troca de calor.

### 2.5.1 Perda Energética na Combustão Incompleta

Como cita SALUM (2011), a combustão incompleta além de gerar uma maior emissão de poluentes, também leva a um prejuízo energético, como mostra a equação a seguir:

$$E_{\text{GC}} = m_{\text{GC}} \cdot \text{PCI}_{\text{GC}}$$

Sendo:

$E_{\text{GC}}$ : Energia devido a queima incompleta;

$m_{\text{GC}}$ : Massa de gás combustível não queimada na queima incompleta;

$\text{PCI}_{\text{GC}}$ : Poder calorífico inferior do gás combustível.

## 2.5.2 Perda Energética por Excesso de Ar na Combustão

Como já citado, existe uma porcentagem de ar necessária e correta para uma melhor queima de um combustível. Entretanto, segundo SALUM (2011), o excesso de ar na reação de combustão implica em uma perda de energia, pois uma parte do calor liberado durante a oxidação acaba sendo utilizada para aquecer o ar em excesso, sendo liberado pela chaminé. A quantidade de calor desperdiçada é expressa na seguinte equação:

$$E_{AR} = m_{AR} \cdot C_{AR} \cdot (T_F - T_I)$$

Onde:

$E_{AR}$ : Energia desperdiçada pelo aquecimento do excesso de ar;

$m_{AR}$ : Massa de excesso de ar na combustão;

$C_{AR}$ : Calor específico do ar;

$T_F$ : Temperatura de saída do ar;

$T_I$ : Temperatura de entrada de ar.

O excesso de ar é um dos principais fatores que determina a eficiência da combustão, pois controla o volume, temperatura e entalpia dos produtos da combustão. Assim, um grande excesso de ar diminui a temperatura e o comprimento da chama, aumentando as perdas de calor e reduzindo a eficiência térmica.

## 2.6 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA POR RADIAÇÃO

É na fornalha da caldeira, onde acontece a combustão, que ocorre a troca de calor por radiação. Isso se deve ao fato das condições de temperatura, geometria e velocidade dos fluidos no interior da fornalha (BIZZO, 2003). Como mostra a figura 6, a fornalha da caldeira é circundada por superfícies frias de troca de calor. Então, uma parte do calor gerado na combustão acaba sendo perdida por radiação para as paredes frias ao redor da

fornalha.

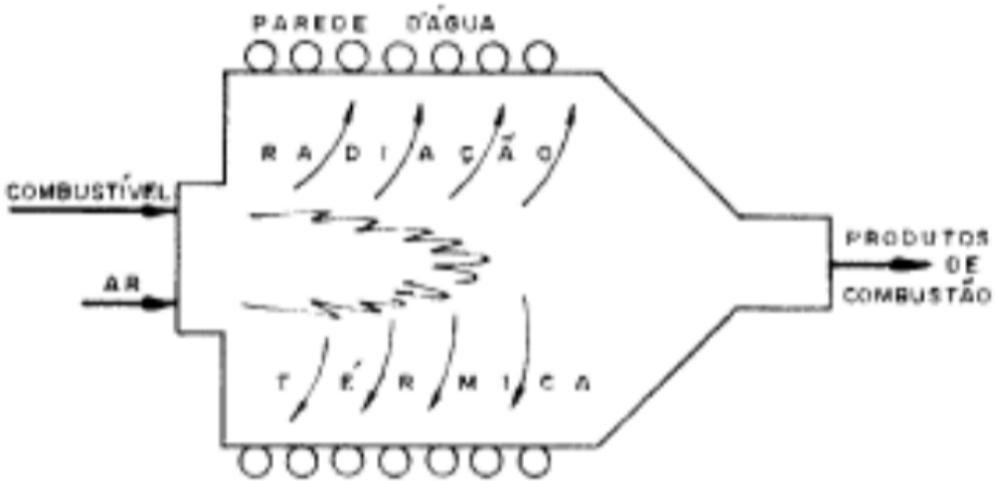


Figura 6 - Esquema da fornalha de uma caldeira

Fonte: Bizzo (2003)

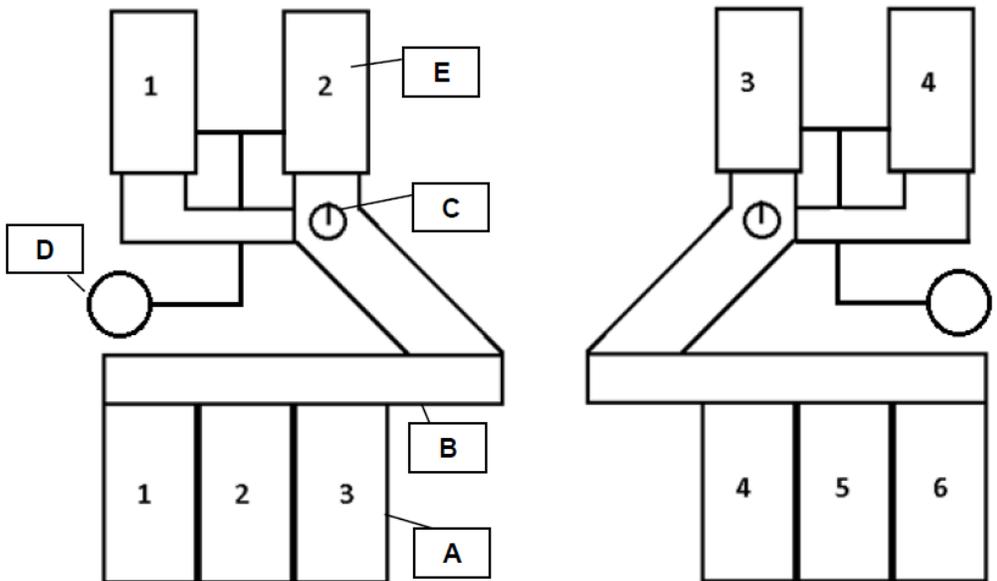
## 2.7 TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA POR CONVECÇÃO

A convecção ocorre nas regiões geométricas que não possuem contato com a chama da fornalha, ou seja, aquelas que não recebem a radiação da chama. No caso das caldeiras flamatubulares, a troca de calor por convecção ocorre entre os tubos e os gases da combustão que circulam em seus interiores. Já nas caldeiras aquatubulares, esta troca de calor é realizada através pelo fluxo de gases externos aos tubos (BIZZO, 2003).

### 3. METODOLOGIA

Diariamente, a indústria estudada recebe uma média de oito carregamentos de biomassa, podendo ser o cavaco de pinus/eucalipto adquirido de terceiros, o cavaco da madeira pinus proveniente do setor florestal da própria indústria, e a mistura serragem/casca da madeira de pinus também comprada de terceiros. Todo carregamento é pesado em uma balança da própria empresa, então é feito o registro do peso da carga, a hora em que esta foi recebida, a umidade da biomassa e o local em que a carga foi descarregada.

A figura 7 é um esquema das caldeiras utilizadas, onde:



**Figura 7 - Esquema do sistema de alimentação das caldeiras da indústria estudada**

**Fonte: Autoria própria**

Onde:

A. Moegas: São os lugares onde as cargas de biomassa são descarregadas. As moegas de número 1,2 e 3 são

responsáveis por abastecer as caldeiras 1 e 2, enquanto as de número 4, 5 e 6 abastecem as caldeiras 3 e 4. Cada piso das moegas é dotado de um esquema hidráulico que permite a movimentação destes, o que lhes dá o nome de *moving floor* (piso móvel). Porém, só é possível trabalhar com um *moving floor* por vez para cada grupo de caldeiras. Por exemplo, se o piso móvel 1 estiver abastecendo as caldeiras 1 e 2, os pisos móveis 2 e 3 estarão desligados. O mesmo serve para as caldeiras 3 e 4 e seus respectivos pisos móveis.

- B. Transportador de corrente: Ao ser descarregado nas moegas, o combustível é transportado pelo *moving floor* até cair nos transportadores de corrente. Estes são responsáveis por levar o combustível que sai de cada moega até as caldeiras.
- C. Flap de distribuição: Direciona para qual caldeira o combustível será transportado.
- D. Silo de pó e queimadores PSS: Os resíduos provenientes de outros setores da empresa estudada, como casca de soja, trigo e cevada ficam armazenados nos silos de pó. Quando a caldeira já está em funcionamento e sua fornalha atinge uma temperatura de 600°C, os queimadores PSS ligam, então os resíduos saem do silo e seguem pela tubulação, sendo pulverizados na câmara de combustão, acima da chama. O pó possui baixa umidade e elevado poder calorífico, que quando pulverizado auxilia a caldeira a manter elevadas temperaturas sem que haja um consumo excessivo de biomassa na grelha. Quando trabalhando em uma capacidade de 100%, estes queimadores de pó, de acordo com o fabricante, conseguem gerar até 5 MWh. Porém, quem decide qual a capacidade em que os queimadores devem trabalhar são os próprios operadores da caldeira. Durante a elaboração deste trabalho não se encontrou um meio de monitorar a vazão mássica de pó, e também qual o padrão que os operadores utilizam para decidir a capacidade em que o PSS deve trabalhar. Devido a estes dois fatores, optou-se por não realizar um estudo específico

da eficiência energética do pó. Entretanto, foi necessário realizar a coleta de dados da capacidade média em que os queimadores de pó trabalharam durante os períodos de análise, pois estes interferem diretamente na geração de energia. Supondo que em um período de 1h a caldeira gerou 10 MWh, com a grelha trabalhando a uma capacidade de 70% e os queimadores de pó a uma capacidade de 65%, temos que 3,25 MWh foram produzidos pelo PSS, enquanto 6,75 MWh foram gerados pela grelha DWS.

- E. Caldeiras de biomassa: No total, a empresa conta com 4 geradores de biomassa, que segundo o fabricante, tem capacidade total de 15,5 MWh cada. Estas caldeiras se diferem das mais comuns, pois utilizam água superaquecida ao invés de vapor como fluido de trabalho. Para uma melhor compreensão do funcionamento das caldeiras, observamos da figura 8:

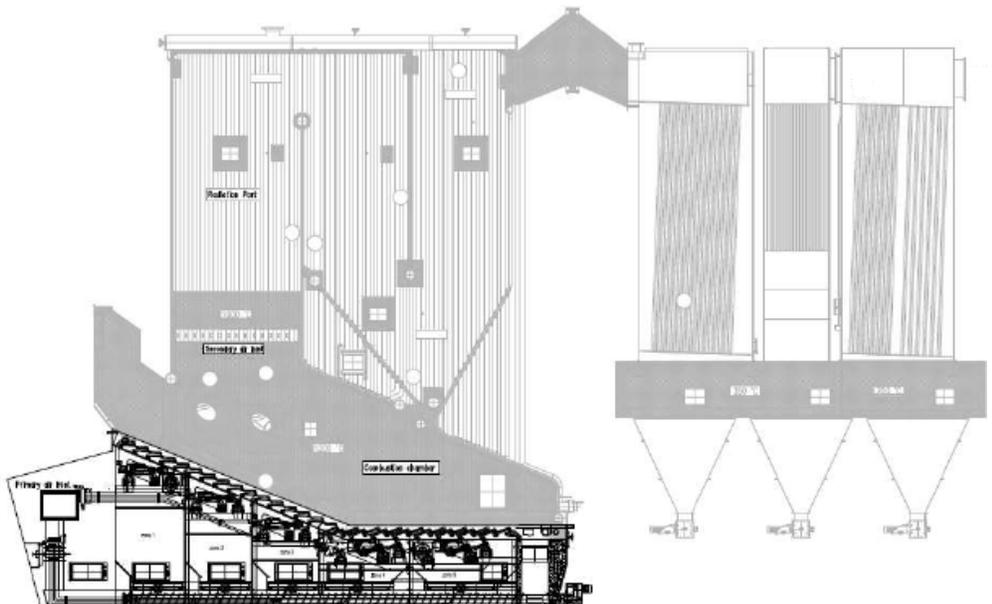


Figura 8 - Esquema da caldeira

Fonte: Indústria estudada

1. Sistema dosador de combustível: Os transportadores de corrente, dependendo da posição do flap de distribuição, levam a biomassa para a caldeira 1 ou 2, o mesmo ocorre para as caldeiras 3 e 4. O combustível, então, entra no sistema dosador, que é composto por um reservatório de 1,5 m<sup>3</sup> e um pistão hidráulico, denominado *pusher*, que empurra o combustível para o interior da caldeira. A posição do *pusher* é monitorada e controlada por um potenciômetro infravermelho.
2. Grelha DWS: É na grelha DWS (Dynamic Water System) onde ocorre a combustão da biomassa. A queima do combustível ocorre em etapas, sendo que logo no início da grelha a chama está localizada, e é onde 70% da energia da madeira é convertida, porém sem redução volumétrica significativa. O combustível que vai entrando na grelha, também empurra o combustível já presente nesta, deste modo, a combustão da biomassa ocorre por toda a extensão da grelha DWS, sendo que no final desta é esperado que haja apenas cinzas, sem a presença de fogo.
3. Zona de radiação: É composta por duas partes, sendo que na primeira ocorre a combustão da biomassa e a injeção de ar primário através de aberturas na grelha DWS, na segunda acontece a injeção de ar secundário e também a combustão completa dos gases de combustão. A zona de radiação é parcialmente revestida por um material refratário, que ajuda a manter a temperatura na caldeira para uma combustão ideal. A água que já vem pré-aquecida, escoar pelas tubulações que se encontram na primeira zona de radiação, então, devido a troca de calor entre o fluido e a radiação emitida pela chama, água é aquecida até uma temperatura mínima de 160 °C, permanecendo no estado líquido devido às condições de pressão controladas no interior da tubulação.
4. Economizador: Esta é a parte da instalação que utiliza os gases da combustão para pré-aquecer a água de alimentação antes de entrar na caldeira. O economizador

é constituído por vários feixes de tubo instalados em um invólucro metálico. Assim, o economizador recebe a água que foi utilizada nos processos da indústria a uma temperatura média de 105 °C. Por troca de calor entre o gás da combustão que escoo no interior dos tubos, a temperatura da água aumenta. Esta água pré-aquecida sai do economizador por um coletor conectado com a parte da convecção. Já os gases da combustão são empurrados para fora do economizador por meio de ventiladores, e são direcionados para a chaminé.

5. Pré-aquecedor de ar: O pré-aquecedor de ar utiliza os gases da combustão para aquecer o ar primário e secundário antes destes serem injetados na caldeira. Neste caso, os gases quentes fluem pelo interior dos tubos fazendo a troca de calor com o ar ao redor, que depois é injetado na caldeira.
6. Zona de convecção: Possui a mesma função do economizador, ou seja, pré-aquecer a água de alimentação da caldeira. O fluido que já vem pré-aquecido do economizador, mais uma vez faz a troca de calor com os gases de combustão que fluem pelas tubulações verticais.

Para a queima da casca da madeira, foi necessário que um engenheiro da própria indústria responsável pelo projeto das caldeiras fizesse algumas modificações no modo de operação destas. Entretanto, somente as caldeira 3 e 4 receberam esta programação específica. Como a caldeira 3 não estava apresentando problemas de operação, as análises da queima tanto para o cavaco, como para o combustível alternativo foram realizadas apenas na caldeira 4.

### 3.1 COLETA DE DADOS

O primeiro passo para a coleta de dados para este trabalho, foi analisar a planilha com o controle de recebimento de biomassa da indústria, com o objetivo de encontrar dias em que o descarregamento de biomassa do mesmo distribuidor tives-

sem sido feitos na mesma moega, sem que houvesse mistura de combustível. Como a indústria recebe a biomassa de diferentes fornecedores, acaba ocorrendo que diferentes tipos de carga são depositadas na mesma moega, o que leva a caldeira a queimar uma mistura de combustíveis. Sendo a ideia principal deste trabalho, a de analisar e comparar separadamente a queima do cavaco da madeira pinus/eucalipto com a queima da casca da madeira pinus, foi necessário fazer um acompanhamento do local e hora de todos os descarregamentos ocorridos nos meses de Julho, Agosto, Setembro e Outubro.

## 3.2 PERÍODO DE ANÁLISE

Tendo em mãos os dias em que não houve mistura de combustíveis nas moegas, dois itens foram verificados para encontrar os possíveis períodos de análise. Primeiramente foi necessário realizar um acompanhamento da movimentação dos pisos móveis. Como já citado, para um grupo de duas caldeiras, existem três moegas, que por meio de um piso móvel fazem com que a biomassa seja levada até os transportadores de correntes, e por sua vez para o interior das caldeiras. Cada moega possui seu *moving floor*, e só é possível trabalhar com um piso por vez. Então, para garantir que durante o período de análise a caldeira houvesse consumido apenas um tipo de combustível, foi necessário encontrar momentos em que apenas um piso móvel trabalhou. O monitoramento dos pisos móveis é feito através de um aparelho que emite um sinal sempre que um piso entra em movimento. Este sinal é recebido no supervisório da caldeira e transformado em um gráfico com valores binários, sendo 0 para desligado e 1 para ligado.

O próximo passo foi averiguar, dentro dos períodos em que a caldeira foi alimentada pelo mesmo piso móvel, os intervalos em que a caldeira 4 operou continuamente, sem desligar, pois quando a caldeira desliga, a chama na câmara de combustão apaga rapidamente, devido ao desligamento subsequente dos ventiladores de ar primário e secundário.

O gráfico 3 mostra a movimentação dos pisos móveis 4, 5

e 6 que alimentam as caldeiras 3 e 4. Neste gráfico, é possível observar o rodízio dos pisos móveis durante os dias 19, 20 e 21 de Julho de 2017, e como apenas um *moving floor* trabalha por vez. Já o gráfico 12 mostra apenas o trabalho do piso móvel 6, entre as 16h do dia 21/07/2017 até as 03h30min do dia 22/07/2017.

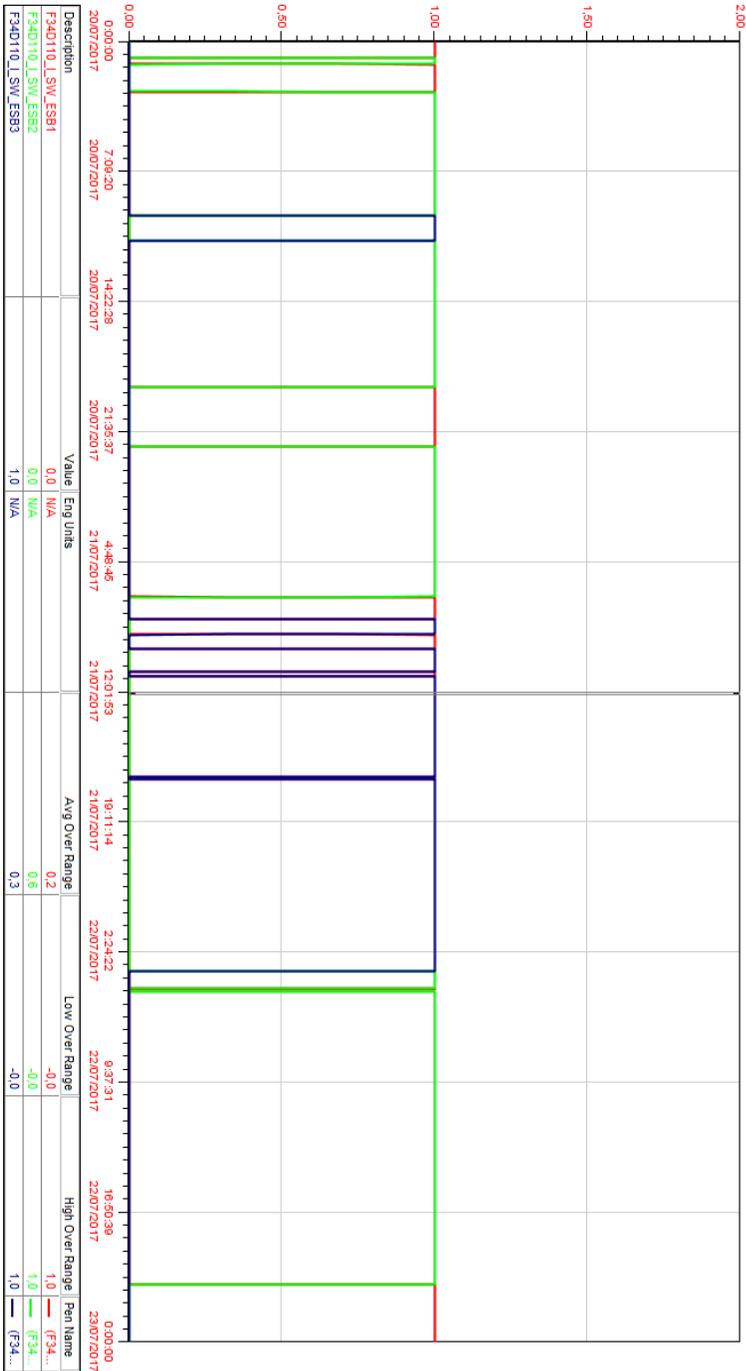


Gráfico 3 - Movimentação dos pisos móveis 4, 5 e 6  
 Fonte: Gerado pelo equipamento

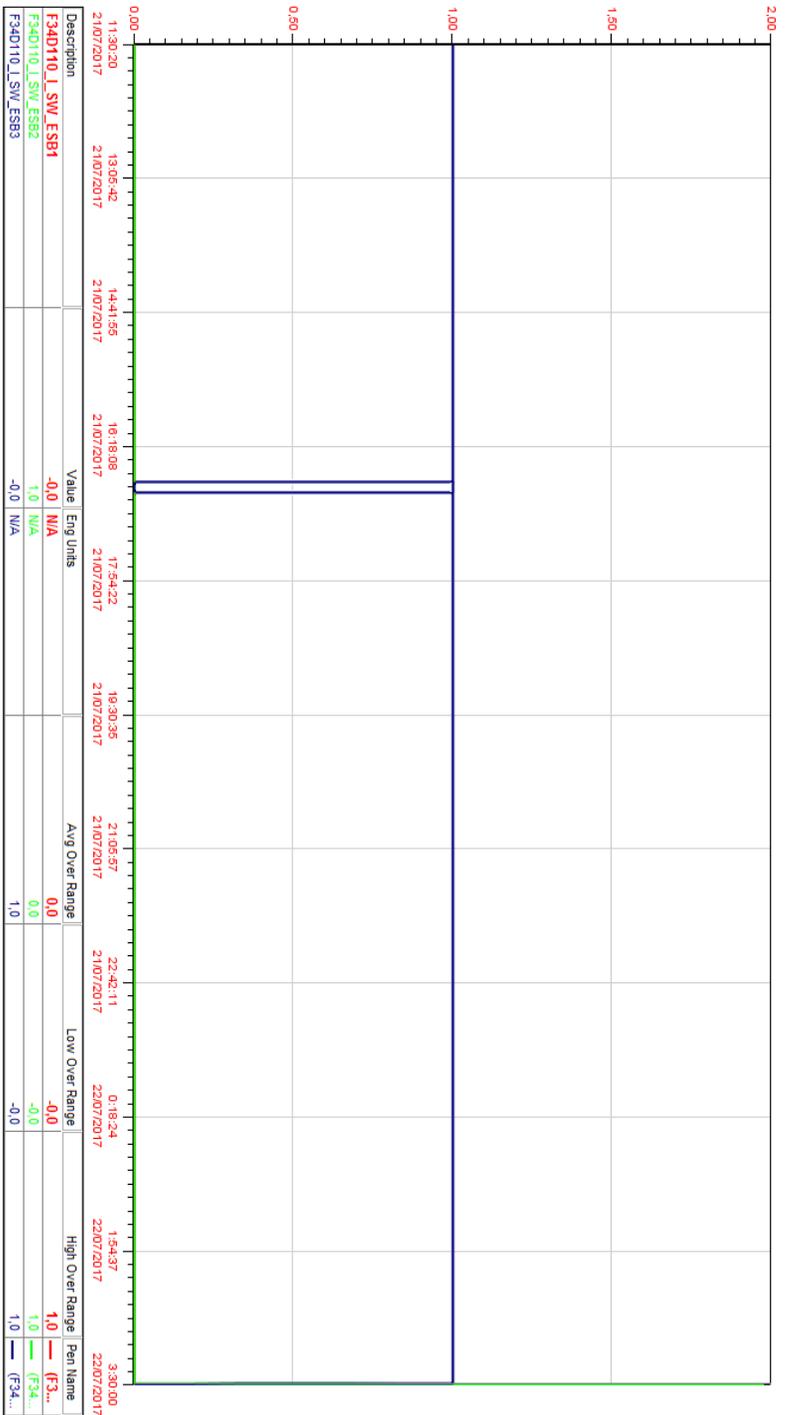


Gráfico 4 - Movimentação do piso móvel 6  
 Fonte: Gerado pelo equipamento

Temos no gráfico 4, a variação da capacidade da Grelha DWS durante o mesmo intervalo de tempo do gráfico 3. Neste gráfico, é possível ver que a caldeira não desligou em nenhum momento, apenas teve variações em sua capacidade de trabalho. Então, por se tratar de um período de 11h30min onde apenas um piso móvel movimentou e a caldeira permaneceu ligada constantemente, este foi um dos períodos escolhidos para realizar a análise da queima de combustível na caldeira 4, visto que neste dia a moega 6 recebeu apenas carregamento da mistura casca/serragem. Utilizou-se este método para escolher todos os períodos possíveis de análises presentes neste trabalho.

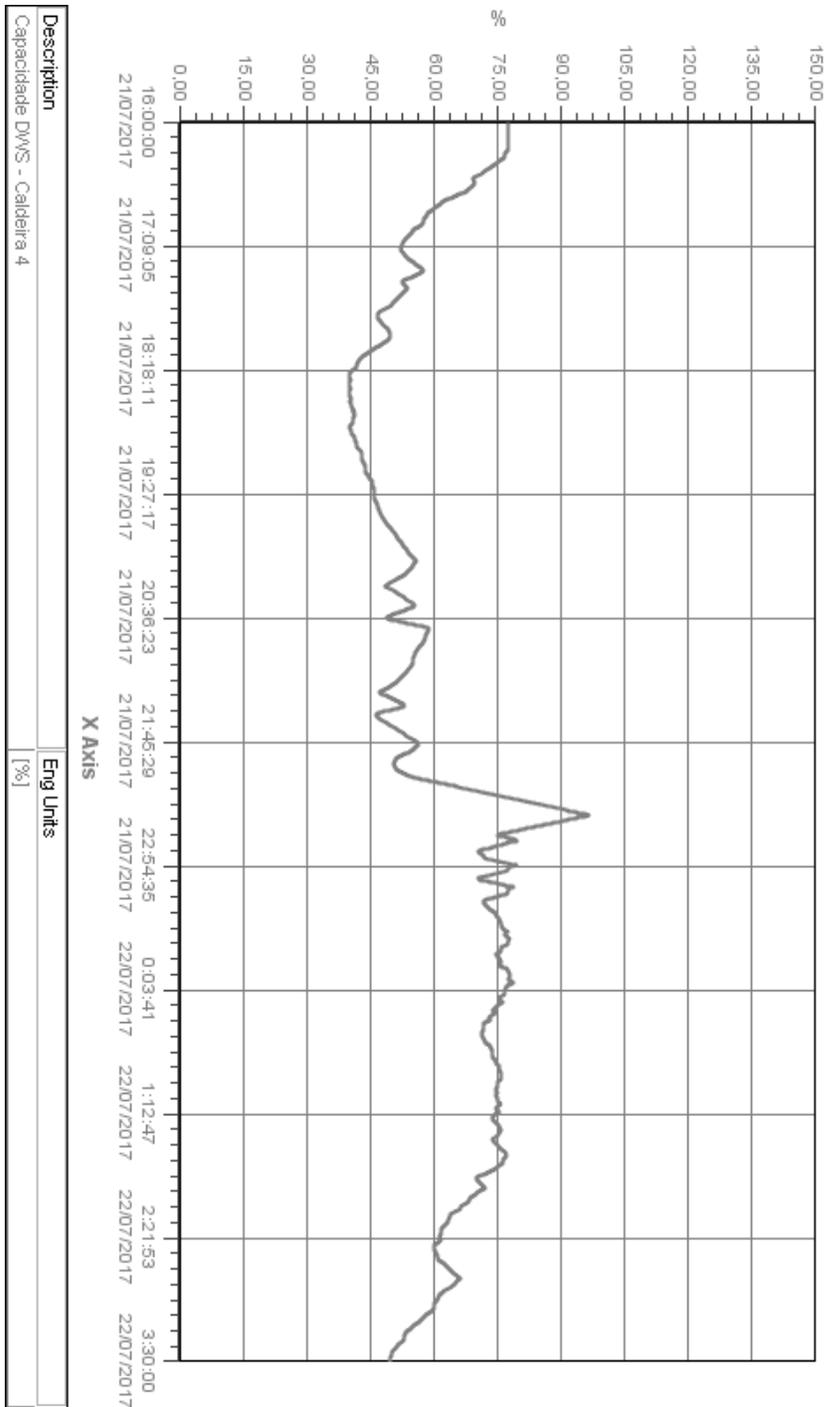


Gráfico 5 - Variação da capacidade de trabalho da Grelha DWS

Fonte: Gerado pelo equipamento

### 3.3 CAPACIDADE MÉDIA DWS

Na caldeira de água superaquecida, a combustão da biomassa ocorre na grelha DWS. Quando a caldeira está desligada, a capacidade da grelha é de 0%. Ao iniciar a caldeira, a alimentação da grelha com combustível também começa, sendo a biomassa empurrada para interior da câmara de combustão através de um *pusher*, que nada mais é do que um pistão hidráulico. A capacidade da caldeira vai de 0% para 40%, e se mantém assim até que determinada temperatura seja atingida no interior da câmara de combustão. Sendo estabelecidas as condições iniciais, a capacidade da caldeira passa a aumentar de acordo com a demanda de energia dos processos da indústria, sendo possível atingir 100%. Quanto maior a capacidade da grelha, maior será a energia gerada e também maior será o consumo de biomassa. Então, para este trabalho, o termo capacidade DWS se refere à capacidade de trabalho da caldeira.

Os dados da capacidade DWS foram retirados do próprio supervisório da caldeira, onde, primeiramente, os valores são fornecidos através de um gráfico, porém, depois, podem ser transferidos para uma planilha eletrônica. A coleta de dados é feita a cada 10 segundos por instrumentos instalados na própria caldeira, estes então são transmitidos para o supervisório. Para o gráfico 5, temos a variação da capacidade DWS por um período de 11h30min, o que nos dá um total de 4140 valores coletados neste intervalo de tempo, o que resulta em um planilha com 4140 linhas.

	A	B	C
1	TimeStamp	Time	Capacidade DWS
2	21/07/2017	16:00:00	77,42
3	21/07/2017	16:00:10	77,42
4	21/07/2017	16:00:20	77,42
5	21/07/2017	16:00:30	77,42
6	21/07/2017	16:00:40	77,42
7	21/07/2017	16:00:50	77,42
8	21/07/2017	16:01:00	77,42
9	21/07/2017	16:01:10	77,42
10	21/07/2017	16:01:20	77,42
11	21/07/2017	16:01:30	77,42
12	21/07/2017	16:01:40	77,42
13	21/07/2017	16:01:50	77,42
14	21/07/2017	16:02:00	77,42
15	21/07/2017	16:02:10	77,42
16	21/07/2017	16:02:20	77,42
17	21/07/2017	16:02:30	77,42
18	21/07/2017	16:02:40	77,42
19	21/07/2017	16:02:50	77,42
20	21/07/2017	16:03:00	77,42
21	21/07/2017	16:03:10	77,42
22	21/07/2017	16:03:20	77,42
23	21/07/2017	16:03:30	77,42

Figura 9 - Exemplo de dados exportados para um planilha eletrônica

Fonte: Gerado pelo equipamento

É possível ver na figura 9 a planilha com os dados exportados, sendo esta composta pela data e hora em que os dados foram coletados, nas colunas A e B respectivamente. E também, na coluna C, se encontram os valores em porcentagem da capacidade da grelha. Então, para obter-se a capacidade média em que a caldeira trabalhou utilizou-se a seguinte equação:

$$CMD = SG / n$$

Onde:

CMD = Capacidade média DWS, em %;

SG = Soma dos valores da capacidade DWS diferente de 0, em %;

n = número de valores somados

### 3.4 CAPACIDADE MÉDIA PSS

O processo de coleta dos dados da capacidade média do PSS foi exatamente o mesmo que para a capacidade média DWS. Ou seja, primeiramente obteve-se o gráfico com a variação da capacidade dos queimadores de pó, e depois exportou-se os dados para uma planilha eletrônica. O gráfico 6 mostra o gráfico da capacidade PSS juntamente com o da capacidade DWS, sendo possível ver que o sistema de queima de pó entra em funcionamento apenas em alguns momentos. Mesmo a capacidade do PSS sendo um valor constante escolhido pelos operadores da caldeira, no gráfico é visível que há uma variação deste valor. Inicialmente os queimadores de pó estavam trabalhando com uma capacidade de 70%, porém no final da análise a capacidade era de 45%. Assim, para o cálculo da capacidade média PSS, foram utilizados apenas os valores diferente de 0, ou seja, quando os queimadores de pó estavam ligados. A equação utilizada foi:

$$\text{CMP} = \text{SP} / n$$

Onde:

CMP = Capacidade média PSS, em %;

SP = Soma dos valores da capacidade PSS diferente de 0, em %;

n = número de valores somados.

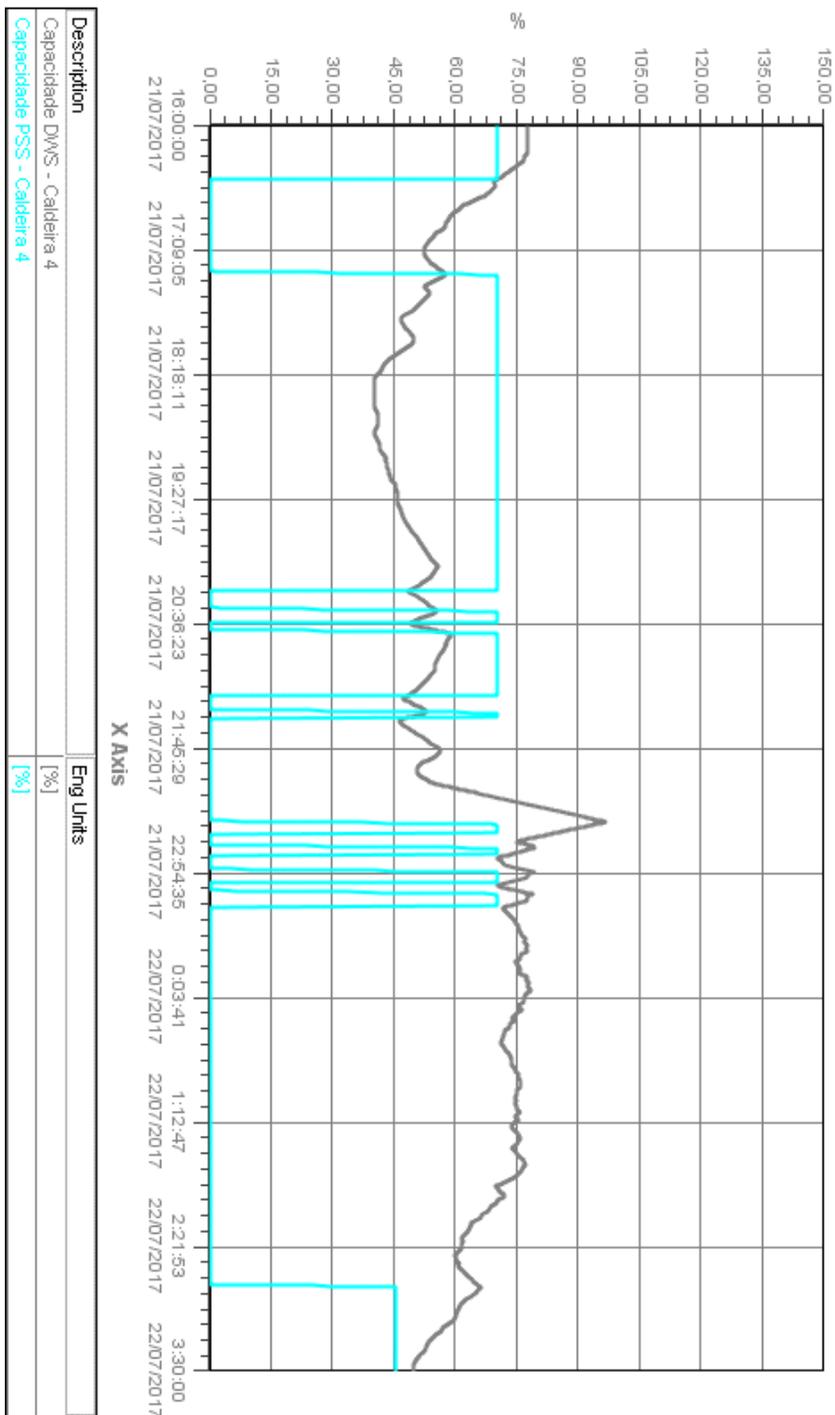


Gráfico 6 - Variação da capacidade da Grelha DWS e do PSS  
 Fonte: Gerado pelo equipamento

## 3.5 HORAS DE FUNCIONAMENTO DO PSS

No gráfico 6 pode-se ver que durante o período de análise, os queimadores de pó não permanecem ligados todo o tempo. Então, utilizando a planilha eletrônica com os dados exportados da variação da capacidade DWS e PSS, foi possível encontrar a quantidade de horas que os queimadores de pó permaneceram em funcionamento.

## 3.6 ENERGIA REAL MÉDIA

O termo energia real, refere-se à energia instantânea que a caldeira está gerando. Esta energia é medida em função da vazão mássica de água superaquecida e da variação de temperatura entre a água que sai da caldeira e a que retorna. Deste modo, temos a fórmula da energia real:

$$Q = \mu \cdot (T_s - T_e)$$

Onde:

Q = Energia real instantânea, em MWh;

$\mu$  = Vazão mássica de água, m<sup>3</sup>/kg;

T<sub>s</sub> = Temperatura de saída da água, em °C;

T<sub>e</sub> = Temperatura de retorno da água, em °C.

Quando a caldeira desliga por períodos não muito longos, as bombas que mantem a água circulando continuam ligadas, o que faz com que ocorra troca de calor entre a água que flui nas tubulações e o calor ainda contido no interior da caldeira, principalmente na zona de refração. Deste modo, o medidor de energia detecta um fluxo de água e uma variação de temperatura, e indica que há uma geração de energia. E, de fato, essa geração existe, mas devido ao material refratário da caldeira, e não à capacidade DWS ou PSS. Por este motivo, o cálculo da geração de energia real média levou em consideração apenas os

momentos em que a caldeira estivesse ligada durante o período de análise. Assim, utilizou-se a seguinte fórmula:

$$Q_m = SE / n$$

onde:

$Q_m$  = Energia real média, em MW;

SE = Soma dos valores energia real onde a capacidade DWS fosse diferente de 0, em %;

n = número de valores somados.

O método de obtenção dos valores da energia real foi mesmo utilizado nas secções 3.2 e 3.3.

O gráfico 7 mostra os valores da variação da capacidade DWS e PSS, juntamente com a energia real da caldeira 4 no mesmo período de análise dos exemplos anteriores. É visível o aumento da capacidade da caldeira nos momentos em que há uma maior geração de energia. O gráfico também mostra como o PSS é acionado apenas quando a caldeira precisa atingir e manter uma temperatura mais elevada para atender a demanda de energia.

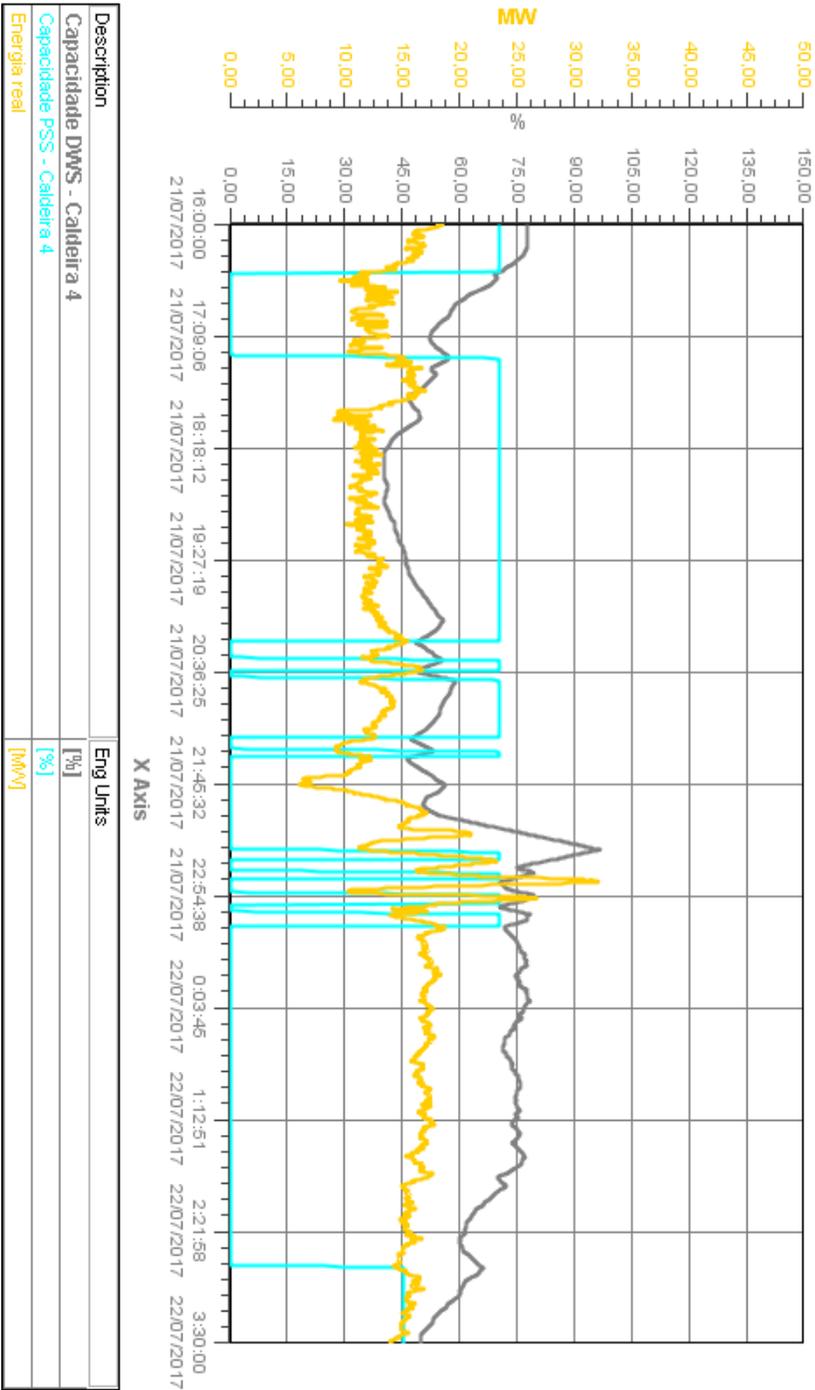


Gráfico 7 - Variação da Grelha DWS, do PSS e da Energia Real

Fonte: Gerado pelo equipamento

### 3.7 TOTAL DE MOVIMENTOS DO PUSHER

O pistão hidráulico que empurra o combustível para ser consumido na grelha da caldeira é denominado *pusher*. O monitoramento da posição do *pusher* é feito constantemente, e é possível fazer o seu acompanhamento através do supervisório da caldeira. Sua posição varia de 0 a 100, e quando ele atinge o final do seu curso, um volume total de  $1,5\text{m}^3$  é empurrado para dentro da fornalha. Seu avanço é lento, enquanto o recuo é extremamente veloz, e só há reposição de combustível quando o pistão se encontra totalmente recuado. O gráfico 8 representa o gráfico de movimentação do *pusher* da caldeira 4 retirado do supervisório da caldeira, durante o mesmo período de análise que vem sendo utilizado.

Cada ponto de máximo mostra que o *pusher* atingiu o final do curso. É possível ver como o pistão avança lentamente, fazendo uma reta inclinada no gráfico, e como recua rápido, levando a uma reta praticamente vertical. Somando-se o número de vezes em que o gráfico atinge um máximo, tem-se então o total de movimentos que o *pusher* realizou durante o período de análise. Este valor é importante pois indica a quantidade de biomassa total consumida durante a análise.



### 3.8 TOTAL DE ENERGIA GERADA

Após encontrar a energia real média, a capacidade média DWS e a quantidade de horas que a caldeira permaneceu ligada durante uma análise, é possível saber o total de energia gerada pela caldeira neste período. Deste modo, temos que:

$$Q_t = Q_m \cdot (\text{horas funcionamento DWS})$$

Onde:

$$Q_t = \text{Total de energia gerada, em MWh.}$$

### 3.9 TOTAL DE ENERGIA GERADO NA DWS E NO PSS

Quando operando em 100%, os queimadores de pó podem gerar até 5MWh. Assim, para uma análise do desempenho da caldeira correspondente ao consumo de biomassa apenas na grelha, é necessário separar o total de energia gerado no PSS e na DWS. A formula utilizada para encontrar a energia gerada no PSS foi:

$$Q_{PSS} = [(5 \cdot \text{CMP})/100] \cdot (\text{horas de funcionamento PSS})$$

Onde:

$$Q_{PSS} = \text{Total de energia gerada no PSS, em MWh.}$$

Para energia gerada separadamente da grelha DWS, tem-se:

$$Q_{DWS} = Q_t - Q_{PSS}$$

Onde:

$$Q_{DWS} = \text{Total de energia gerado na DWS, em MWh.}$$

### 3.10 TOTAL DE BIOMASSA CONSUMIDA

Os dados do movimento do *pusher* podem ser exportados para uma planilha eletrônica, da mesma forma que as capacidades DWS e PSS. Esta planilha contém a posição do *pusher* a cada segundo, expressas em valores que vão de 0 a 1. Porém, pelas tabelas de movimento do *pusher* de todos os dados selecionados para este estudo, observou-se que o pistão na maioria das vezes recua na posição 0,922, e não na posição 1 que deveria indicar o final do curso. Isso faz com que a massa de biomassa empurrada seja levemente menor do que o esperado, visto que:

$$m = d \cdot V$$

Onde:

$d$  = densidade, em  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

$V$  = volume, em  $\text{m}^3$ ;

$m$  = massa, em kg.

O volume total da caixa de armazenamento do *pusher* é de  $1,5 \text{ m}^3$ , e a densidade média do cavaco utilizado nas análises é de  $321,4 \text{ kg}/\text{m}^3$ , enquanto a densidade média da casca é de  $297 \text{ kg}/\text{m}^3$  (dados fornecidos pela própria indústria). Com estes valores, a massa de cavaco e casca consumida por movimento do *pusher* seria de 0,4821 toneladas e 0,4455 toneladas respectivamente, mas como o pistão na grande maioria das vezes atinge apenas 92,2% do total do seu curso, devemos multiplicar esse valor pela massa encontrada. Deste modo, o meio encontrado para calcular a massa de combustível consumido pela caldeira durante um período de análise foi:

$$m_{\text{tcavaco}} = (\text{total de movimentos do pusher}) \cdot m_{\text{cavaco}} \cdot 0,922$$

$$m_{\text{tcasca}} = (\text{total de movimentos do pusher}) \cdot m_{\text{casca}} \cdot 0,922$$

Onde:

$m_{\text{tcavaco}}$  = massa total de cavaco consumido, em ton;

$m_{\text{tcasca}}$  = massa total de casca consumida, em ton;

$m_{\text{cavaco}}$  = massa de cavaco por movimento do pusher, em kg;

$m_{\text{casca}}$  = massa de casca por movimento do pusher, em kg.

### 3.11 RELAÇÃO ENTRE A ENERGIA GERADA E O CONSUMO DE BIOMASSA

Após a coleta de todos os dados citados acima, se torna viável encontrar a relação que mostra quantos MWh a caldeira consegue gerar por tonelada de biomassa consumida. Com este valor é possível ver o desempenho de cada caldeira separada, levando em conta apenas a energia gerada e o consumo de biomassa quando as caldeiras estão trabalhando. Assim, utilizou-se a equação a seguir em todas as análises realizadas:

$$E = Q_{\text{DWS}} / m_t$$

Onde:

E = Rendimento da caldeira expressa em, MWh/ton.

### 3.12 RELAÇÃO REAIS GASTO POR ENERGIA GERADA

Um dos principais objetivos de uma empresa ao gerar sua própria energia, é a minimização de seus custos. Então, para que o combustível alternativo se mostre totalmente viável, ele precisa se mostrar também econômico. A tonelada do cavaco da madeira pinus custa em média para a empresa R\$ 156,00 enquanto a tonelada da casca da madeira é comprada por R\$ 60,00. Logo, a relação de reais gastos por MWh gerado irá revelar se é provável a utilização do combustível alternativo nas caldeiras da indústria. Nos estudos realizados, utilizou-se a seguinte fórmulas para obter-se esta relação:

$$R = P / E$$

Onde:

R = Relação reais gastos por energia gerada, em reais/MWh;

P = Preço do cavaco ou da casca, em reais/ton;

## 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esta secção tem como objetivo expor os valores obtidos nos experimentos realizados neste trabalho, explicando separadamente como cada item influenciou no resultado final. No total foram realizados 5 experimentos, tanto para o cavaco da madeira pinus como para a casca da mesma.

### 4.1 EXPOSIÇÃO DOS RESULTADOS

O sistema de geração de energia estudado é composto por quatro caldeiras, sendo que o número de caldeiras trabalhando e suas respectivas capacidades DWS são diretamente relacionadas com a demanda de energia dos processos industriais. A constante mudança na demanda energética, acaba afetando a eficiência dos geradores, pelo fato de as caldeiras não trabalharem de modo constante por longos períodos de tempo. Entretanto, é muito importante ressaltar, que o enfoque deste trabalho é apenas a comparação entre o combustível já utilizado pela indústria e o combustível alternativo, com objetivo de mostrar se a casca da madeira pinus é economicamente viável, independentemente da eficiência da caldeira durante testes.

Dividiu-se em dois grupos os dados obtidos nas análises realizadas. A tabela 3 mostra os valores para as cinco análises efetuadas, com o cavaco da madeira pinus sendo utilizado como combustível na caldeira. Enquanto a tabela 4 traz os resultados obtidos para a queima da casca da madeira pinus. Todos os grá-

ficos das análises abaixo estão nos apêndices A e B.

Tabela 3 – Resultados obtidos para os testes utilizando o Cavaco da madeira Pinus como combustível

Itens Verificados	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Período de Análise	09h10min	07h55min	06h	06h30min	06h
Capacidade DWS Média (%)	73,23	69,52	57,58	61,68	64,27
Capacidade PSS Média (%)	66	59,83	73,04	72,67	70,00
Horas de funcionamento do PSS	05h45min	05h10min	05h35	06h17min	06h
Energia Real Média (MW)	14,8	16,36	14,5	16,32	12,43
Total de Movimentos do Pusher	94	88	55	69	74
Total de Energia Gerada (MWh)	135,67	129,52	87,00	106,08	74,56
Total de Energia Gerada no PSS (MWh)	18,99	15,47	20,40	22,87	21,00
Total de Energia Gerada na DWS (MWh)	116,67	114,04	66,60	83,21	53,56
Total de Combustível Consumido (ton)	41,78	39,12	24,45	30,67	32,89
Total Gerado pelo Total Consumido (MWh/ton)	2,79	2,92	2,72	2,71	1,63
Custo do MWh gerado (R\$/MWh)	55,87	53,51	57,26	57,50	95,80

Fonte – Autoria própria

Tabela 4 - Resultados obtidos para os testes utilizando a Casca da madeira Pinus como combustível

Itens Verificados	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Período de Análise	07h30min	11h30min	05h50min	08h	10h
Capacidade DWS Média (%)	81,44	61,1	69,81	64,43	72,02
Capacidade PSS Média (%)	49,86	64,58	49,23	66,97	78,31
Horas de funcionamento do PSS	03h52min	05h34min	04h44min	07h35min	08h56min
Energia Real Média (MW)	14,36	14,53	10,46	12,25	18,43
Total de Movimentos do Pusher	93	149	65	94	126
Total de Energia Gerada (MWh)	107,70	167,10	61,02	97,98	184,30
Total de Energia Gerada no PSS (MWh)	9,65	18,00	11,68	25,41	34,98
Total de Energia Gerada na DWS (MWh)	98,05	149,09	49,34	72,57	149,32
Total de Combustível Consumido (ton)	38,20	61,20	26,70	38,61	55,41
Total Gerado pelo Total Consumido (MWh/ton)	2,57	2,44	1,85	1,88	2,69
Custo do MWh gerado (R\$/MWh)	23,37	24,63	32,47	31,92	22,27

Fonte - Autoria própria

## 4.2 CONSUMO x EFICIÊNCIA

Antes de compararmos as eficiências enérgicas dos combustíveis, optou-se primeiramente por mostrar como a variação do comportamento da caldeira durante os testes teve impacto nos resultados obtidos. Para isso, foi preciso encontrar as relações de movimentos do *pusher*, o consumo de combustível e a quantidade de energia gerada na DWS por hora para todas as análises realizadas. Estes valores foram encontrados da seguinte forma:

$$\text{MPH} = \text{TMP} / \text{PA}$$

$$\text{CCH} = \text{TCC} / \text{PA}$$

$$\text{EGH} = \text{TEG} / \text{PA}$$

Onde:

- MPH = Número de movimentos por hora do pusher;
- TMP = Total de movimentos do pusher;
- CCH = Consumo de combustível por hora, em ton/h;
- TCC = Total de Combustível Consumido, em ton;
- EGH = Total de Energia Gerada na DWS por hora, em MW;
- TEG = Total de Energia Gerada na DWS, em MWh;
- PA = Período de análise .

Tabela 5 – Valores do MPH, CCH e EGH para o Cavaco da madeira Pinus

Itens Verificados	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Número de movimentos do pusher por hora	10,25	11,12	9,17	10,62	12,33
Consumo de combustível por hora(ton/h)	4,56	4,94	4,08	4,72	5,48
Capacidade DWS Média (%)	73,23	69,52	57,58	61,68	64,27
Total de Energia Gerada na DWS por hora (MW)	12,73	14,41	11,10	12,80	8,93
Total Gerado pelo Total Consumido (MWh/ton)	2,79	2,92	2,72	2,71	1,63

Fonte – Autoria própria

Tabela 6 – Valores do MPH, CCH e EGH para a Casca da madeira Pinus

Itens Verificados	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Número de movimentos do pusher por hora	12,4	12,97	11,14	11,75	12,6
Consumo de combustível por hora (ton/h)	5,09	5,32	4,58	4,83	5,54
Capacidade DWS Média (%)	81,44	61,1	69,81	64,43	72,02
Total de Energia Gerada na DWS por hora (MW)	13,07	12,96	8,46	9,07	14,93
Total Gerado pelo Total Consumido (MWh/ton)	2,57	2,44	1,85	1,88	2,69

Fonte – Autoria própria

O consumo de combustível está diretamente ligado a quantidade de movimentos que o *pusher* realizou. Das tabelas 5 e 6 podemos ver que quanto maior o número de movimentos do *pusher* por hora, maior é também a quantidade de combustível queimado, tanto para o cavaco como para a casca. Entretanto, a capacidade em que a caldeira trabalhou já não afeta de modo linear o consumo e a eficiência da caldeira. Além da variação da demanda energética já citada, Isto também se deve ao fato do conjunto das caldeiras da empresa trabalharem de formas distintas ao longo do tempo. Para a casca da madeira, pode-se comparar as análises 1 e 2. Na primeira, obtive-se uma Capacidade Média DWS de 81,44% durante as 07h30min de teste, para um consumo de 5,09 toneladas de casca por hora. Na segunda análise, a Capacidade Média DWS foi de 61,1%, mas o consumo foi de 5,32 ton/h. Neste caso, uma menor capacidade de trabalho levou a um maior gasto de combustível para uma geração de energia praticamente igual, 13,07 MW para a análise

se 1 e 12,96 MW para a 2.

Durante as análises, não houve a oportunidade de manter apenas a caldeira 4 trabalhando, pois o processo acontece de modo contínuo e ininterrupto e a demanda energética precisa sempre ser atendida. Isso fez com que os testes ocorressem em diferentes condições. Em alguns casos, no início da análise a caldeira 4 trabalhava juntamente com mais duas, mas ao decorrer do teste uma acabou sendo desligada ou então foi necessário a adição de outra caldeira. Isso faz com a caldeira aumente ou diminua sua Capacidade DWS, porém conseguindo manter a mesma quantia de energia gerada, visto que esta é medida em função da vazão mássica de água quente ( $\dot{m}$ ) e da diferença de temperatura ( $T_f - T_i$ ). Outro cenário encontrado durante os testes, foi o de duas caldeiras trabalhando com a mesma Capacidade DWS, com temperaturas de saída e retorno iguais para ambas, mas com uma vazão mássica diferente. Isso faz com que a caldeira que possui maior vazão, tenha também uma maior geração de energia mas operando na mesma capacidade de trabalho, influenciando diretamente na eficiência da caldeira. Para exemplificar, os gráficos a seguir mostram a relação MWh/ton em função da Capacidade Média DWS

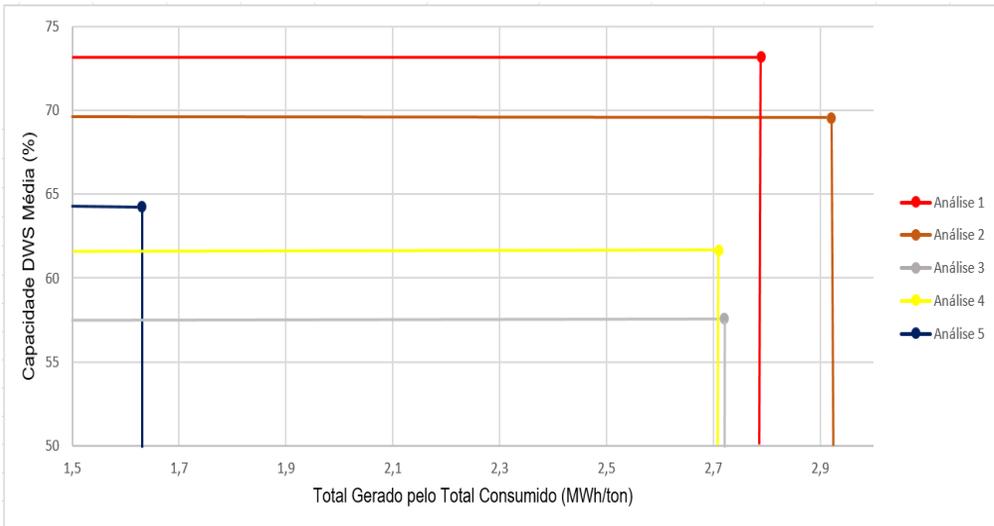


Gráfico 9 - Potencial energético X Capacidade Média DWS para o Cavaco da madeira Pinus  
 Fonte: Autoria própria

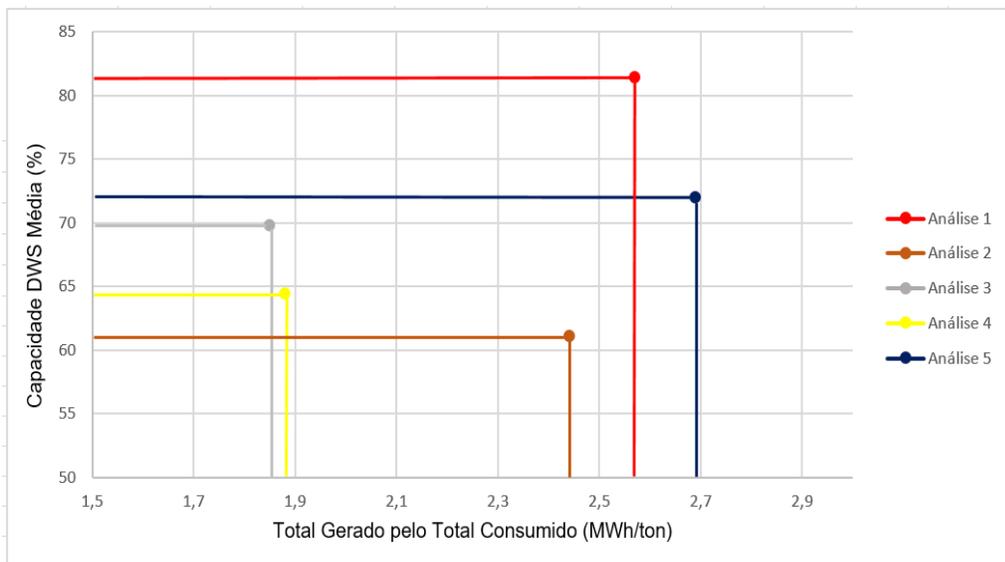


Gráfico 10 - Potencial energético X Capacidade Média DWS para o Cavaco da madeira Pinus  
Fonte: Autoria própria

O objetivo destes gráficos é mostrar que a eficiência da caldeira não depende apenas do combustível ou da capacidade em que ela trabalha, mas sim de vários fatores como o modo que ela opera e também da demanda energética instantânea. Tanto para o cavaco como para a casca da madeira, observou-se um comportamento irregular ao tentar fazer a correlação entre a eficiência da caldeira expressa em MWh/ton e a Capacidade Média DWS em que trabalhou. No gráfico 9, pode-se ver que as análises 3 e 4 obtiveram uma eficiência similar, 2,72 MWh/ton e 2,71 MWh/ton respectivamente. Entretanto, os valores de suas Capacidades Média DWS diferem em 12%. Ao analisar o gráfico 10, observa-se que para a casca o mesmo ocorre para as análises 3 e 4. Todavia deve-se voltar o foco para o objetivo principal que é a viabilidade do combustível alternativo

## 4.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dois principais pontos que indicam a viabilidade de um combustível são o quanto ele consegue gerar de energia por unidade de massa consumida (MWh/ton) e quanto custa para produzir essa energia (R\$/MWh). Assim, separa-se na tabela 7 os valores obtidos nos experimentos realizados com o cavaco e a casca da madeira pinus para que possamos comparar o desempenho dos dois combustíveis.

Tabela 7 – Indicadores de Viabilidade dos combustíveis

Itens Verificados	Análise 1	Análise 2	Análise 3	Análise 4	Análise 5
Total Gerado pelo Total Consumido (CAVACO) (MWh/ton)	2,79	2,92	2,72	2,71	1,63
Custo do MWh gerado (CAVACO) (R\$/MWh)	55,87	53,51	57,26	57,50	95,80
Total Gerado pelo Total Consumido (CASCA) (MWh/ton)	2,57	2,44	1,85	1,88	2,69
Custo do MWh gerado (CASCA) (R\$/MWh)	23,37	24,63	32,47	31,92	22,27

**Fonte: Autoria própria**

O primeiro item que cabe a comparação é o total gerado pelo total consumido. O gráfico a seguir mostra o comportamento de ambos combustíveis nas cinco análises realizadas. Observa-se que o cavaco da madeira pinus apresentou um melhor desempenho nos testes, onde seu potencial energético se manteve acima de 2,71 MWh/ton, exceto na análise 5, que obteve o pior desempenho dentre todos os experimentos. Entretanto, os valores encontrados para a casca do pinus foram totalmente satisfatórios. O combustível alternativo mostrou-se capaz de suprir as necessidades energéticas da Indústria. Nas

análises 1, 2 e 5, o potencial energético da casca atingiu valores próximos ao do cavaco. E mesmo com os resultados dos testes 3 e 4, a casca do pinus ficou com uma média de 2,29 MWh/ton enquanto o cavaco alcançou um valor médio de 2,55 MWh/ton, sendo assim, 10,2% menos eficiente.

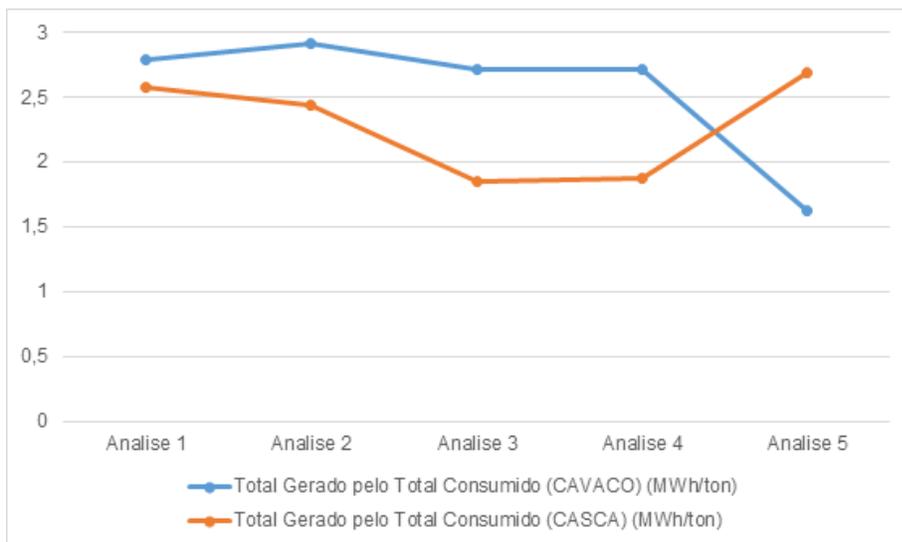


Gráfico 11 - Variação do potencial energético para CASCA e para o CAVACO  
Autor: Autoria própria

Porém, o que mais fortalece a viabilidade do combustível alternativo, é quando compara-se os valores do custo do MWh. Ao se observar novamente a média dos resultados obtidos, da tabela 7, temos que, para gerar 1 MWh através da queima da cascas da madeira pinus, foram gastos R\$ 26,93. Enquanto que para o cavaco, este valor foi de 63,99 R\$/MWh. Neste caso, a casca mostrou-se 57,91% mais “econômica” que o combustível já utilizado pela indústria estudada. O gráfico 12 dispõe os resultados do custo do MWh para todas as análises aqui realizadas.

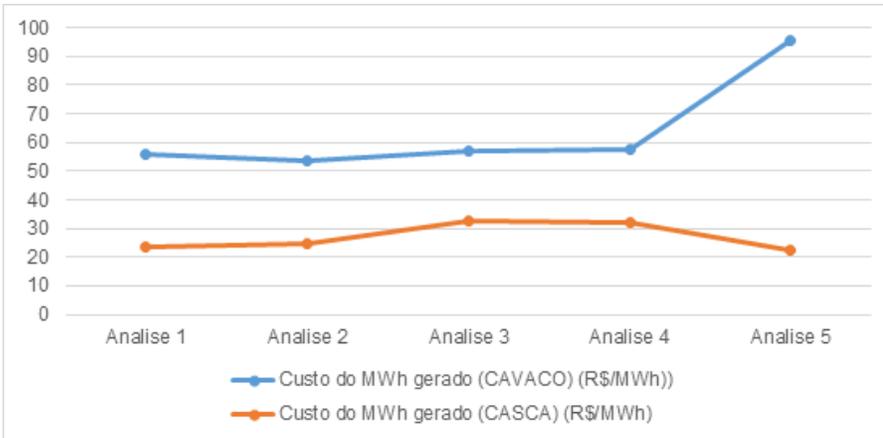


Gráfico 12 - Valores do R\$/MWh para a CASCA e para o CAVACO  
 Fonte: Autoria própria

Para exemplificar os dois valores em porcentagem obtidos, suponha-se que a Caldeira 4 trabalhou por quatro horas com o cavaco como combustível. Sendo sua eficiência energética 2,55 MWh/ton, a quantia de energia gerada teria sido de 10,2 MWh, com um consumo de 4 toneladas de biomassa e assim tendo um gasto de R\$ 652,7. Como a casca do pinus possui um potencial energético inferior, para gerar os 10,2 MWh no mesmo período de tempo, seria necessário consumir um total de 4,45 toneladas biomassa, com um gasto de R\$ 274,69. Neste caso, 0,5 tonelada a mais de combustível teria sido consumida, porém, com uma economia de R\$ 378,00. A curto prazo esta diferença parece irrisória, mas ao se pensar em dias e meses os valores são muito mais significativos.

## 5. CONCLUSÃO

Devido ao atual cenário econômico e ambiental em que estamos vivendo, empresas de pequeno, médio e grande porte estão tentando ao máximo diminuir seus gastos e focar na utilização de fontes de energia renováveis. Seguindo esta linha de pensamento, o presente trabalho realizou estudos para verificar a viabilidade de um combustível alternativo para caldeiras de biomassa.

As análises aqui feitas tiveram o intuito de possibilitar uma comparação entre o combustível já utilizado pela presente indústria (cavaco da madeira pinus) e o possível combustível alternativo (casca da madeira pinus). No total foram realizados 10 experimentos, sendo 5 para cada material. O objetivo dos testes, foi verificar se a casca seria capaz de suprir a demanda energética dos processos industriais, analisando e comparando o potencial energético de ambos os combustíveis, como também o custo do MWh gerado para cada.

Os resultados obtidos foram extremamente satisfatórios. A casca da madeira mostrou-se um pouco menos eficiente, com um potencial energético de 2,29 MWh/ton, enquanto para o cavaco encontramos 2,55 MWh/ton. Pelo fato de esta diferença ser de apenas 0,26 MWh/ton, acredita-se que a casca da madeira pinus tenha totais condições de suprir a demanda energética da Indústria.

Mas o fator que fortalece e garante a viabilidade do combustível alternativo, é o quão mais econômico, em termos financeiros, ele se mostrou em relação ao cavaco. O valor encontrado para a casca foi de 26,93 R\$/MWh. Para o cavaco do pinus, o resultado encontrado foi de 63,99 R\$/MWh. A diferença entre os dois é de R\$37,06, o que faz com que a casca seja até duas vezes mais econômica que o cavaco.

Por fim, temos a confirmação da casca da madeira pinus como um possível combustível alternativo para caldeira de biomassa. A casca mostrou ter um potencial energético suficiente para as necessidades da empresa citada com um custo muito inferior em relação ao combustível já utilizado. Para futuros

estudos, caberia um estudo mais aprofundado das caldeiras, visando encontrar um padrão de funcionamento que otimizasse suas eficiências.

## REFERÊNCIAS

Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de Energia Elétrica**. Disponível em: < <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm> > Acesso em: 20 ago2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BIZZO, Waldir A.; **Geração, Distribuição e Utilização de Vapor**. Campinas: Editora da UNICAMP, 2013.

BOTELHO, Manoel H. C.; BIFANO, H. M.; **Operação de Caldeiras – Gerenciamento, controle e manutenção**. 1ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 2011.

BRASIL, Ministério do Trabalho e Emprego. **NR 13** – Caldeiras, Vasos de Pressão e Tubulação. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2017. Disponível em: < <http://trabalho.gov.br/images/Documentos/SST/NR/NR13.pdf> >. Acesso em: 12 ago.2017

BRASIL. **Fontes de Energia Elétrica no Brasil, Energia cada vez mais renovável**. Brasília, DF: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2016.

BRASIL. **Inventário Energético de Resíduos Rurais**. Rio de Janeiro, RJ: Ministério de Minas e Energia, 2014. 47p.

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A.; **Termodinâmica**. 7 ed. São Paulo: AMGH Editora LTDA, 2013.

CORTEZ, Luis A. B C.; LORA Electo E. S.; GÓMEZ E. O.; **Biomassa Para Energia**. 1 ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2008.

FRANCISCO, Pereira F.; **Estudo Termoquímico da Queima de Combustíveis em Caldeira Usando Balanço de Energia**. 2012. 148f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia de Energia) – Centro Federal de Educação Tecnologia de Minas Gerais, Universidade Federal de São João Del-Rei, 2012.

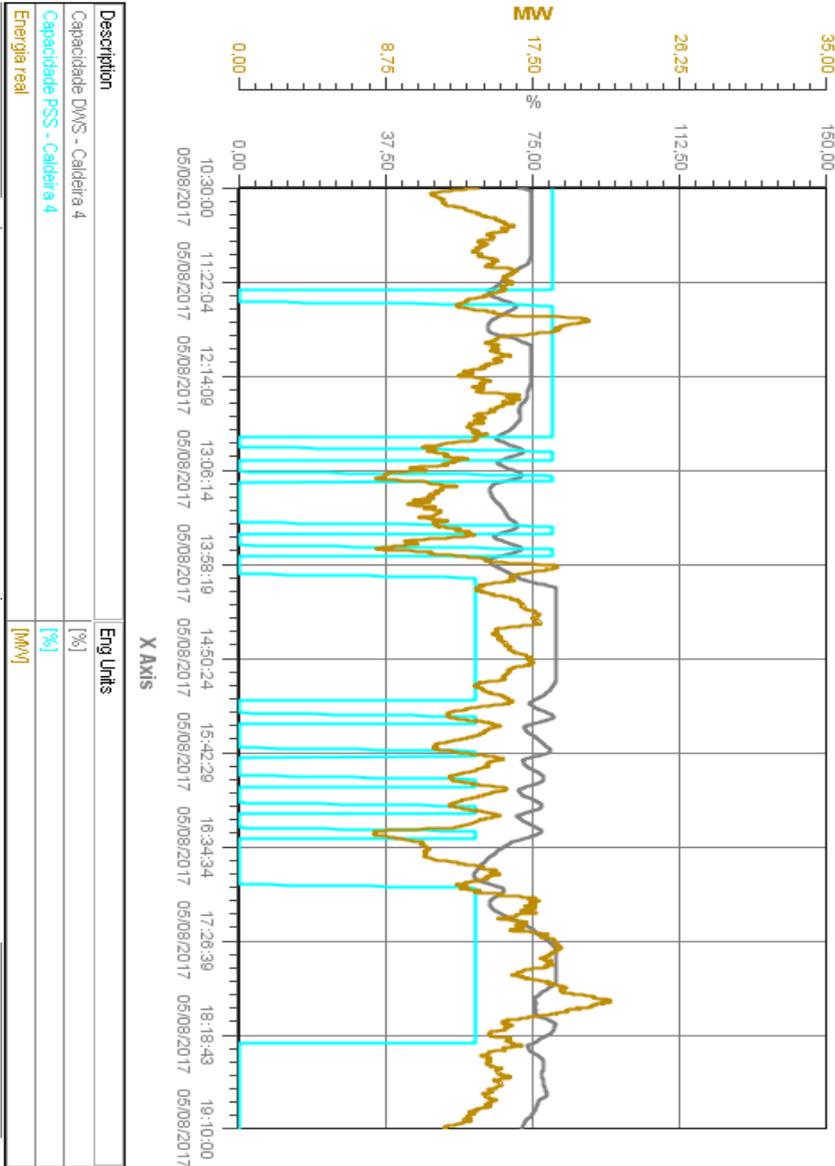
MORAN M. J.; SHAPIRO, H. N.; **Princípios da Termodinâmica para Engenharia**. 6 ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2009.

OVEREND, Ralph P.; **Renewable Energy Sources Charged with Energy From the Sun and Originated from Earth: *Direct Combustion of Biomass***. 1 vol. Oxford: Eolss Published CO. Ltd, 2009.

SALUM. A. D.; **Eficiência Energética em Sistema de Combustão de Caldeira**. 2011. 44 f. Tese (Pós-Graduação em Engenharia Industrial) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

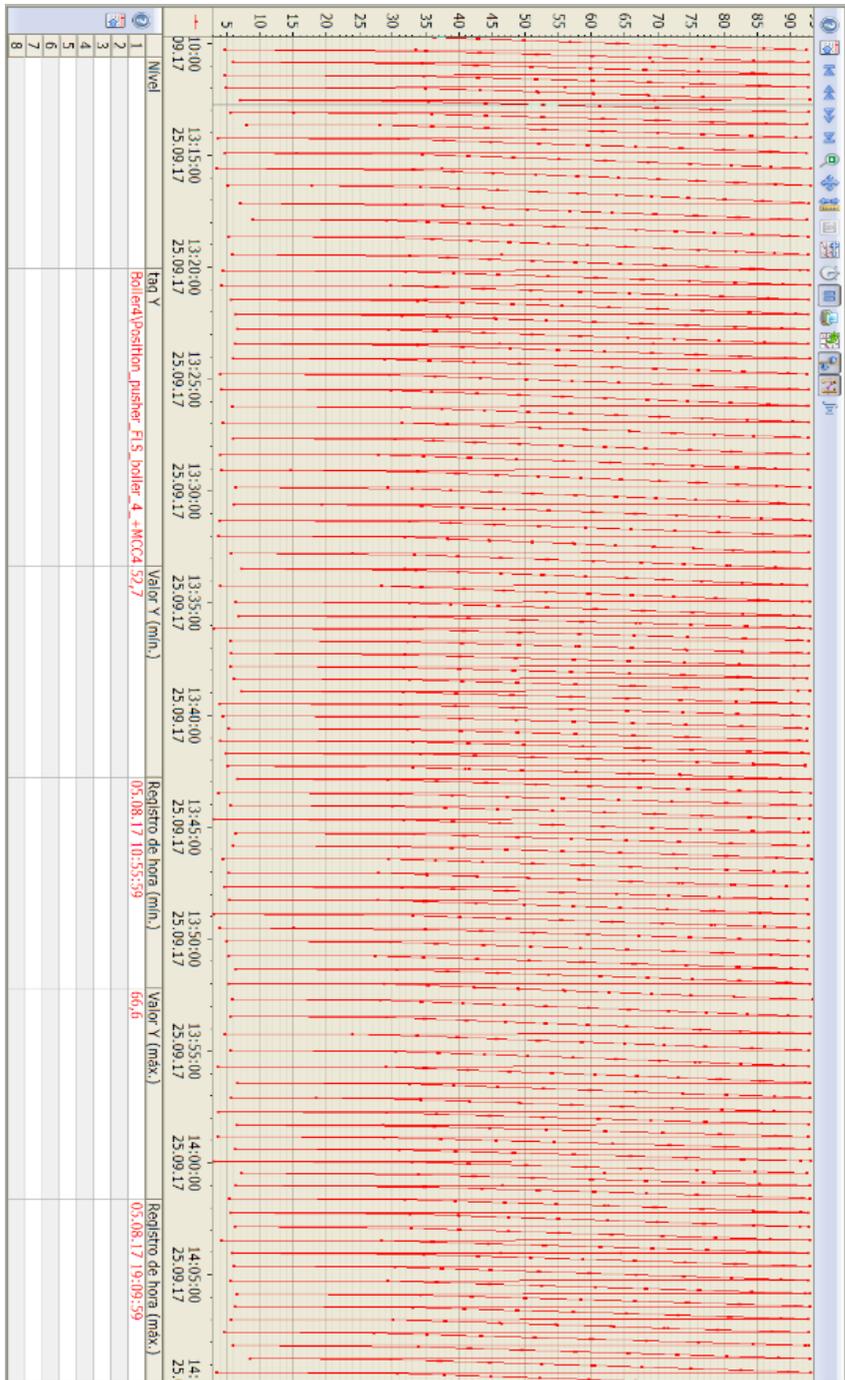
# APÊNDICE A – Gráficos das análises do cavaco da madeira pinus

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 1.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

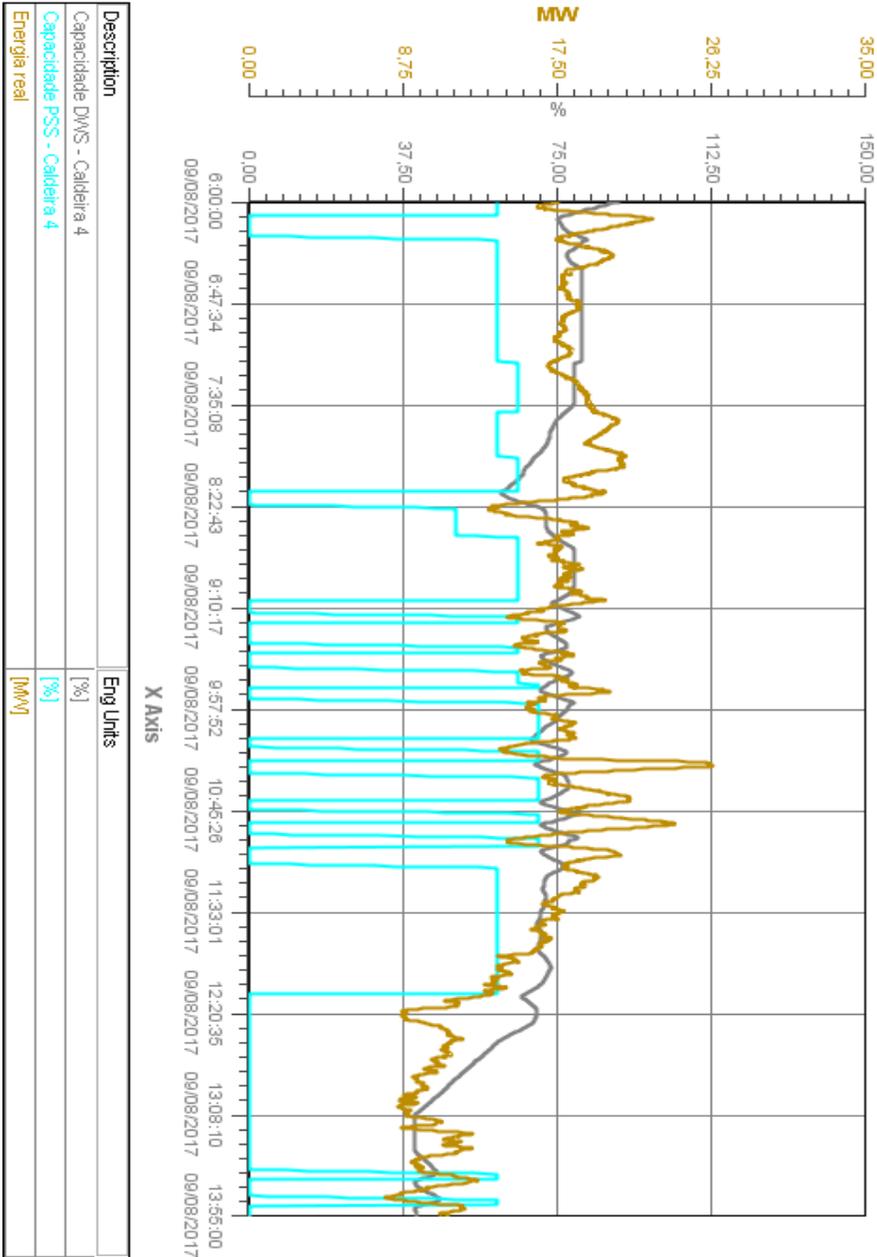
Fonte: Autoria própria



Varição da posição do pusher da Caldeira 4

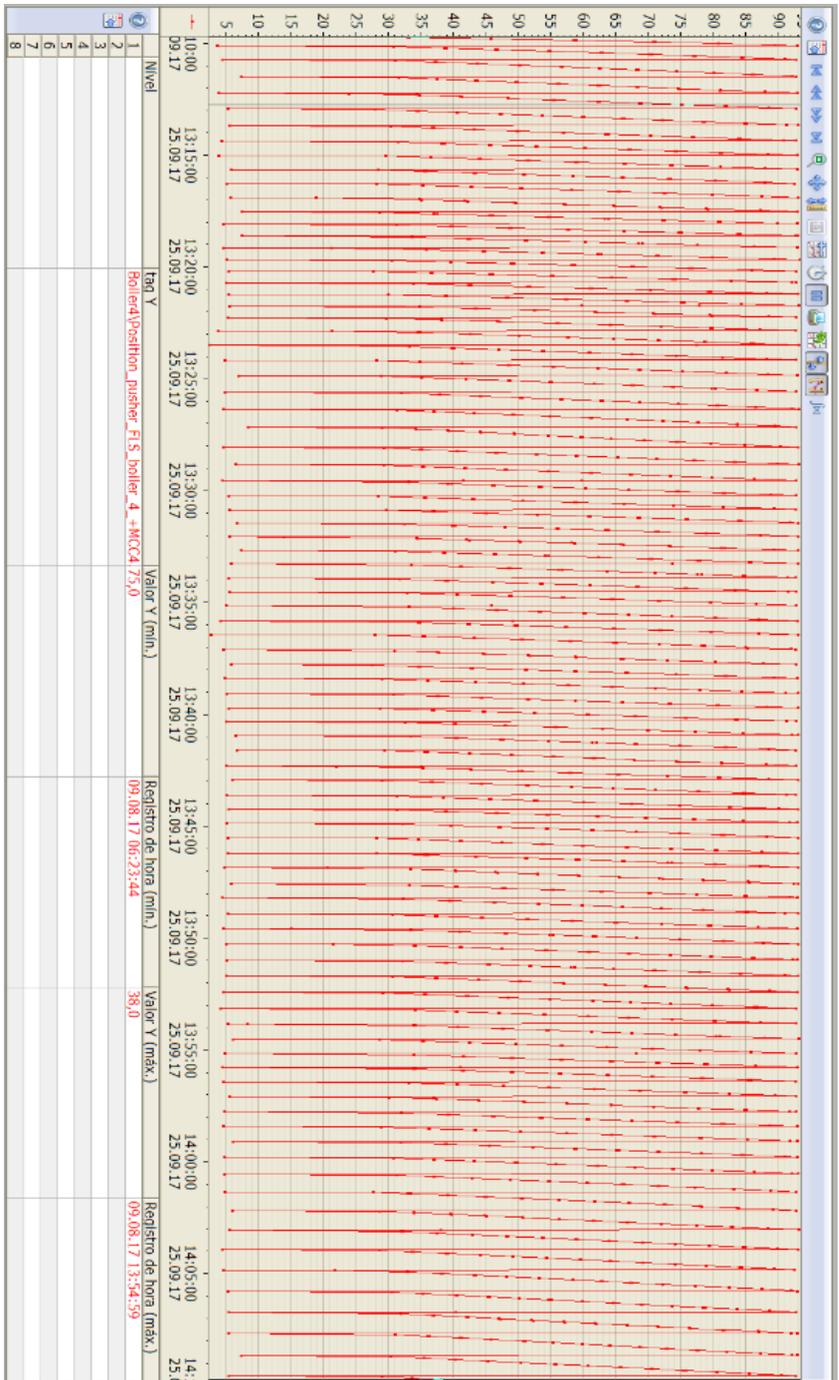
Fonte: Autoria própria

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 2.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

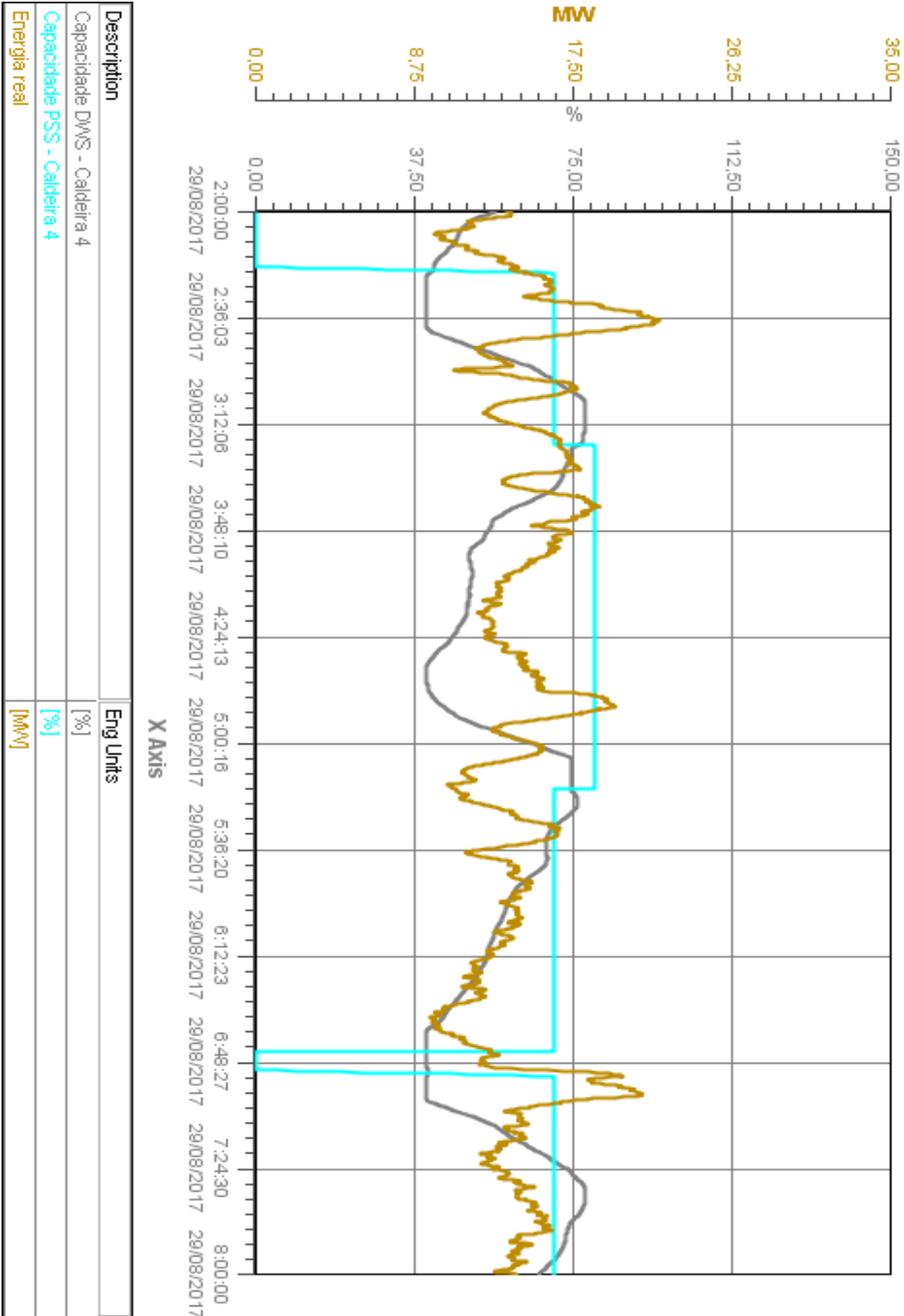
Fonte: Autoria própria



Varição da posição do pusher da Caldeira 4

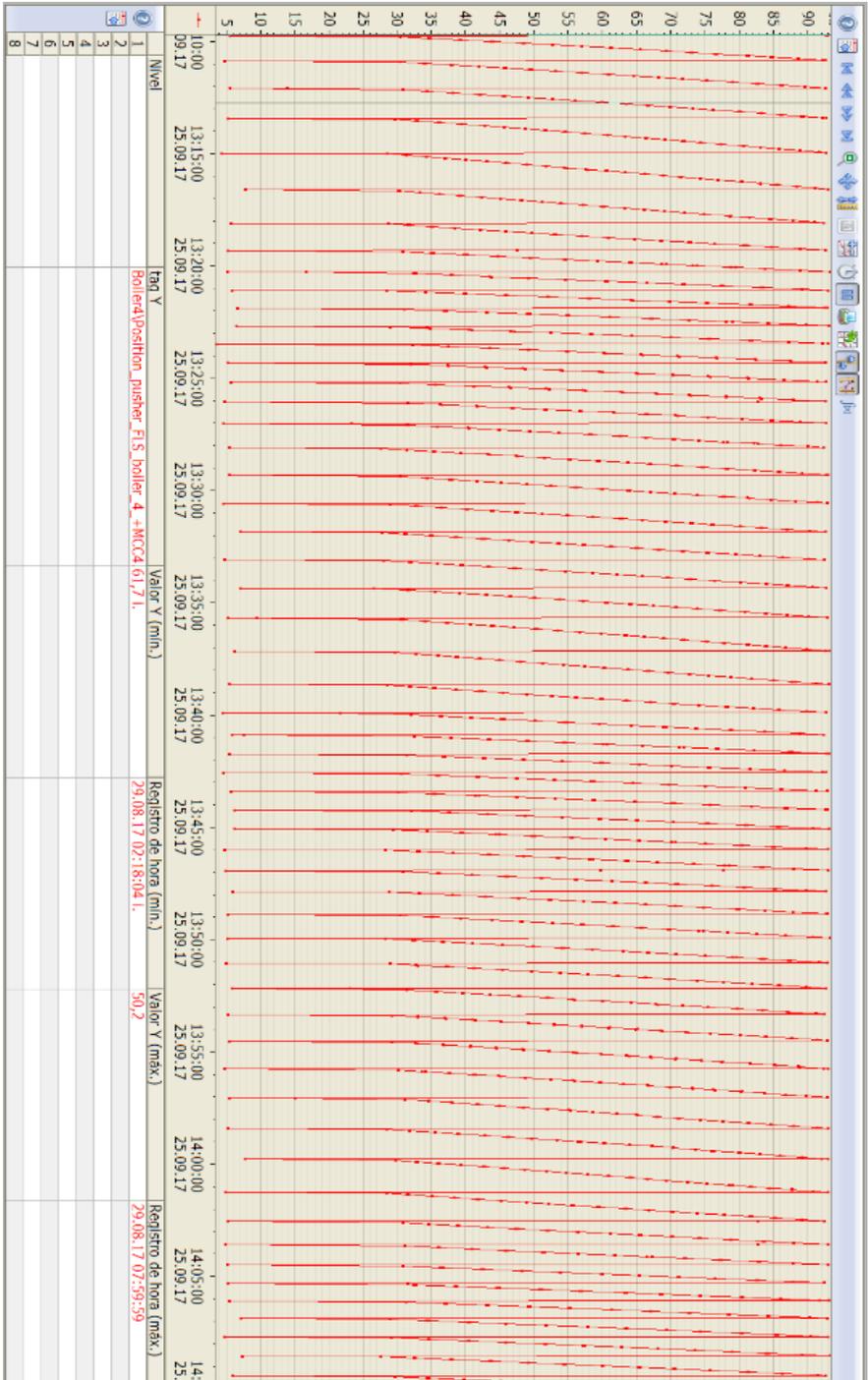
Fonte: Autoria própria

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 3.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

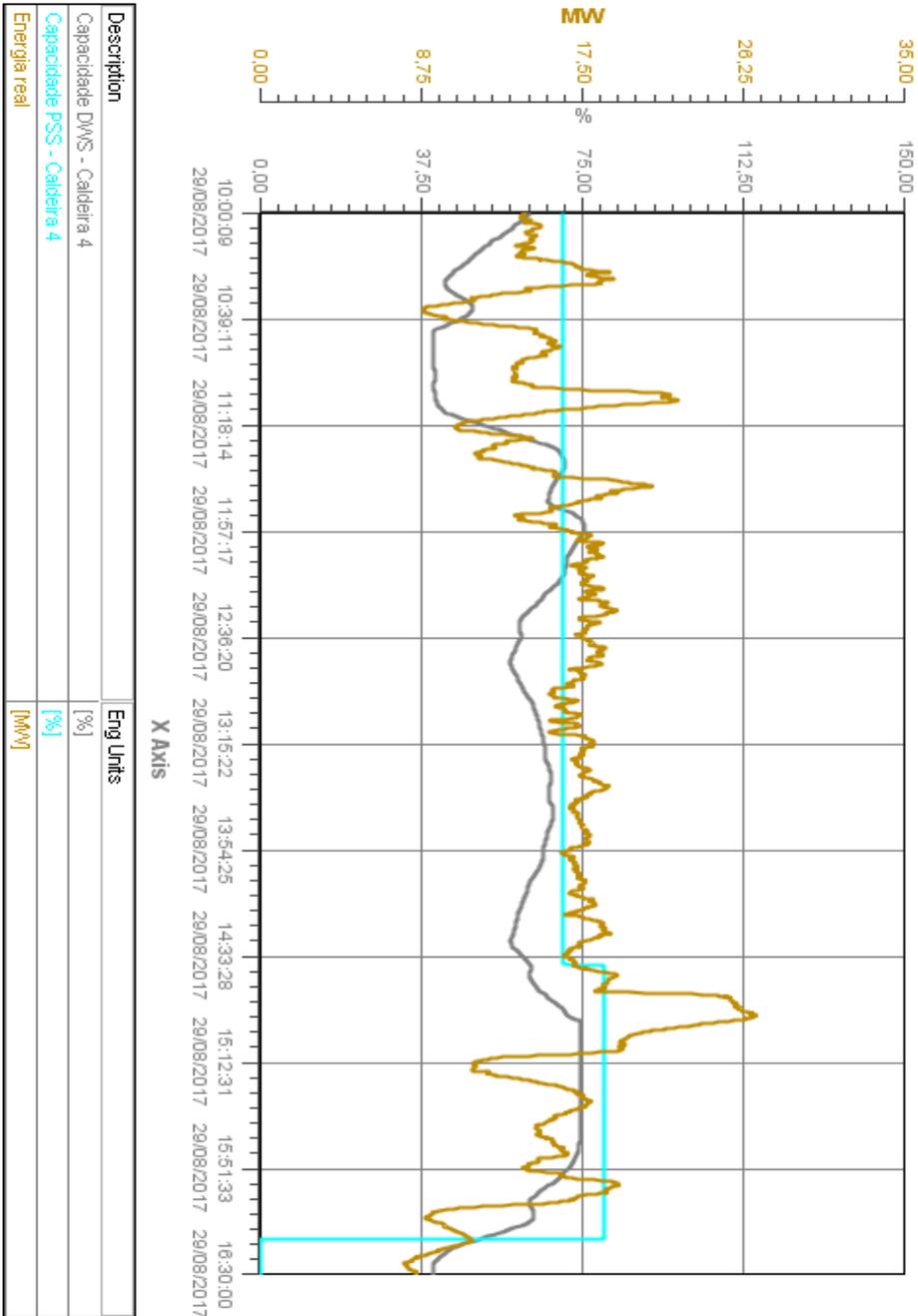
Fonte: Autoria própria



Variação da posição do pusher da Caldeira 4

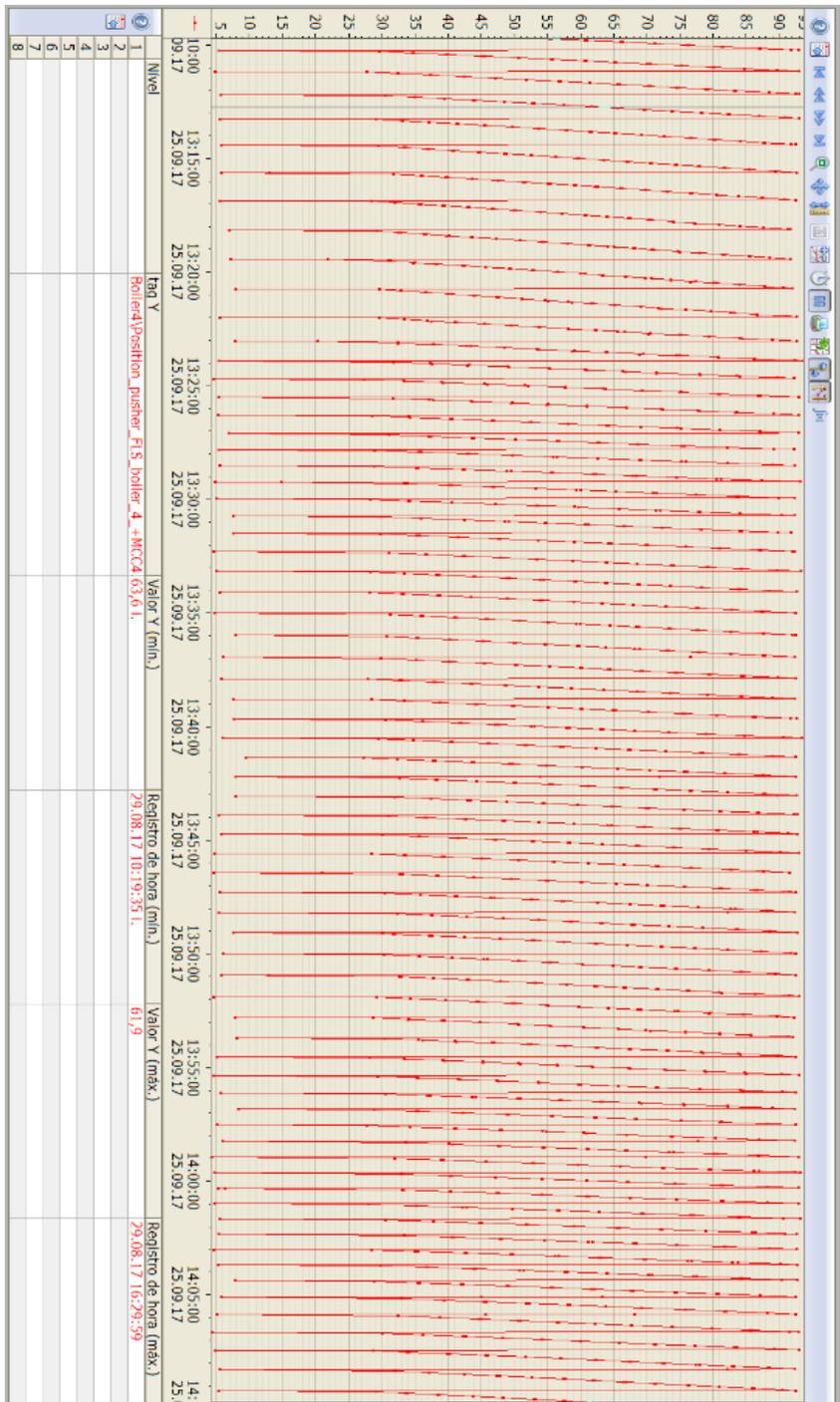
Fonte: Autoria própria

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 4.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

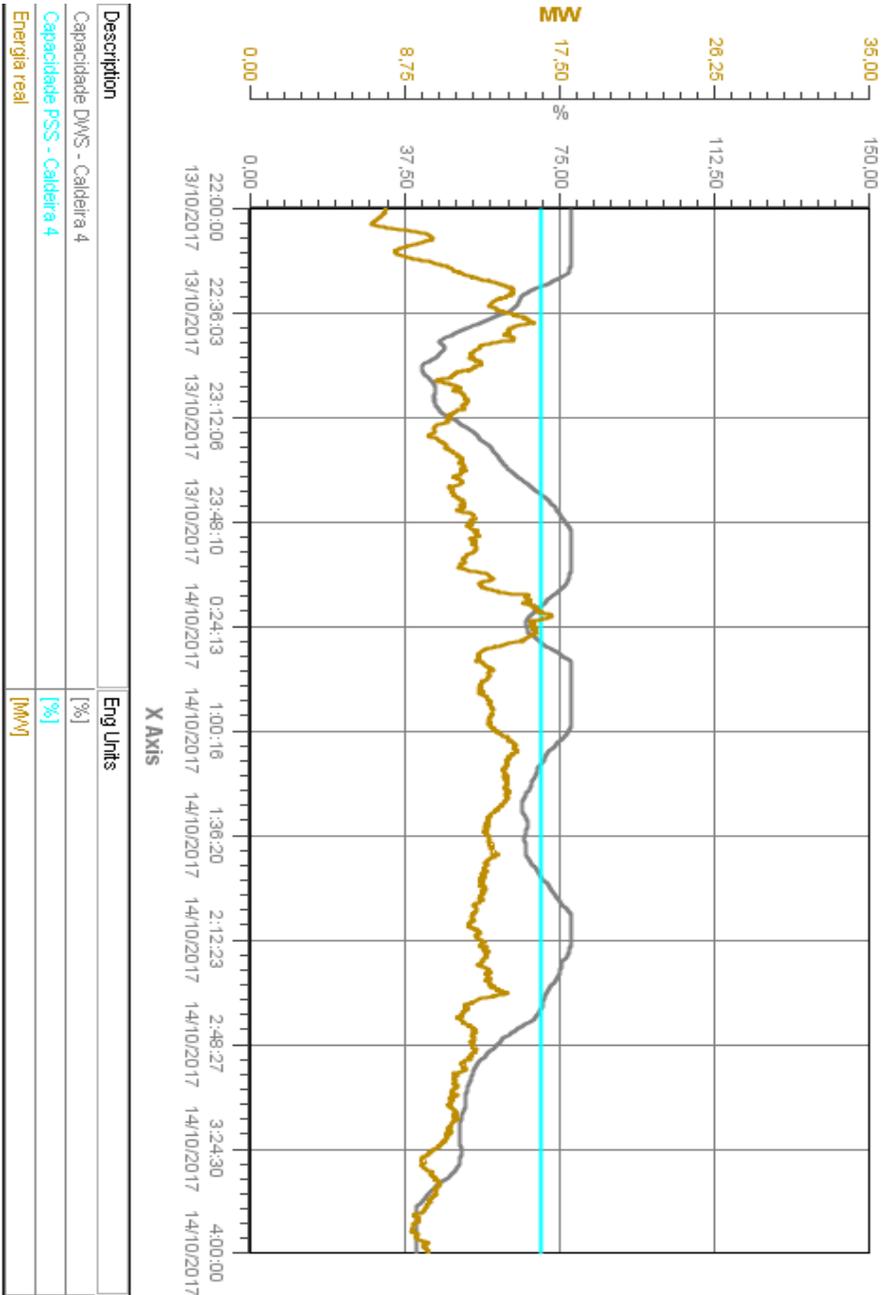
Fonte: Autoria própria



Varição da posição do pusher da Caldeira 4

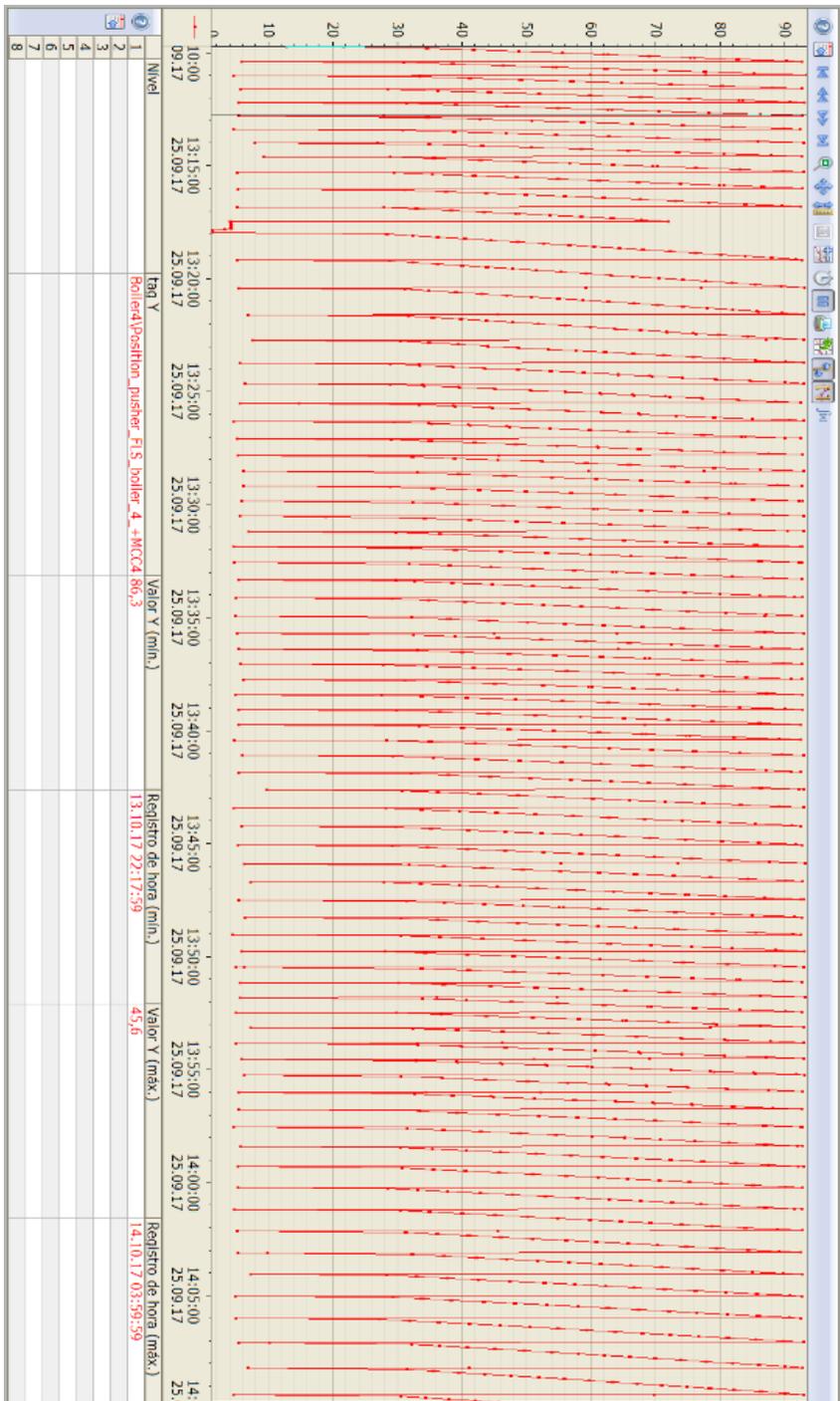
Fonte: Autoria própria

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 5.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

Fonte: Autoria própria

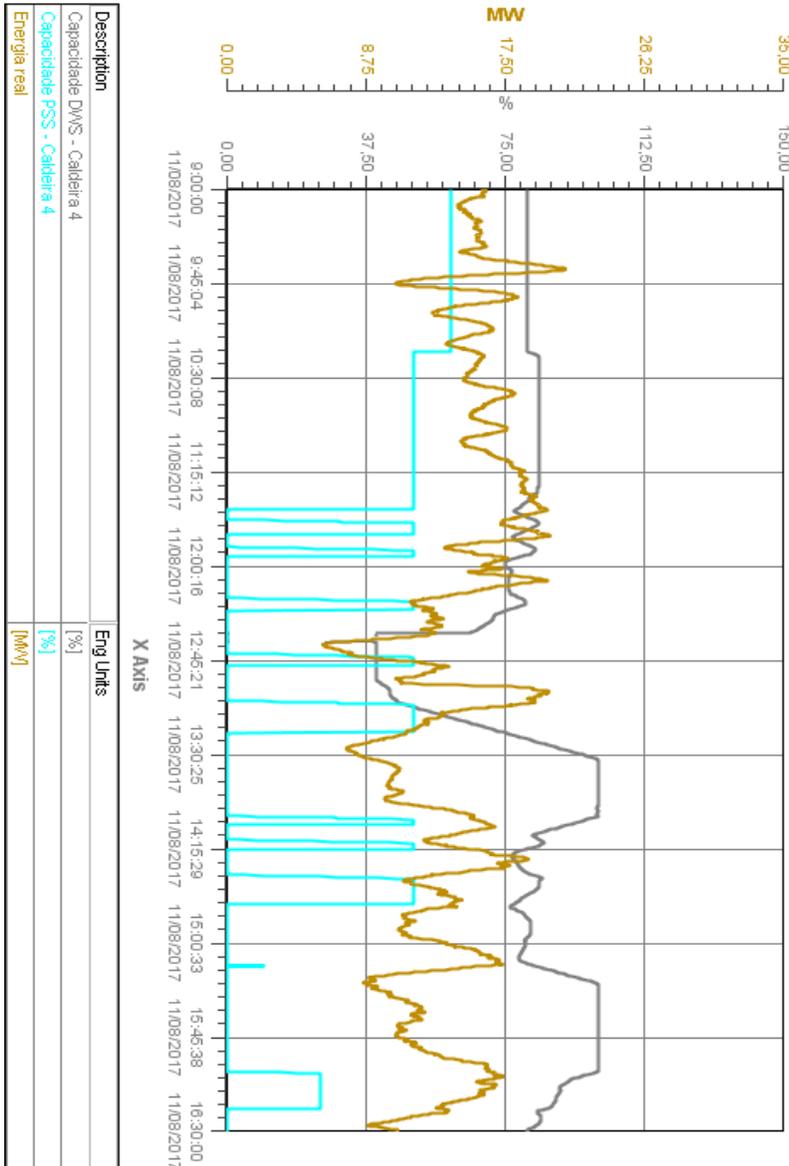


Varição da posição do pusher da Caldeira 4

Fonte: Autoria própria

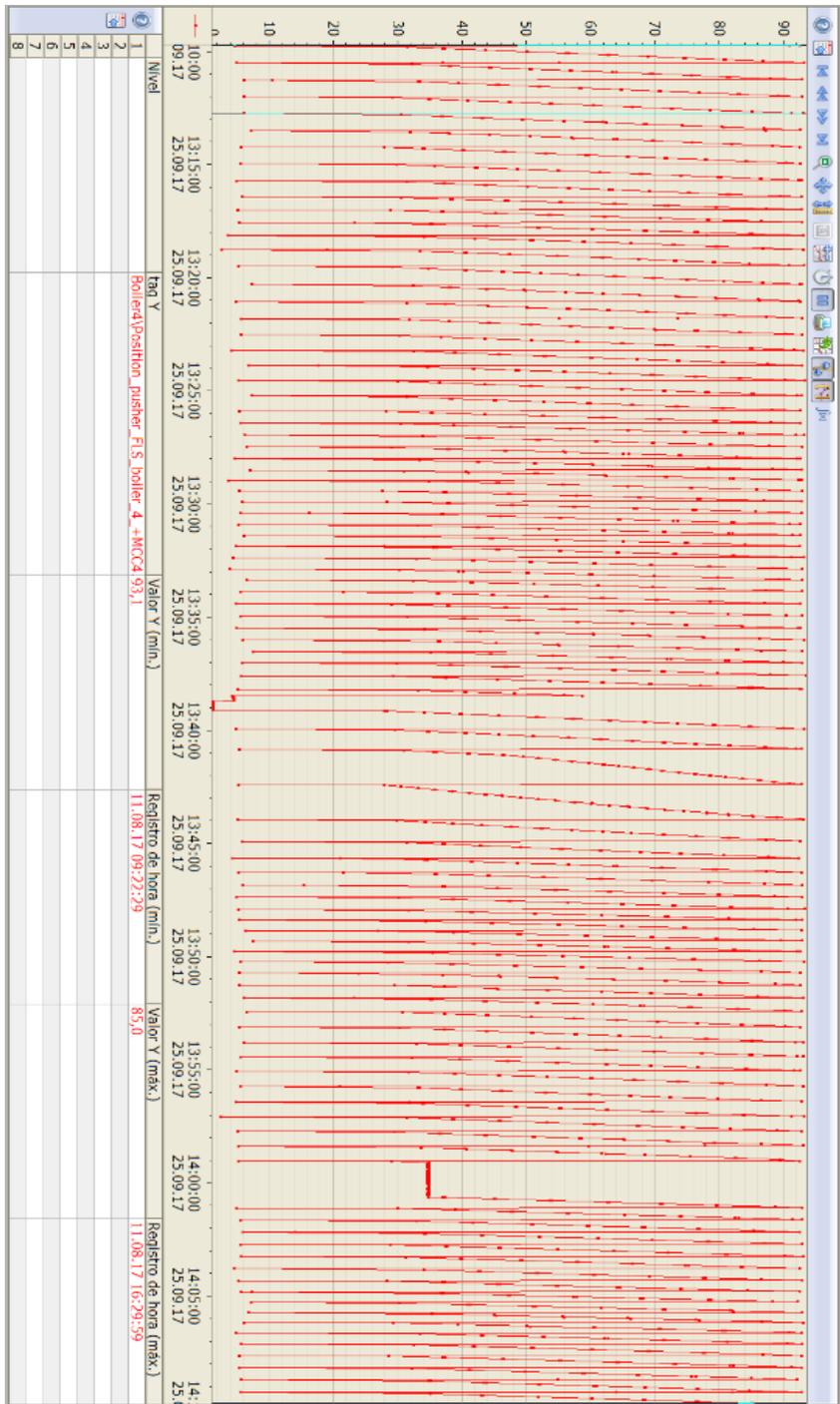
## APÊNDICE B – Gráficos das análises da casca da madeira pinus

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 1.



Variação da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

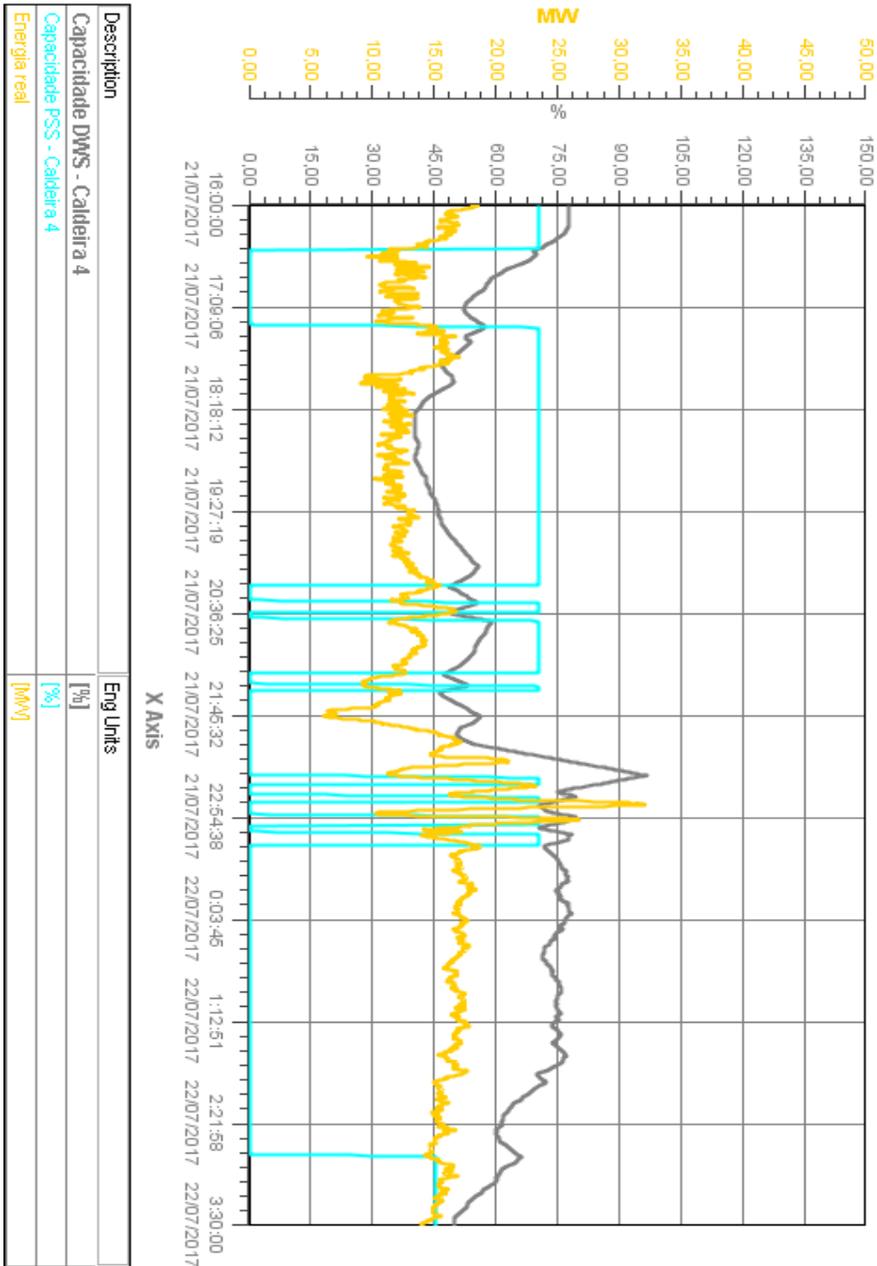
Fonte: Autoria própria



Variação da posição do pusher da Caldeira 4

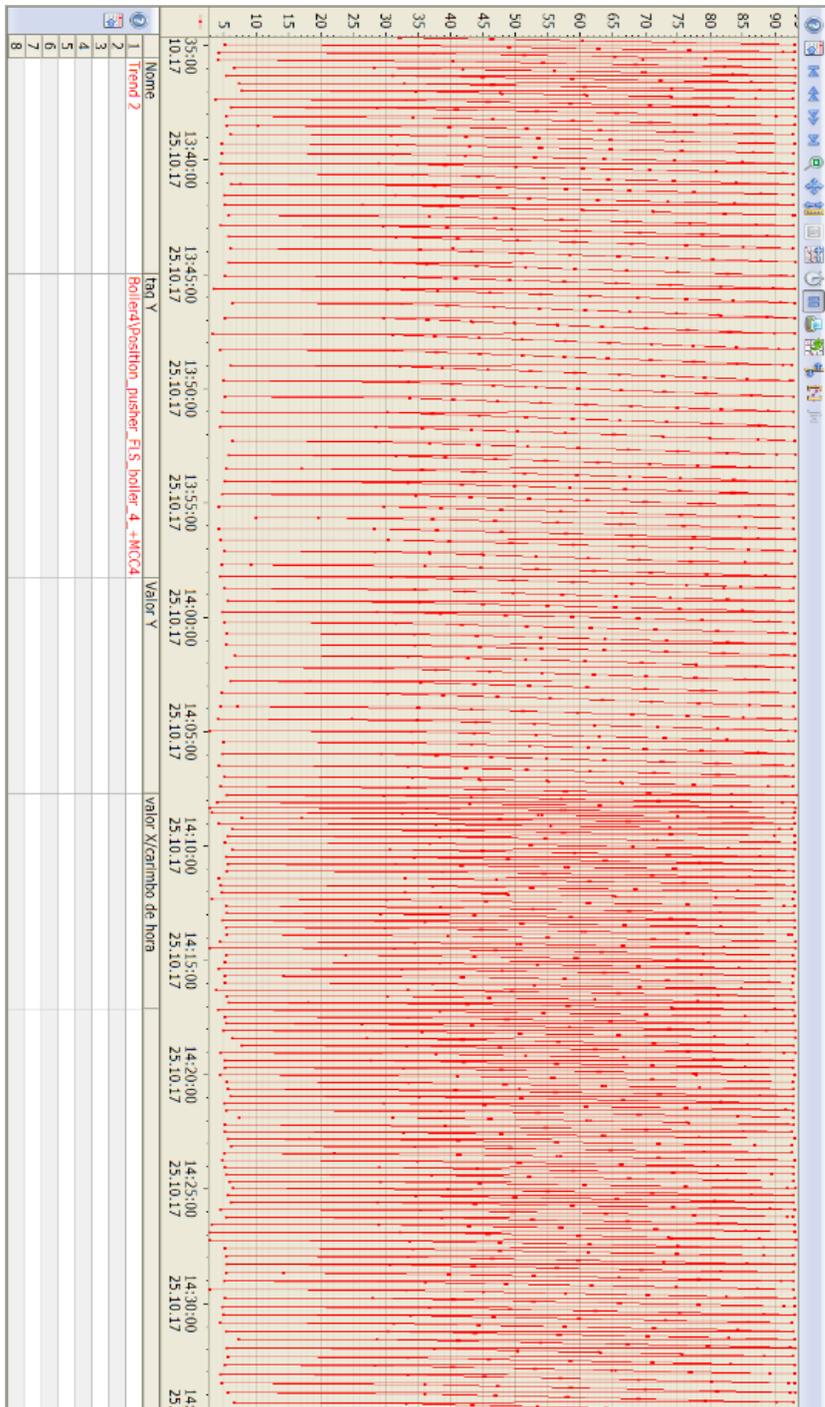
Fonte: Autoria própria

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 2.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

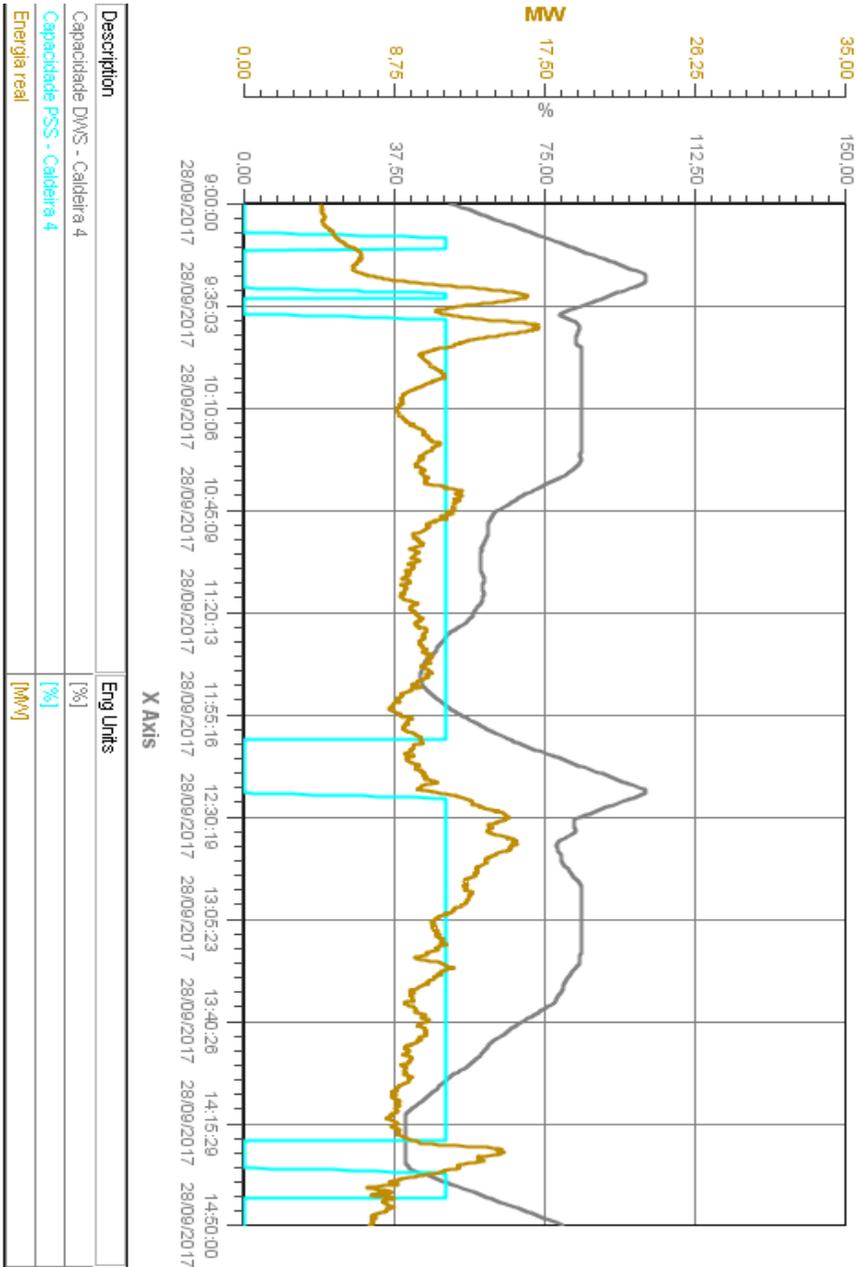
Fonte: Autoria própria



Varição da posição do pusher da Caldeira 4

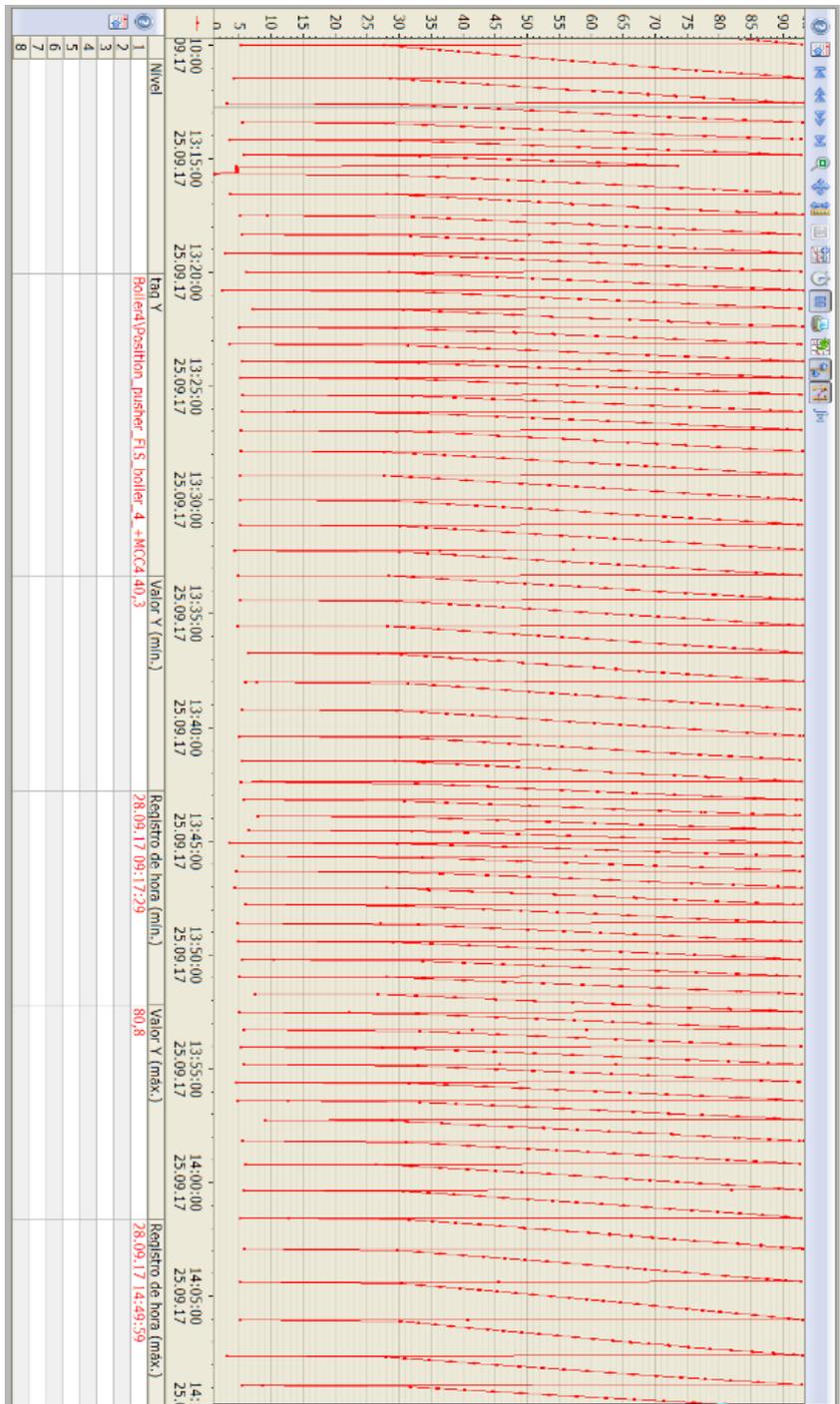
Fonte: Autoria própria

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 3.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

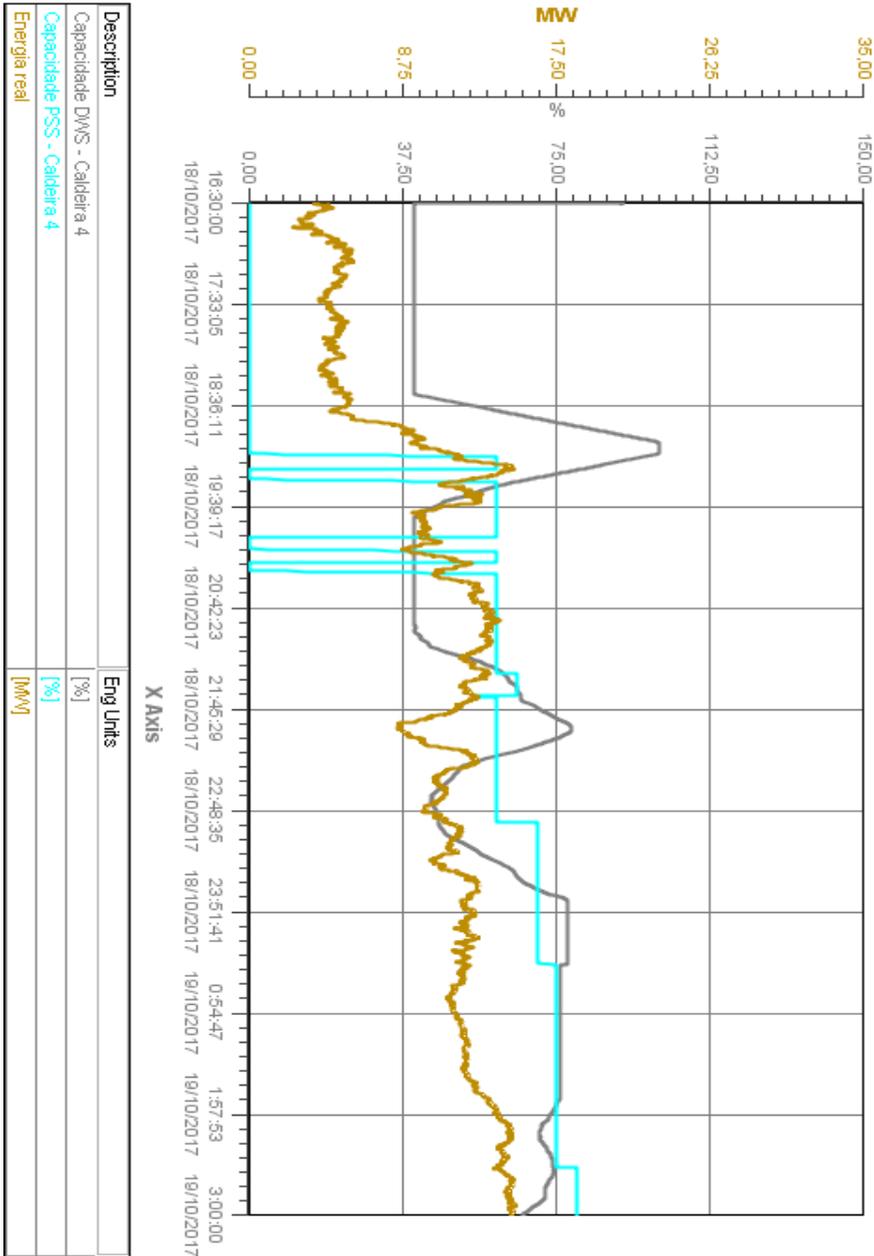
Fonte: Autoria própria



Varição da posição do pusher da Caldeira 4

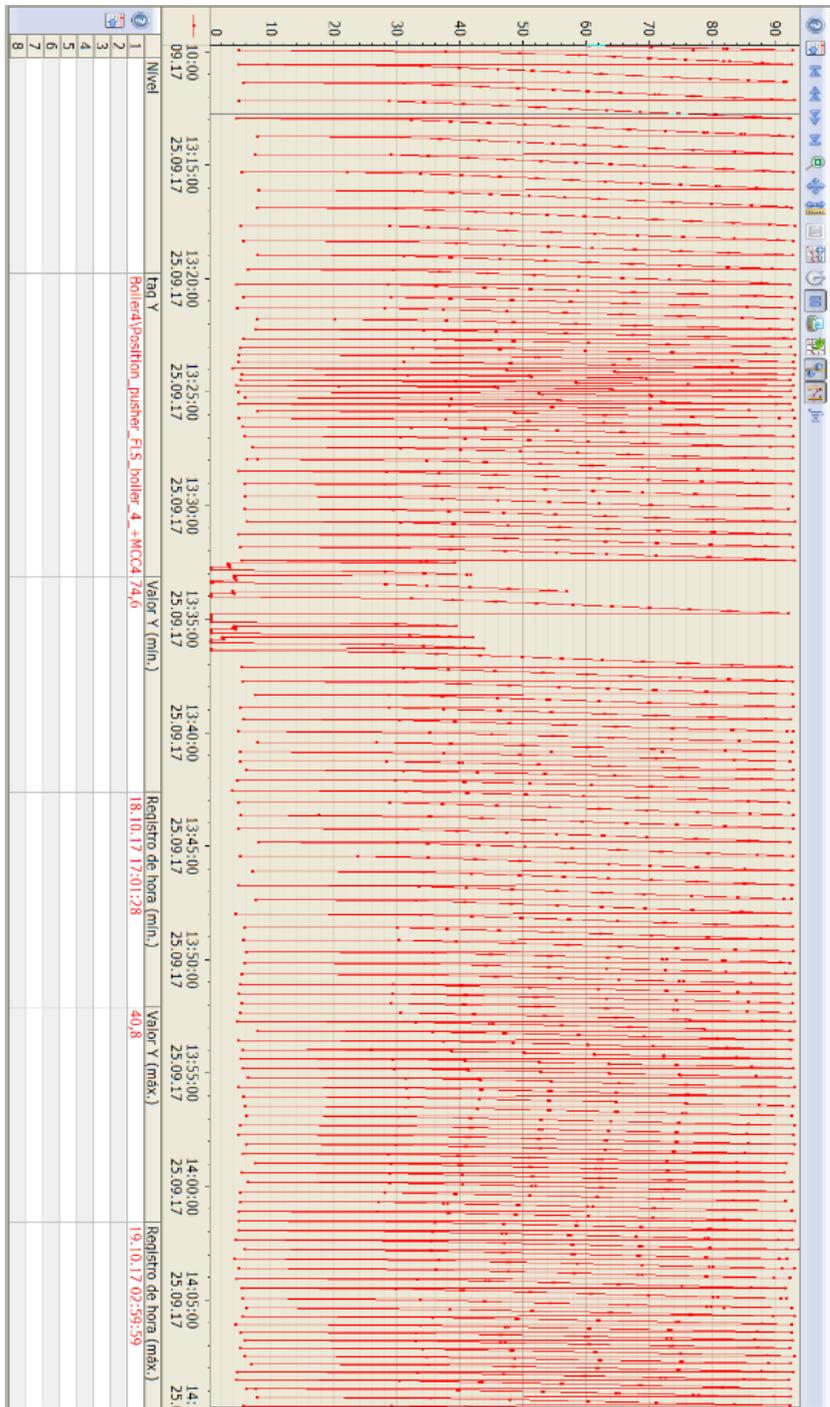
Fonte: Autoria própria

# Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 4



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

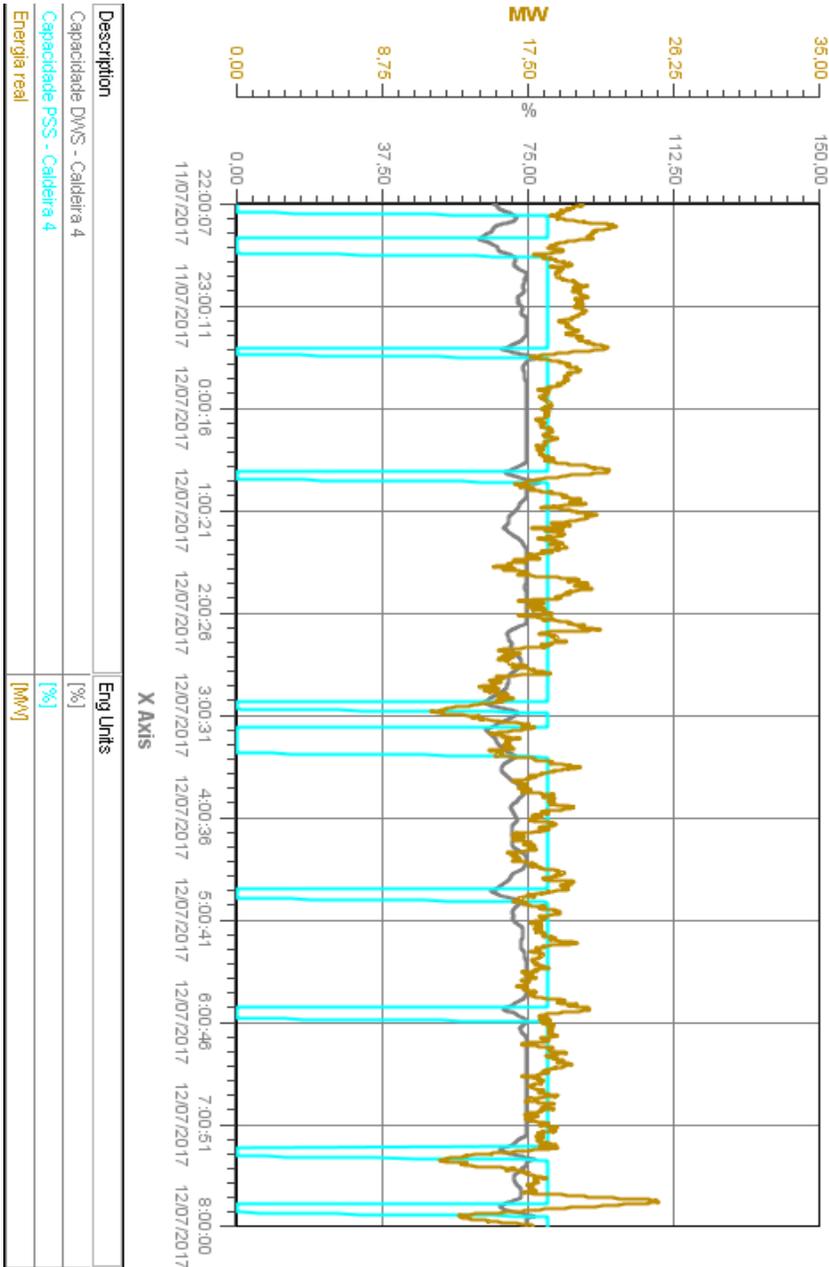
Fonte: Autoria própria



Variação da posição do pusher da Caldeira 4

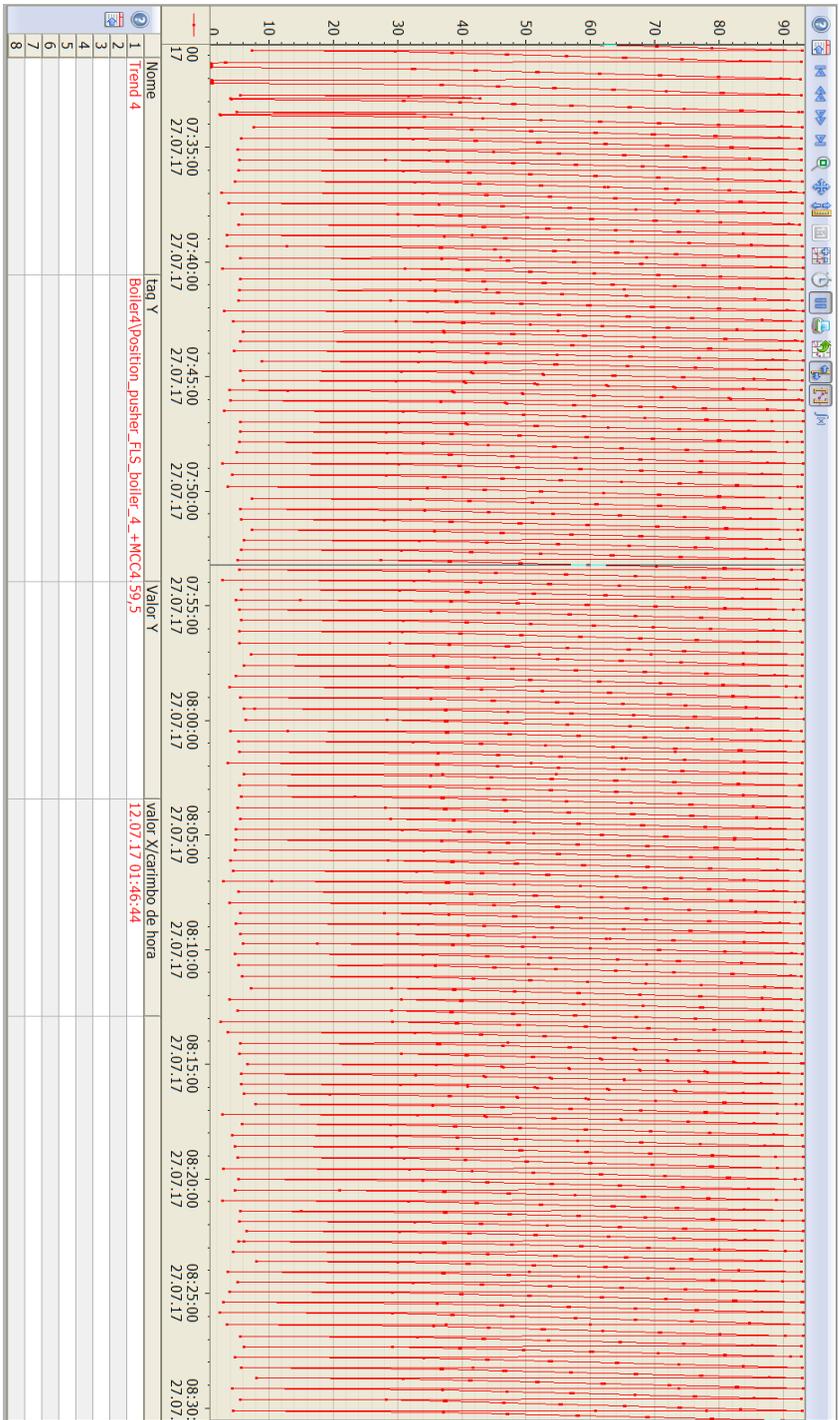
Fonte: Autoria própria

Gráficos com a variação da capacidade DWS e PSS, energia real e posição do pusher da análise 5.



Varição da Gralha DWS, do PSS e da Energia Real

Fonte: Autoria própria



Varição da posição do pusher da Caldeira 4

Fonte: Autoria própria

## AUTORES

### Luiz Felipe Rolim Santos



Engenheiro Mecânico pela UTFPR. Pós-Graduação em Gestão de Projetos. Inglês avançado. Experiência com desenvolvimento de manuais e instruções de trabalho visando o treinamento de operadores de Caldeiras e de Sistema de Refrigeração. Conhecimento na análise da geração energética para os processos industriais. Realizou projetos para testes de eficiência e viabilidade de combustível alternativo para Caldeiras de biomassa.

Possui experiência no setor de tratamento de água e efluente. Possui treinamento de BPF. Atuou na implementação de política de gestão integrada, incluindo 5s, ISOs 9001, 14001, 22000 e OHSAS 18001. Conhecimento avançado em Excel (Macro e VBA), Word, Power Point e MS Project. Possui também experiência Internacional.

### Julianno Pizzano Ayoub



Engenheiro Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Engenheiro de Segurança do Trabalho pela Faculdade Campo Real. Especialista em Engenharia da Qualidade. Especialista em Meio Ambiente, Desenvolvimento e Sustentabilidade. Mestrado em andamento em Bioenergia pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Tem experiência com gestão de pessoas, redução de custos, adequações às NRs, certificações, auditorias, perícias e treinamentos.

## **Marcel Ricardo Nogueira de Oliveira**



Possui Graduação em Engenharia Ambiental pela Universidade Estadual do Centro-Oeste. Possui Graduação interrompida em Engenharia Civil pela Faculdade Campo-Real. Possui Especialização em Estruturas de Concreto e Fundações pela Universidade Paranaense. Tem experiência no ramo de construção civil como proprietário de empresa e consultor. Atuou com elaboração e implantação de gestão ambiental, como PGRCC, técnicas e matéria prima sustentável. Ministrou palestras e cursos nas áreas de engenharia ambiental, civil, segurança, gestão empresarial e marketing. Pesquisador da engenharia e professor particular.

**O setor industrial apresenta o maior desperdício de energia no Brasil, um dos fatores a serem considerados é a alta demanda, cerca de 40% da energia elétrica produzida no país é destinada às indústrias.**

**Esta obra traz estudos e análises acerca da geração de energia no setor industrial, apresentando uma avaliação prática da implementação de novas fontes geradoras de energia e a compreensão dos parâmetros envolvidos**

**Muitos materiais podem ser empregados para geração de energia, ao exemplo da queima em caldeiras, são utilizados desde a madeira até resíduos de cereais. Um dos fatores levados em consideração para a queima é o índice de umidade do material, o que aumenta o leque de possíveis fontes, como a biomassa.**

**Através da análise do potencial energético, testes de eficiência energética e relação custo/consumo, o estudo evidenciou a viabilidade em suprir a demanda energética de uma indústria com a utilização de combustíveis alternativos.**

ISBN: 978-65-86707-00-7

**CD**



9 786586 707007