

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Estudo Experimental da Combustão de  
Eucalipto numa Fornalha de Leito Fixo de  
Caldeira em Escala de Laboratório, Incluindo a  
Intensificação Acústica.**

**Autor: MSc. Luis Roberto de Mello e Pinto**

**Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

**Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

Itajubá, Março de 2017

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**  
**INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Estudo Experimental da Combustão de  
Eucalipto numa Fornalha de Leito Fixo de  
Caldeira em Escala de Laboratório, Incluindo a  
Intensificação Acústica.**

**Autor: MSc. Luis Roberto de Mello e Pinto**

**Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

**Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

**Curso: Doutorado em Engenharia Mecânica**

**Área de Concentração: Conversão de energia**

Tese de doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Março de 2017

MG – Brasil

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ  
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**TESE DE DOUTORADO**

**Estudo Experimental da Combustão de  
Eucalipto numa Fornalha de Leito Fixo de  
Caldeira em Escala de Laboratório, Incluindo a  
Intensificação Acústica.**

**Autor: MSc. Luis Roberto de Mello e Pinto**

**Orientador: Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora**

**Co-orientador: Prof. Dr. Osvaldo José Venturini**

Composição da Banca Examinadora:

**Prof. Dr. Albert Ratner – UNIVERSITY OF IOWA/IA/USA**

**Prof. Dr. Paulo Roberto Wander – UNISINOS/RS**

**Prof. Dr. Rubenildo Vieira Andrade – IEM/UNIFEI**

**Prof. Dr. Marcelo José Pirani – IEM/UNIFEI**

**Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora – IEM/UNIFEI (Orientador)**

**Prof. Dr. Osvaldo José Venturini – IEM/UNIFEI (Co-orientador)**

## **Dedicatória**

Aos meus pais (in memoriam) e à minha família.

## Agradecimentos

Ao meu Orientador, Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora, pela competência, dedicação, paciência e amizade.

Ao meu Co-Orientador Prof. Dr. Osvaldo José Venturini, pelo apoio e doação de seu imenso conhecimento no incentivo do andamento deste trabalho e pela amizade.

Aos amigos do NEST, em especial Paulo Corrêa, pela incansável ajuda na realização dos testes. Aos Prof. Rubenildo Vieira e Arnaldo Martins Martinez Reyes, pela ajuda em todos os momentos de dúvidas e especialmente pela amizade.

A CAPES/FAPEMIG/CNPq pelo apoio financeiro na realização deste trabalho.

Aos Professores e funcionários da Universidade Federal de Itajubá.

Ao Instituto de Engenharia Mecânica da UNIFEI, representado pelos seus dedicados Professores e Funcionários, pela oportunidade que me concedeu na realização deste trabalho, e aos amigos desse Instituto, pelo convívio profissional.

Aos meus pais, João (in memoriam) e Antônia (in memoriam), que sempre me incentivaram.

Ao Silvio Romero e José Garcia Pereira da empresa AGTherm pela colaboração com as instalações da caldeira.

Ao Nilson, ao Wellington e a todos os funcionários da GNS que se dedicaram e ajudaram na materialização de projetos importantes para a realização dos testes deste trabalho.

Ao Isaias, ao Jakson e aos funcionários da SONAUTO que perseveraram e emprestaram seu conhecimento possibilitando a realização dos testes deste trabalho.

A minha família pela dedicação, paciência, carinho, atenção, incentivo e apoio.

À Deus.

“No meio da confusão encontre a simplicidade. A partir da discórdia encontre a harmonia. No meio da dificuldade reside a oportunidade.”

Albert Einstein

## Resumo

**PINTO, L. R. M. (2017)**, Estudo experimental da combustão de eucalipto numa fornalha de leito fixo de caldeira em escala de laboratório, incluindo a intensificação acústica, Itajubá, 273 p. Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica- Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

Apresenta-se a avaliação da intensificação acústica no processo de combustão de biomassa em leito fixo com em caldeira híbrida piroaquetubular em escala de laboratório. A intensificação acústica foi avaliada com a adição de ondas sonoras no fornecimento de ar primário. Esta avaliação foi realizada através da análise comparativa dos perfis de temperatura na câmara de combustão e das composições de gases amostradas no leito da câmara de combustão e na chaminé para o equipamento operando com e sem a intensificação acústica. Foram também apresentadas a geração específica de vapor ( $\text{kg}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{biomassa}}$ ), potência térmica e eficiência do equipamento para as diversas operações realizadas. Mostrou-se que a intensificação acústica influencia o processo de combustão de biomassa em caldeira de leito fixo.

### Palavras-chave

Combustão de biomassa, Intensificação acústica, Combustão pulsada.

## Abstract

**PINTO, L. R M. (2017)**, Experimental study of eucalyptus combustion in a fixed bed furnace in a lab scale boiler, including acoustic enhancement, Itajubá, 273 p. PhD. Thesis - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

The evaluation of the acoustic enhancement in the biomass combustion process in fixed bed with water and flame tube hybrid boiler in laboratory scale is presented. The acoustic intensification was evaluated with the addition of sound waves in the supply of primary air. This evaluation was carried out through the comparative analysis of the temperature profiles in the combustion chamber and the compositions of gases sampled in the combustion chamber bed and in the chimney for the equipment operating with and without acoustic enhancement. The specific generation of steam ( $\text{kg}_{\text{steam}}/\text{kg}_{\text{biomass}}$ ), thermal power and equipment efficiency were also presented for the various operations performed. It was shown that the acoustic enhancement influences the combustion process of biomass in a fixed-bed boiler.

### Keywords

Biomass combustion, Acoustic enhancement, Pulsed combustion.

## Sumário

<b>DEDICATÓRIA</b>	<b>4</b>
<b>AGRADECIMENTOS</b>	<b>5</b>
<b>RESUMO</b>	<b>8</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>9</b>
<b>SUMÁRIO</b>	<b>10</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>15</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>23</b>
<b>SIMBOLOGIA</b>	<b>26</b>
<b>LETRAS LATINAS</b>	<b>26</b>
<b>LETRAS GREGAS</b>	<b>31</b>
<b>SOBRESCRITOS</b>	<b>32</b>
<b>SUBSCRITOS</b>	<b>32</b>
<b>ABREVIATURAS</b>	<b>33</b>
<b>SIGLAS</b>	<b>33</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>35</b>
<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>35</b>
1.1 MOTIVAÇÃO	35
1.2 OBJETIVOS	39
1.2.1 OBJETIVO GERAL	39
1.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	39
1.3 METODOLOGIA	40
1.4 TREINAMENTO PARA OPERAR A CALDEIRA	42

	11
1.5 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS DO TRABALHO -----	44
<b>CAPÍTULO 2</b> _____	<b>45</b>
<b>REVISÃO DE LITERATURA</b> _____	<b>45</b>
2.1 GERADORES DE VAPOR -----	45
2.1.1 DEFINIÇÕES -----	46
2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DE CALDEIRAS A VAPOR -----	47
2.2 FORNALHAS PARA COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS -----	51
2.2.1 FORNALHAS DE QUEIMA EM GRELHA -----	52
2.2.2 FORNALHAS DE GRELHA PLANA -----	53
2.3 COMBUSTÃO DE BIOMASSA -----	54
2.3.1 DEFINIÇÕES -----	55
2.3.2 COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS -----	60
2.4 BIOMASSA -----	62
2.4.1 MADEIRA -----	62
2.4.2 CARACTERIZAÇÃO DO EUCALIPTO PARA ENERGIA -----	64
2.5 DINÂMICA DA INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA -----	67
2.6 ESTADO DA ARTE -----	70
2.6.1 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE PROCESSOS DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM LEITO FIXO -----	70
2.6.2 ESTUDOS DE PROCESSOS DE COMBUSTÃO INTENSIFICADA ACUSTICAMENTE -----	79
<b>CAPÍTULO 3</b> _____	<b>87</b>
<b>PLANEJAMENTO DA EXPERIMENTAÇÃO</b> _____	<b>87</b>
3.1 DESCRIÇÃO DA CALDEIRA DE TESTES -----	87
3.1.1 REFORMA REALIZADA NA CALDEIRA -----	89
3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA A SER UTILIZADA NOS TESTES -----	91
3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EUCALIPTO NOS LABORATÓRIOS DO NEST --	91
3.3 CÁLCULOS A SEREM REALIZADOS -----	97
3.3.1 VOLUMES DE AR E DE GASES DE COMBUSTÃO -----	97
3.3.2 ENTALPIAS DO AR E DOS GASES DE COMBUSTÃO -----	99
3.3.3 EXCESSO DE AR -----	100
3.3.4 PERDA DE CARGA -----	102
3.3.5 CÁLCULO DE PRESSÃO ACÚSTICA NO SISTEMA ACÚSTICO(SA) -----	105

3.3.6 CÁLCULO DO DUTO DE CONEXÃO DO SA E ESCOLHA DE FREQUÊNCIAS DE TRABALHO -----	108
3.3.7 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA NA CALDEIRA-----	110
3.3.8 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO-----	113
3.3.9 CÁLCULO DE POTÊNCIA TÉRMICA -----	117
3.3.10 CÁLCULO DA GERAÇÃO ESPECÍFICA -----	118
3.4 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E DA INSTRUMENTAÇÃO -----	119
3.4.1 EQUIPAMENTOS ANEXOS À CALDEIRA -----	119
3.4.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES-----	123
3.5 DESENVOLVIMENTO DA SONDA DE SUÇÃO RESFRIADA -----	129
3.6 DESCRIÇÃO DOS ARRANJOS DE TESTE-----	140
3.6.1 ARRANJO 1: ETAPA 1 DE TESTES -----	141
3.6.2 ARRANJO 2: ETAPA 2 DE TESTES -----	142
3.7 PLANEJAMENTO DO PROCESSO EXPERIMENTAL-----	143
3.7.1 VARIÁVEIS DOS EXPERIMENTOS -----	143
3.7.2 TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS DO EXPERIMENTO -----	145
3.7.3 PLANEJAMENTO DOS TESTES-----	146
3.7.4 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS NA CALDEIRA -----	147
3.7.5 PROTOCOLOS INDIVIDUAIS DE TESTE PARA CADA ETAPA -----	148
<b>CAPÍTULO 4</b> _____	<b>151</b>
<b>PREPARAÇÃO DA CALDEIRA</b> _____	<b>151</b>
4.1 CONEXÃO DA CALDEIRA À CAIXA D'ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA -----	151
4.2 ADAPTAÇÃO DA GRELHA AOS ARRANJOS DE TESTE -----	152
4.3 CONSTRUÇÃO DA SONDA RESFRIADA -----	155
4.4 CIRCUITOS DA SONDA. -----	161
4.4.1 CIRCUITO DE ÁGUA DA SONDA -----	161
4.4.2 CIRCUITO DE GÁS DA SONDA -----	163
4.5 SA – SISTEMA ACÚSTICO -----	165
4.6 CONEXÕES DO SA E das TUBULAÇÕES DE AR -----	169
4.6.1 CONEXÃO ENTRE SA E TUBULAÇÃO DE AR PRIMÁRIO-----	171
4.6.2 PLACAS DE ORIFÍCIO-----	175
4.6.3 DAMPER CORTA FOGO -----	180
4.7 TERMOPAR B-----	181
4.8 ACESSOS PARA SONDA E TERMOPAR B-----	183

	13
4.9 MONTAGEM COMPLETA DA CALDEIRA-----	185
<b>CAPÍTULO 5</b> _____	<b>187</b>
<b>TESTES REALIZADOS E SEUS RESULTADOS</b> _____	<b>187</b>
5.1 TESTE 1: 14/12/2016-----	187
5.2 TESTE 2: 15/12/2016-----	195
5.3 TESTE 3: 16/12/2016-----	197
5.4 TESTE 4: 20/12/2016-----	199
5.5 TESTE 5: 21/12/2016-SEM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA-----	204
5.5.1 RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 5-----	210
5.6 teste 6: 23/12/2016-COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA E FALHA DO SPEAKER -----	212
5.6.1 RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 6-----	216
5.7 teste 7: 06/01/2017-COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA-----	218
5.7.1 RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 7-----	224
5.8 APRESENTAÇÃO DOS DADOS MEDIDOS E CALCULADOS DOS TESTES 5,6 E 7 EM RESUMO-----	228
<b>CAPÍTULO 6</b> _____	<b>230</b>
<b>ANÁLISE DOS RESULTADOS</b> _____	<b>230</b>
6.1 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS T1, T2, T4, T6 E T8 - TESTE 5-----	230
6.2 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS T1, T2, E T8 COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA - TESTE 6-----	233
6.3 ANÁLISE DO TEOR DE O <sub>2</sub> CONSUMIDO NO LEITO COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA - TESTE 6-----	234
6.4 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS T1, T2, E T8 COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA - TESTE 7-----	235
<b>CAPÍTULO 7</b> _____	<b>237</b>
<b>APRESENTAÇÃO E ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS DOS TESTES</b> _____	<b>237</b>
7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 5-----	237
7.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 6-----	242
7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 7-----	247
7.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DOS TESTES 5 E 7-----	252
7.4.1 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTE 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 60 Hz-----	252

7.4.2 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 75 Hz-----	254
7.4.3 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 90 Hz-----	255
7.4.4 COMPARATIVO DAS COMPOSIÇÕES DE GASES NO LEITO ENTRE OS TESTES 5 E 7 -----	256
7.4.5 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DOS GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 60 Hz-----	258
7.4.6 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 75 Hz-----	260
7.4.7 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 90 Hz-----	261
7.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DOS TESTES 5 E 6 -----	262
7.5.1 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTES 5 E 6-----	263
7.5.2 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NO LEITO ENTRE OS TESTES 5 E 6 -----	264
7.5.3 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 6 -----	265
<b>CAPÍTULO 8</b> _____	<b>267</b>
<b>CONCLUSÕES</b> _____	<b>267</b>
8.1 SUJESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS-----	269
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> _____	<b>270</b>

## Lista de Figuras

Figura 1: Oferta Interna de Energia no Brasil em 2014 (%) (REB 2015).-----	36
Figura 2: Oferta Interna de Energia no Brasil em 2015 (%) (REB 2016).-----	36
Figura 3: Vazamento nos tubos após a pressão ser elevada a 6 kgf/cm <sup>2</sup> .-----	42
Figura 4: Vazamento nos tubos após a pressão ser elevada a 9 kgf/cm <sup>2</sup> .-----	42
Figura 5: Operação de mandrilagem nos tubos da caldeira.-----	43
Figura 6: Caldeira em operação, manômetro registra 7 [kgf/cm <sup>2</sup> ].-----	43
Figura 7: Caldeira em operação, fornalha queimando lenha de eucalipto.-----	43
Figura 8: Esquema de tipos de caldeira (Bizzo, 2003).-----	47
Figura 9: Partes internas de caldeira flamotubular com câmara de reversão molhada e fornalha corrugada (Bizzo, 2003).-----	49
Figura 10: Esquemas construtivos de caldeiras aquatubulares, com circulação natural. (Bizzo, 2003).-----	50
Figura 11: Esquema de uma caldeira aquatubular.-----	50
Figura 12: Caldeira flamotubular com ante fornalha de paredes de água. (https://www.google.com.br/search?q=imagens+de+caldeiras+hibridas&biw=1280&bih=699&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0CBsQsARqFQoTCP_u27Sy7cgCFQ).-----	51
Figura 13: Esquema de caldeira Mista ou Híbrida piroaquatubular.-----	51
Figura 14: Quatro exemplos de grelhas fixas inclinadas.-----	53
Figura 15: Esquema de uma grelha tubular.-----	53
Figura 16: Esquema de fornalha com grelhas planas.-----	54
Figura 17: Esquema de uma fornalha de grelha plana com alimentação automática.-----	54
Figura 18: Seis modelos de grelhas planas.-----	54
Figura 19: Variação do poder calorífico com o teor de umidade da madeira.-----	57

Figura 20: Etapas da combustão da madeira (relação da fração em massa consumida em função da temperatura em cada etapa da combustão de uma partícula sólida)-----	62
Figura 21: Esquema da passagem do ar primário pela grelha e pela biomassa.-----	68
Figura 22: Mistura do ar com os voláteis da biomassa em início de processo de combustão.-----	68
Figura 23: Chamas formadas pela reação do ar com os voláteis da biomassa em regime permanente de combustão.-----	69
Figura 24: Frente de ignição se movendo contra o fluxo de ar na fornalha de laboratório. ----	71
Figura 25: Frente de ignição se movendo contra o fluxo de ar na fornalha doméstica.-----	71
Figura 26: Temperatura na fornalha de laboratório - 150 mm e 300 mm acima da grelha Biomassa: cilindros de madeira de 8 mm. Fluxo de ar: 0,11 kg/m <sup>2</sup> s. -----	72
Figura 27: Concentrações na fornalha de laboratório de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO e TCH – Hidrocarbonetos totais.-----	72
Figura 28: Temperatura na fornalha doméstica – de 10 [mm] a 400 [mm] acima da grelha---	73
Figura 29: Emissões na fornalha doméstica de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO.-----	73
Figura 30: Instalação de testes sobre uma balança, mostrando o ponto de injeção de ar primário, grelha, termopares, sonda de sucção, visor de vidro e tubo de fumaça.-----	74
Figura 31: Limpeza de gases, diluição e sistema de análise. -----	74
Figura 32: Concentrações medidas de NH <sub>3</sub> (amônia), HCN (Hidrogênio Cianeto) e NO (Monóxido de hidrogênio) (esquerda) e Concentrações medidas de O <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> , CO e TCH – Hidrocarbonetos totais. (direita) em função do fluxo de ar. -----	76
Figura 33: Esquema da planta piloto de combustão.-----	77
Figura 34: Perfis de queima de P. Halepensis e P. Pinaster.-----	78
Figura 35: Efeito de $\lambda$ e da porcentagem de ar secundário nas emissões de CO (a e b) e sobre as perdas de eficiência $q_a$ (símbolos cheios) e $q_b$ (símbolos vazios (c e d)).-----	79
Figura 36: Instalação experimental, 1) Pré aquecedor de ar, 2) Fornalha elétrica, 3) Tubo de quartzo, 4) Guia de onda sonora, 5) Sonda microfônica, 6) Auto falante, 7) Filtro de gás de combustão, 8) Analisador de gases, 9) Micromanômetro. -----	80
Figura 37: Queda de pressão ( $\Delta P$ ) e taxa de expansão no leito ( $(H-H_0)/H_0$ ) X velocidade do gás para diversas massas no leito sem intensificação acústica.-----	81
Figura 38: Queda de pressão ( $\Delta P$ ) e taxa de expansão no leito ( $(H-H_0)/H_0$ ) X velocidade do gás para diversas massas no leito com intensificação acústica. -----	81
Figura 39: Tempo de residência ( $t_{bo}$ ) e taxa de perda de massa de carbono ( $E_c$ ) X nível de Pressão Acústica (SPL) para $W = 100g$ e $f=120Hz$ . -----	82
Figura 40: Diagrama esquemático do combustor (dimensões em mm) -----	83

Figura 41: Chama sem atuação do campo acústico (a) e com atuação do campo acústico (b). (Rocha et al., 2008).-----	84
Figura 42: Distribuição de temperaturas. (Govardhan et al., 2008). -----	86
Figura 43: Foto da caldeira reformada e pronta para testes. -----	89
Figura 44: Esquema da caldeira após a reforma. -----	90
Figura 45: Parede de água da fornalha. -----	90
Figura 46: Entrada do 1º passe. -----	90
Figura 47: Saída do 1º passe e entrada do 2º passe.-----	90
Figura 48: Saída do 2º passe e entrada da chaminé. -----	90
Figura 49: Biomassa em cavacos. -----	91
Figura 50: Preparação de amostras de eucalipto para análise-----	92
Figura 51: Analisador CHNSO da Perkin Elmer series II 2400. -----	92
Figura 52: Balança conectada ao Analisador CHNSO da Perkin Elmer series II 2400. -----	92
Figura 53: Analisador termogravimétrico TGA LECO. -----	93
Figura 54: Amostras depois de realizada à análise termogravimétrica. -----	93
Figura 55: Comprimento característico ( $\lambda$ ) do combustível cuja granulometria foi ajustada por uma distribuição Rosin-Rammler. -----	94
Figura 56: Caracterização geométrica da partícula representativa do combustível. -----	95
Figura 57: Composição dos produtos da combustão para diferentes valores de coeficiente de excesso de ar (Lora et al. 2004). -----	101
Figura 58: Comprimento de onda. -----	108
Figura 59: Fluxos de massa da caldeira do NEST. -----	110
Figura 60: Balanço de energia da caldeira do NEST. -----	112
Figura 61: Normograma para determinação de perdas de calor para o meio ambiente ( $q_5$ )--	116
Figura 62: Equipamentos acessórios no esquema da caldeira -----	119
Figura 63: Alimentador em destaque no esquema da caldeira. -----	120
Figura 64: Vista frontal do soprador.-----	121
Figura 65: Vista traseira do soprador com os dutos de ar primário e secundário. -----	121
Figura 66: Bomba d'água já com a conexão de água em destaque na caldeira. -----	122
Figura 67: HD-SUB15-BLACK 15-Inch HD Series Front Firing Subwoofer. -----	123
Figura 68: Siglent SDG1025 25MHz 125 MSa/s Função sinal /Gerador de forma de onda arbitrária. -----	123
Figura 69: Esquema de conexão do SA e a tubulação de fornecimento de ar primário. -----	123
Figura 70: Analisador termogravimétrico (TGA701 LECO). -----	124

Figura 71: Analisador elementar (Perkin Elmer 2400 Series II CHNS/O).-----	125
Figura 72: Analisador portátil de gases LANCOM III.-----	125
Figura 73: Analisadores contínuos de gases.-----	126
Figura 74: Medidor de vazão Actaris classe B.-----	127
Figura 75: Medidores de vazão de ar Blaster.-----	128
Figura 76: Termômetro modelo MT-320 da Minipa.-----	128
Figura 77: Esquema da sonda resfriada e seus pontos de conexão.-----	129
Figura 78: Detalhe das conexões dos circuitos da sonda.-----	130
Figura 79: Detalhes da base da sonda e suas conexões.-----	130
Figura 80: Ponto de inserção da sonda na parte superior da câmara de combustão.-----	131
Figura 81: Ponto de inserção da sonda na parte interna superior da câmara de combustão.-----	131
Figura 82: Distância entre os tubos de água na fornalha.-----	131
Figura 83: Esquema dos tubos concêntricos e os anéis vazados.-----	132
Figura 84: Anéis ao longo da estrutura da haste.-----	132
Figura 85: Esquema da câmara de combustão em corte vertical com nível original de grelha e entradas de ar.-----	141
Figura 86: Esquema da câmara de combustão em corte vertical com níveis de grelha e entradas de ar usados no arranjo 1.-----	141
Figura 87: Esquema da câmara de combustão em corte vertical com nível da grelha para os arranjos 1 e 2, entradas de ar e sistema acústico usados na etapa 2 de testes.-----	142
Figura 88: Esquema da caldeira com indicação dos pontos de tomada de medidas.-----	143
Figura 89: Esquema descritivo do funcionamento da caldeira-----	146
Figura 90: Caldeira com a caixa d'água instalada.-----	152
Figura 91: Quadro de força instalado na caldeira.-----	152
Figura 92: Desenho referencial da grelha e do suporte da grelha para a câmara de combustão.-----	153
Figura 93: Chapa utilizada para a fabricação da grelha.-----	154
Figura 94: Chapa da grelha cortada e soldada pronta para ser usada.-----	154
Figura 95: Suportes da grelha, um de 10 [mm] e quatro de 20 [mm].-----	155
Figura 96: Grelha assentada nos suportes de 10 [mm] (a) e de 20 [mm] (b).-----	155
Figura 97: Tubulação e montagem da sonda.-----	157
Figura 98: Usinagem e soldagem dos tubos da sonda.-----	157
Figura 99: Sonda pronta sem as estruturas de suporte (manoplas).-----	158
Figura 100: Sonda sendo preparada para o teste de estanqueidade na GNS Usinagem.-----	159
Figura 101: Teste de estanqueidade da sonda realizado na GNS Usinagem.-----	159

Figura 102: Extremidade superior da sonda. -----	160
Figura 103: Extremidade inferior da sonda: acessos para amostra de gases. -----	160
Figura 104: Dados da bomba usada no circuito de água da sonda. -----	161
Figura 105: Planejamento do circuito de água da sonda. -----	162
Figura 106: Circuito de água da sonda. -----	163
Figura 107: Esquema do tratamento dos gases de combustão do leite para análise. -----	164
Figura 108: Sistema de amostragem dos gases de combustão do leite para a análise. -----	164
Figura 109: Sistema completo de análise de gases de combustão do leite. -----	165
Figura 110: Autofalante queimado em recondicionamento e bobina substituta. -----	166
Figura 111: Película de borracha para isolamento do volume de ar do autofalante. -----	167
Figura 112: Algumas configurações testadas para o SA -----	168
Figura 113: Configuração final do SA utilizada no teste com intensificação acústica -----	168
Figura 114: Desenho da caixa de som utilizada no SA -----	169
Figura 115: Caixa de som original cedida pela University of Iowa para os testes -----	170
Figura 116: Material utilizado para a fabricação das tubulações e conexões -----	171
Figura 117: Desenho do adaptador de diâmetros construído de madeira. -----	172
Figura 118: Adaptador de diâmetros de madeira. -----	173
Figura 119: Desenho do funil. -----	173
Figura 120: Funil de conexão. -----	174
Figura 121: Desenho do tubo usinado em T para conectar o funil à tubulação de ar primário. -----	174
Figura 122: Tubo Usinado em T durante usinagem na GNS Usinagem. -----	175
Figura 123: Desenho da placa de orifício e da tubulação de ar primário que a comporta. ---	176
Figura 124: Desenho da placa de orifício e da tubulação de ar secundário que a comporta. -	176
Figura 125: Desenho da tubulação complementar à montante da placa de orifício comportada na tubulação de ar secundário. -----	177
Figura 126: Placas de orifício para as tubulações de ar secundário e primário respectivamente. -----	177
Figura 127: Tomadas de pressão da placa de orifício para a tubulação de ar primário. -----	178
Figura 128: Vista da placa de orifício à montante e à jusante na tubulação de ar primário. -	178
Figura 129: Placas de orifício instaladas nas tubulações de ar primário e secundário. -----	179
Figura 130: Manômetros em U nas tomadas de pressão das placas de orifício. -----	179
Figura 131: Desenho do damper corta fogo. -----	180
Figura 132: Processo de usinagem do damper corta fogo na GNS Usinagem. -----	180
Figura 133: Teste de montagem da tubulação completa na GNS Usinagem. -----	181

Figura 134: Esquema de um termopar tipo B semelhante ao montado para o NEST/IEM/UNIFEI.-----	182
Figura 135: Termopar tipo B montado pela Alutal Controles Industriais LTDA para o NEST/IEM/UNIFEI.-----	183
Figura 136: Acesso original no teto da câmara de combustão.-----	184
Figura 137: Sequência de construção dos acessos no teto da câmara de combustão.-----	184
Figura 138: Acessos com guias prontos no teto da câmara de combustão.-----	185
Figura 139: Desenho da montagem completa da caldeira.-----	186
Figura 140: Caldeira completamente montada e pronta para os testes.-----	186
Figura 141: Soprador e bifurcação de ar em primário e secundário com dampers tipo “abre e fecha”.-----	188
Figura 142: Serragem de eucalipto no silo do alimentador.-----	192
Figura 143: Sequência de ignição na câmara de combustão.-----	193
Figura 144: Alcatrão escorrido na câmara de combustão.-----	193
Figura 145: Distribuição das cinzas na grelha dentro da câmara de combustão após teste 1.	194
Figura 146: Distribuição das cinzas na grelha fora da câmara de combustão após teste 1. --	194
Figura 147: Processo de fabricação da grelha inclinada na GNS Usinagem.-----	198
Figura 148: Posicionamento dos suportes e da grelha inclinada.-----	198
Figura 149: Serragem acumulada na entrada da câmara de combustão.-----	199
Figura 150: Esquema de alocação dos termopares.-----	201
Figura 151: Teste de vazão na sonda.-----	202
Figura 152: Primeira inserção da sonda na câmara de combustão.-----	202
Figura 153: Acessos na chaminé.-----	204
Figura 154: Esquema de tomada das temperaturas T1, T2 e T8 na câmara de combustão. --	231
Figura 155: Resposta de T1, T2, T6 e T8 à alimentação de biomassa – Teste 5.-----	232
Figura 156: Zonas de combustão após a alimentação do minuto 22 – Teste 5.-----	232
Figura 157: Evolução de T2, T2 e T8 com intensificação acústica – Teste 7.-----	233
Figura 158: Teor de O <sub>2</sub> consumido no leito com intensificação acústica – Teste 6.-----	234
Figura 159: Comportamento das temperaturas T1, T2 e T8 com intensificação acústica – Teste 7.-----	235
Figura 160: Evolução de T1, T2, T4, T6 e T8 no período do teste.-----	238
Figura 161: Resposta de T1, T2, T4, T6 e T8 à alimentação de biomassa.-----	238
Figura 162: Resposta de T1, T2, T4, T6 e T8 à reposição de água no tubulão.-----	239
Figura 163: Composição de gases no leito da câmara de combustão – Teste 5.-----	240

Figura 164: Evolução do O <sub>2</sub> ao longo do teste 5.-----	240
Figura 165: Evolução dos gases na chaminé ao longo do teste 6. -----	241
Figura 166: Teores de O <sub>2</sub> , CO e CO <sub>2</sub> na chaminé ao longo do teste 5.-----	242
Figura 167: Evolução das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 ao longo do período de operação do teste 6.-----	243
Figura 168: Evolução de T1, T2, T4, T6 e T8 sob Intensificação acústica no teste 6.-----	243
Figura 169: Evolução da composição de gases no leito da câmara de combustão no período de operação do teste 6. -----	244
Figura 170: Teor de O <sub>2</sub> no leito da câmara de combustão sob influência de intensificação acústica durante o período de operação do teste 6.-----	245
Figura 171: Evolução da composição de gases na chaminé na operação 6. -----	245
Figura 172: Teores de O <sub>2</sub> , CO e CO <sub>2</sub> na chaminé durante a operação do teste 6. -----	246
Figura 173: Evolução das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 ao longo do período de operação do teste 7.-----	247
Figura 174: Temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 durante a operação de 60 Hz do SA-----	248
Figura 175: Temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 durante a operação de 75 Hz do SA-----	248
Figura 176: Temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 durante a operação de 90 Hz do SA-----	249
Figura 177: Teor de O <sub>2</sub> no leito durante a Operação do SA a 60 Hz no teste 7.-----	250
Figura 178: Teor de O <sub>2</sub> no leito durante a Operação do SA a 75 Hz no teste 7.-----	250
Figura 179: Teor de O <sub>2</sub> no leito durante a Operação do SA a 90 Hz no teste 7.-----	250
Figura 180: Composição de gases na chaminé durante a operação do SA a 60 Hz no teste 7.251	
Figura 181: Composição de gases na chaminé durante a operação do SA a 75 Hz no teste 7.251	
Figura 182: Composição de gases na chaminé durante a operação do SA a 90 Hz no teste 7.251	
Figura 183: Comparativo T1 – 60 Hz. -----	253
Figura 184: Comparativo T2 – 60 Hz. -----	253
Figura 185: Comparativo T8 – 60 Hz. -----	253
Figura 186: Comparativo T1 – 75 Hz. -----	254
Figura 187: Comparativo T2 – 75 Hz. -----	254
Figura 188: Comparativo T8 – 75 Hz. -----	255
Figura 189: Comparativo T1 – 90 Hz. -----	255
Figura 190: Comparativo T2 – 90 Hz. -----	256
Figura 191: Comparativo T8 – 90 Hz. -----	256
Figura 192: Comparativo de O <sub>2</sub> no leito – 60 Hz.-----	257
Figura 193: Comparativo de O <sub>2</sub> no leito – 75 Hz.-----	257

Figura 194: Comparativo de O <sub>2</sub> no leito – 90 Hz.-----	258
Figura 195: Comparativo O <sub>2</sub> na chaminé – 60 Hz.-----	258
Figura 196: Comparativo CO na chaminé – 60 Hz.-----	259
Figura 197: Comparativo CO <sub>2</sub> na chaminé – 60 Hz.-----	259
Figura 198: Comparativo O <sub>2</sub> na chaminé – 75 Hz.-----	260
Figura 199: Comparativo CO na chaminé – 75 Hz.-----	260
Figura 200: Comparativo CO <sub>2</sub> na chaminé – 75 Hz.-----	261
Figura 201: Comparativo de O <sub>2</sub> na chaminé – 90 Hz.-----	261
Figura 202: Comparativo de CO na chaminé – 90 Hz.-----	262
Figura 203: Comparativo de CO <sub>2</sub> na chaminé – 90 Hz.-----	262
Figura 204: Comparativo T1 – Testes 6 x 5.-----	263
Figura 205: Comparativo T2 – Testes 6 x 5.-----	263
Figura 206: Comparativo T8 – Testes 6 x 5.-----	264
Figura 207: Comparativo O <sub>2</sub> no leito – Teste 6 x 5.-----	264
Figura 208: Comparativo O <sub>2</sub> na chaminé – Teste 6 x 5.-----	265
Figura 209: Comparativo CO na chaminé – Teste 6 x 5.-----	265
Figura 210: Comparativo CO <sub>2</sub> na chaminé – Teste 6 x 5.-----	266

## Lista de Tabelas

Tabela 1: Composição química média para madeira em base seca. -----	65
Tabela 2: Composição elementar média para o eucalipto em base seca. -----	66
Tabela 3: Composição imediata para o eucalipto em base seca. -----	66
Tabela 4: Poder calorífico do eucalipto. -----	67
Tabela 5: Análise aproximada e composição elementar dos combustíveis. -----	72
Tabela 6: Propriedades dos combustíveis usados nos experimentos.-----	75
Tabela 7: Experimentos. -----	75
Tabela 8: Condições operativas. -----	78
Tabela 9: Dados da caldeira do NEST. -----	88
Tabela 10: Composição elementar do eucalipto em bases seca e úmida (valores médios). ----	93
Tabela 11: Análise imediata do eucalipto (valores médios).-----	93
Tabela 12: Propriedades das partículas e do empacotamento do leito para o cavaco de pinus.	97
Tabela 13: Valores de pressão acústica real em função da potência acústica real. -----	108
Tabela 14: Valores de comprimento de onda para vários valores de frequência.-----	109
Tabela 15: Perdas de calor na caldeira. -----	113
Tabela 16: Diâmetros dos tubos concêntricos da haste da sonda.-----	132
Tabela 17: Diâmetros internos e externos dos tubos concêntricos. -----	133
Tabela 18: Detalhamento dos pontos de tomada de medidas. -----	144
Tabela 19: Descrição dos transdutores de temperatura. -----	144
Tabela 20: Descrição dos transdutores de pressão.-----	144
Tabela 21: Descrição dos transdutores de vazão.-----	145
Tabela 22: Classificação das variáveis. -----	145
Tabela 23: Variáveis manipuladas. -----	145
Tabela 24: Variáveis de seguimento.-----	146

Tabela 25: Variáveis independentes e sua faixa de variação para a etapa 1. -----	148
Tabela 26: Planejamento de testes para a etapa 1.-----	149
Tabela 27: Variáveis independentes e sua faixa de variação para o arranjo 2.-----	149
Tabela 28: Planejamento de testes para a etapa 2.-----	150
Tabela 29: Relação entre h, Q e $\dot{m}$ . -----	190
Tabela 30: Curva de alimentação para a serragem considerando os dois minutos do teste.--	191
Tabela 31: Parâmetros operacionais do Teste 1.-----	191
Tabela 32: Operação do Teste 1.-----	191
Tabela 33: Operação completa no Teste 2.-----	196
Tabela 34 Alguns dados da operação do teste 2. -----	197
Tabela 35: Dados do teste 4.-----	200
Tabela 36: Alocação dos termopares. -----	200
Tabela 37: Temperaturas no momento da inserção da sonda. -----	203
Tabela 38: Relação entre h, Q e $\dot{m}$ considerando a grelha e 4,2 [kg] de lenha. -----	205
Tabela 39: Dados da operação do teste 5. -----	205
Tabela 40: Dados relativos ao período de teste 5. -----	206
Tabela 41: Operação completa do teste 5.-----	208
Tabela 42: Temperaturas obtidas no teste 5. -----	210
Tabela 43: Composição de gases no leito da câmara de combustão durante o teste 5. -----	211
Tabela 44: Composição de gases na chaminé durante o teste 5. -----	212
Tabela 45: Valores de potência sonora e pressão acústica para a potência real de 400 [W].	213
Tabela 46: Números da operação do teste 6.-----	214
Tabela 47: Números relativos ao período de teste 6.-----	214
Tabela 48: Operação completa do teste 6.-----	214
Tabela 49: Temperaturas obtidas no teste 6 com intensificação acústica. -----	216
Tabela 50: Composição de gases no leito da câmara de combustão obtida no teste 6. -----	217
Tabela 51: Composição de gases na chaminé obtida no teste 6. -----	218
Tabela 52: Valores de potência sonora e pressão acústica para a potência real de 200 [W].	219
Tabela 53: Números da operação do teste 7.-----	219
Tabela 54: Números do período de teste em 60 Hz. -----	220
Tabela 55: Número do período de teste em 75 Hz. -----	220
Tabela 56: Número do período de teste em 90 Hz. -----	221
Tabela 57: Operação completa do teste 7.-----	221
Tabela 58: Temperaturas obtidas no teste 7 com intensificação acústica. -----	224

Tabela 59: Composição de gases no leito da câmara de combustão obtida no teste 7. -----	225
Tabela 60: Composição de gases na chaminé obtida no teste 7. -----	227
Tabela 61: Dados dos períodos de operações dos testes 5, 6 e 7. -----	229
Tabela 62: Acionamento e desligamento do SA durante a operação do teste 7. -----	249

## Simbologia

### Letras Latinas

$\bar{h}_1$	Valor médio do coeficiente de convecção da entrada até x	[W/m <sup>2</sup> . K]
$a_p$	Fração de cinzas nos resíduos extraídos pelo fundo da fornalha	[%]
$A_p$	Teor de cinzas nos resíduos da fornalha	[%]
$a_{rr}$	Fração da quantidade total de cinzas na chaminé	[%]
$A^t$	Teor de cinzas na composição elementar do combustível	[%]
$c$	Velocidade do som no ar	[m/s]
$C$	Consumo de combustível	[kg/s]
$c_{ar}$	Calor específico do ar	[MJ/m <sup>3</sup> . °C]
$C_{arr}$	Teor de carbono nos resíduos arrastados pela chaminé	[%]
$c_{H_2O}$	Calor específico do vapor	[MJ/m <sup>3</sup> . °C]
$CH_4$	Concentração de CH <sub>4</sub> nos gases de combustão	[%]
$c_{N_2}$	Calor específico do nitrogênio	[MJ/m <sup>3</sup> . °C]
$CO$	Concentração de CO nos gases de combustão	[%]
$CO_2$	Concentração de CO <sub>2</sub> nos gases de combustão	[%]

$CO_2^{\max}$	Concentração máxima possível de $CO_2$ nos gases de combustão	[%]
$C_p$	Teor de carbono nos resíduos retirados pelo fundo da fornalha	[%]
$c_p$	Calor específico dos resíduos de cinzas	[kJ/kgK]
$c_{pa1}$	Calor específico a pressão constante da água em $V_{h1}$	[kJ/kg.K]
$c_{RO2}$	Calor específico do oxigênio	[MJ/m <sup>3</sup> . °C]
$C^t$	[kg] de carbono por [kg] de combustível	[kg/kg <sub>comb</sub> ]
$d$	Diâmetro da partícula	[m]
$d_1$	Largura da partícula	[m]
$d_2$	Espessura da partícula	[m]
$D_{e2}$	Diâmetro externo do tubo 2	[m]
$D_{e3}$	Diâmetro externo do tubo 3	[m]
$d_{es1}$	Diâmetro equivalente do tubo na seção 1 do duto de fornecimento de ar primário	[m]
$D_{H1}$	Diâmetro hidráulico do volume $V_{h1}$	[m]
$D_{i1}$	Diâmetro interno do tubo 1	[m]
$D_{i2}$	Diâmetro interno do tubo 2	[m]
$d_p$	Diâmetro equivalente da partícula	[m]
$f$	Fator de atrito	
$fr$	Frequência	[Hz]
$G_{cin1}$	Fluxo de cinzas removido pelo cinzeiro abaixo da fornalha	[kg/s]
$G_{cin2}$	Fluxo de cinzas arrastada com os gases de combustão	[kg/s]
$H$	Altura do leito do experimento de Chirone	[m]
$H_0$	Altura do leito não expansível do experimento de Chirone	[m]
$h_{a.f}^0$	Entalpia do volume de ar teoricamente necessário para a combustão de 1 [kg] de combustível	
$H_2$	Concentração de $H_2$ nos gases de combustão	[%]
$h_a^0$	Entalpia teórica de ar	[kJ/kg ou kJ/m <sup>3</sup> ]
$h_a^a$	Entalpia do ar para a combustão à temperatura ambiente	[kJ/kg]
$h_{aa}$	Entalpia da água de alimentação	[kJ/kg]
$h_{cinzas}$	Entalpia da cinza volátil presente nos produtos da combustão	[kJ/kg ou kJ/m <sup>3</sup> ]
$h_g$	Entalpia real de gases de combustão	[kJ/kg ou kJ/m <sup>3</sup> ]
$h_{g.e}$	Entalpia dos gases de escape, calculada a partir do coeficiente	[kJ/kg]

	de excesso de ar e da temperatura dos gases	
$h_g^0$	Entalpia teórica de gases de combustão	[kJ/kg ou kJ/m <sup>3</sup> ]
$H_L$	Altura do leito	[m]
$H^t$	[kg] de hidrogênio por [kg] de combustível	[kg/kg <sub>comb</sub> ]
$h_{vsat}$	Entalpia do vapor saturado	[kJ/kg]
$I_r$	Fluxo de potência sonora real	[W/m <sup>2</sup> ]
$I_{ref}$	Fluxo de potência sonora de referência	[W/m <sup>2</sup> ]
$l$	Comprimento da partícula	[m]
$La$	Fluxo de ar para a combustão	[Kg/s] ou [m <sup>3</sup> /s]
$L_{bs}$	Comprimento da haste da sonda	[m]
$L_d$	Comprimento do duto de conexão entre o SA e o duto de ar primário	[m]
$L_g$	Fluxo de gases de escape	[Kg/s] ou [m <sup>3</sup> /s]
$L_{s1}$	Comprimento da seção 1 do duto de fornecimento de ar primário	[m]
$L_{s2}$	Comprimento da seção 2 do duto de fornecimento de ar primário	[m]
$m_a$	Massa real de ar	[kg]
$m_{Atest}$	Massa de cinzas no teste	[kg]
$m_{Aop}$	Massa de cinzas na operação	[kg]
$m_{bio\ test}$	Massa de biomassa consumida no teste	[kg]
$m_{bio\ op}$	Massa de biomassa consumida na operação	[kg]
$m_a^0$	Massa estequiométrica de ar	[kg <sub>ar</sub> /kg <sub>comb</sub> ]
$\dot{m}_{a1}$	Vazão mássica de água em $V_{h1}$	[kg/s]
$\dot{m}_{a2}$	Vazão mássica de água em $V_{h2}$	[kg/s]
$\dot{m}_{aa}$	Vazão mássica de água de alimentação	[kg/s]
$\dot{m}_p$	Fluxo de resíduos extraídos pelo fundo da fornalha, referente ao total de resíduos sólidos, incluindo a cinza e o carbono não queimado	[kg/s]
$\dot{m}_{v.s.nom}$	Produção nominal (nom) de vapor	[t/h]
$\dot{m}_{vsat}$	Vazão mássica de vapor saturado	[kg/s]
$N^t$	[kg] de nitrogênio por [kg] de combustível	[kg/kg <sub>comb</sub> ]

$O_2$	Concentração de $O_2$ nos gases de combustão	[%]
$O^t$	[kg] de oxigênio por [kg] de combustível	[kg/kg <sub>comb</sub> ]
$P$	Pressão	[Pa]
$P_{b1}$	Potência necessária para uma bomba em $V_{h1}$	[W]
$P_{b2}$	Potência necessária para uma bomba em $V_{h2}$	[W]
$PCI^t$	Poder calorífico inferior do combustível	[kJ/kg]
$P_r$	Pressão real	[Pa]
$P_{ref}$	Pressão de referência	[Pa]
$q''_{convsc}$	Fluxo de calor convectivo na saída da câmara de combustão	[W/m <sup>2</sup> ]
$q''_{rad} =$	Fluxo de calor radiante do leito	[W/m <sup>2</sup> ]
$Q_2$	Perdas com os gases de escape	[W]
$Q_3$	Perda por combustão química incompleta	[W]
$Q_4$	Perdas por combustão mecânica incompleta	[W]
$Q_5$	Perdas ao meio ambiente	[W]
$q_{5nom}$	Perdas de calor ao meio ambiente para uma produção nominal de vapor	[%]
$Q_6$	Perdas devidas a alta temperatura dos resíduos de cinzas	[W]
$q_{conv1}$	Transferência de calor por convecção total em $V_{h1}$	[W]
$Q_e$	Energia absorvida pelas superfícies de troca de calor	[W]
$q_i$	Perdas	[W]
$Q_d^t$	Energia que entra no volume de controle configurado pela caldeira, no caso da nossa caldeira é o $PCI^t$	
$Re_{D1}$	Número de Reynolds para o escoamento em $V_{h1}$	
$Re_{D2}$	Número de Reynolds para o escoamento em $V_{h2}$	
$r_{eq}$	Raio equivalente	[m]
$S$	Seção transversal do leito	[m <sup>2</sup> ]
$S_{esf}$	Superfície da esfera equivalente	[m <sup>3</sup> ]
$S^t$	[kg] de enxofre por [kg] de combustível	[kg/kg <sub>comb</sub> ]
$t_a$	Temperatura ambiente	°C
$T_{ae1}$	Temperatura de entrada da água em $V_{h1}$	[°C ou K]
$T_{as1}$	Temperatura de saída da água de $V_{h1}$	[°C ou K]
$t_{ge}$	Temperatura dos gases de escape	°C
$T_{gescc}$	Temperatura dos gases de combustão na saída da câmara de	[°C ou K]

	combustão	
$T_{si}$	Temperatura da superfície do tubo 1	[°C ou K]
$T_{sr} =$	Temperatura no leito	[°C ou K]
$u_0$	Velocidade superficial do gás	[m/s]
$u_{ma1}$	Velocidade média do escoamento de água em $V_{h1}$	[m/s]
$v$	Velocidade média do ar em escoamento na seção	[m/s]
$V_a$	Volume real de ar	[Nm <sup>3</sup> <sub>ar</sub> /kg <sub>comb</sub> ]
$V_a^0$	Volume estequiométrico de ar	[Nm <sup>3</sup> <sub>ar</sub> /kg <sub>comb</sub> ]
$v_{av}$	Velocidade média do ar em escoamento no duto vazio	[m/s]
$V_{esf}$	Volume da esfera equivalente	[m <sup>3</sup> ]
$V_g$	Volume real gases gerados durante a combustão.	[Nm <sup>3</sup> <sub>ar</sub> /kg <sub>comb</sub> ] [Nm <sup>3</sup> <sub>ar</sub> /m <sup>3</sup> <sub>comb</sub> ]
$V_{g,s}$	Volume dos gases secos	[m <sup>3</sup> /kg]
$V_g^0$	Volume estequiométrico gases gerados durante a combustão de 1[kg] de combustível para $\alpha = 1,0$	[Nm <sup>3</sup> <sub>gas</sub> /kg <sub>comb</sub> ]
$V_{gs}$	Volume de gases secos	[m <sup>3</sup> /kg]
$V_{H_2O}^0$	Volume estequiométrico de vapor de água	[Nm <sup>3</sup> <sub>H2O</sub> /kg <sub>comb</sub> ]
$V_{N_2}^0$	Volume estequiométrico de Nitrogênio	[Nm <sup>3</sup> <sub>N2</sub> /kg <sub>comb</sub> ]
$V_p$	Volume da partícula	[m <sup>3</sup> ]
$V_{RO_2}^0$	Volume estequiométrico de oxigênio	[Nm <sup>3</sup> <sub>O2</sub> /kg <sub>comb</sub> ]
$W$	Massa no leito	[kg]
$W_{CO}$	Massa de carbono no leito em $t=0$	[kg]
$W_r$	Potência sonora real	[W]
$W_{ref}$	Potência sonora de referência	[W]
$W^t$	[kg] de água (umidade) por [kg] de combustível	[kg/kg <sub>comb</sub> ]
$\Delta P_1$	Queda de pressão em $V_{h1}$	[Pa]
$\Delta P_2$	Queda de pressão em $V_{h2}$	[Pa]
$\Delta T_{ml}$	Média das diferenças de temperatura ao longo de $x$	[°C ou K]
$\bar{Y}$	Massa total acumulada da distribuição	[kg]

## Letras Gregas

$\mu$	fração de cinzas nos gases de combustão	[%]
$\mu_a$	Viscosidade do ar	[kg/ms]
$\mu_{a1}$	Viscosidade da água em $V_{h1}$	[N.s/m <sup>2</sup> ]
$\mu_{a2}$	Viscosidade da água em $V_{h2}$	[N.s/m <sup>2</sup> ]
$\alpha$	Coeficiente de excesso de ar	
$\alpha_{ge}$	Volume de gases de escape	[m <sup>3</sup> ]
$\beta$	Coeficiente de Bunte	
$\Delta P$	Perda de carga	[Pa]
$\Delta P_{s1}$	Perda de carga na seção 1 do duto de fornecimento de ar primário	[Pa]
$\Delta P_{s2}$	Perda de carga na seção 2 do duto de fornecimento de ar primário	[Pa]
$\varepsilon$	Porosidade	
$\varepsilon$	Emissividade	
$\eta_c$	Eficiência da caldeira	[%]
$\lambda$	Comprimento de onda	[m]
$\lambda_c$	Comprimento característico da distribuição	[m]
$\lambda$	Excesso de ar	[m]
$\lambda$	Comprimento característico ( $\lambda=l/d$ )	[m]
$\rho_a$	Massa específica do ar	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{a1}$	Densidade da água em $V_{h1}$	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{emp}$	Densidade de empacotamento	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_p$	Densidade da partícula	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	Constante de Stefan Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8}$ )	[W/m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> ]
$\psi$	Esfericidade	

## Sobrescritos

0	Teórico
a	Temperatura ambiente
t	Combustível de trabalho

## Subscritos

a	Ar
a	Ambiente
aa	Água de alimentação
ap	Duto de fornecimento de ar primário
cin1	Cinzas removidas pelo cinzeiro abaixo da fornalha
cin2	Cinzas arrastadas com os gases de combustão
comb	Combustível
d	Duto de conexão entre o SA e o duto de ar primário
eq	Equivalente
g	Gases (real)
ge	Gases de escape
gs	Gases (estequiométrico)
p	Partícula
p	Resíduos de cinzas

r	Real
ref	Referência
s1	Seção 1 do duto de fornecimento de ar primário
s2	Seção 2 do duto de fornecimento de ar primário
t	Combustível de trabalho
vsat	Vapor saturado

## **Abreviaturas**

Comb	Combustível
------	-------------

## **Siglas**

ABRAF	Associação Brasileira de Produtores de Florestas
-------	--

ASTM	American Society for Testing and Materials	
CAPES	Comissão de Aperfeiçoamento de Pessoal do Nível Superior	
CFD	Dinâmica dos fluidos computacional	
GV	Gerador de Vapor	
CGEE	Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil	
CNPq	Conselho Nacional de Pesquisa	
FAPEMIG	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais	
IEM	Instituto de Engenharia Mecânica	
GEE	Gases do Efeito Estufa	
MIED	Mechanical and Industrial Engineering Department	
MME	Ministério de Minas e Energia	
NEST	Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída	
OIE	Oferta Interna de Energia	
PCI	Poder calorífico inferior	
PCS	Poder calorífico superior	
PWL	Nível de potência sonora	[dB]
REB	Resenha Energética Brasileira	
SIL	Nível de intensidade sonora	[W/m <sup>2</sup> ]
SPL	Nível de pressão sonora	[dB]
UNIFEI	Universidade Federal de Itajubá	

## Capítulo 1

# INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

As fornalhas são equipamentos utilizados em larga escala na indústria. Uma modalidade de sua utilização é referente à combustão de biomassa, tecnologia comercial de uso na indústria açucareira, de papel e celulose e em centrais termelétricas que utilizam resíduos florestais e agrícolas, como combustível.

As emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da queima de biomassa são praticamente iguais à quantidade de CO<sub>2</sub> que a planta absorve do ambiente durante a fase de crescimento, o que faz o processo de cogeração quase neutro em termos de gases de efeito estufa e justifica a combustão de biomassa para a geração de energias térmica e elétrica, principalmente onde se tem disponível em abundância esse combustível.

O uso de biomassa se justifica entre outros fatores pela sua abrangente disponibilidade, renovabilidade e baixos impactos ambientais na sua utilização.

Segundo o Ministério de Minas e Energia (MME, 2015) ao se analisar a Oferta Interna de Energia (OIE) de 2014 comparada com a de 2013 se observa um pequeno decréscimo na participação das fontes renováveis, como resultado, principalmente, da retração da geração hidráulica e do baixo desempenho do consumo de lenha na produção de ferro-gusa. Apesar de outras energias renováveis (eólica, biodiesel, etc), terem apresentado um desempenho de

19,5%, o número não foi suficiente para manter a participação das renováveis na OIE. Neste contexto, as fontes renováveis passaram a ter uma participação de 39,4% na demanda total de energia de 2014, dos quais o consumo de lenha e carvão vegetal responde por 20,5%. As fontes renováveis responderam por 40,4% da demanda total de energia em 2013. A Figura 1 mostra a Oferta Interna de Energia no Brasil em 2014 (%).

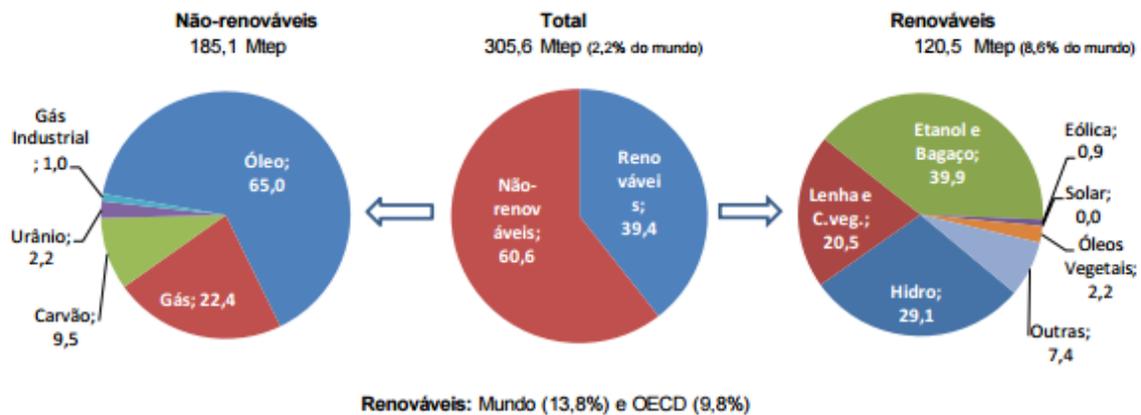


Figura 1: Oferta Interna de Energia no Brasil em 2014 (%) (REB 2015).

Porém, segundo o Ministério de Minas e Energia (MME), (2016), em 2015 se observa um acréscimo na participação das fontes renováveis em relação à 2014 como resultado, principalmente, da forte retração das não-renováveis. Verifica-se que em 2015 19,9% da demanda de energia foi atendida com lenha e carvão vegetal. A Figura 2 mostra a Oferta Interna de Energia no Brasil em 2015 (%).

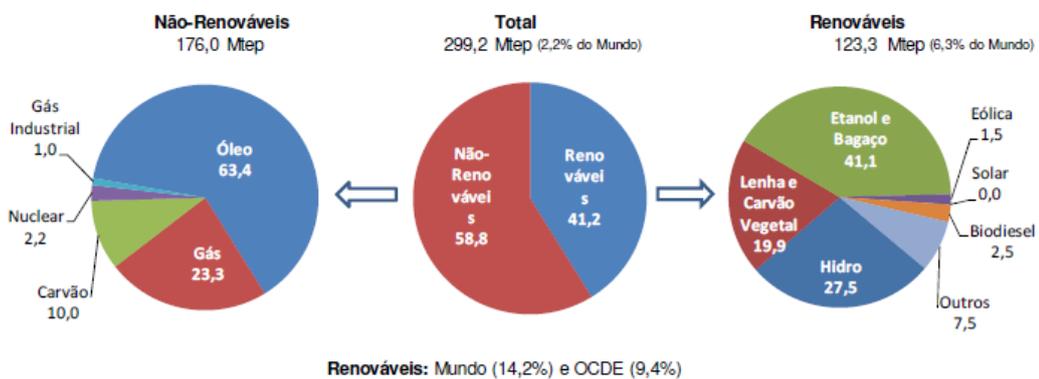


Figura 2: Oferta Interna de Energia no Brasil em 2015 (%) (REB 2016).

O aproveitamento da biomassa para geração de energia elétrica alavancou a utilização de caldeiras nas diversas faixas de pressão disponíveis. Até a década de 90, mesmo os grandes

produtores de energia elétrica por queima de biomassa, que eram as grandes usinas de álcool e açúcar operavam caldeiras de baixa pressão (até 22 [bar]), mas a necessidade de aumento da produção, motivada também pela possibilidade de venda do excedente da energia gerada para a rede levou à utilização de caldeiras de média pressão (60 a 70 [bar]) e de alta pressão (150 a 180 [bar]) (Seabra et al., 2011).

A conversão de biomassa em energia pode ocorrer segundo algumas rotas de conversão. As principais estão listadas abaixo:

1. Queima direta em caldeira para cogeração de energia térmica (vapor) e energia elétrica em ciclo Rankine;
2. Gaseificação para produção de energia em motores de combustão interna com ciclo combinado com turbina a gás;
3. Produção de etanol de segunda geração por meio da hidrólise da celulose seguida de fermentação;
4. Gaseificação + Fischer-Tropsch e outras tecnologias de rota catalítica para produção de biocombustíveis de segunda geração.

Ao se considerar a análise de ciclo de vida, todas as rotas de conversão acima citadas apresentam vantagens ambientais se comparadas com a obtenção de energia através da queima de combustíveis fósseis. Além disso, ao se considerar a análise técnico-econômica comparando-se as rotas de conversão da biomassa, percebe-se que a melhor opção para o aproveitamento da biomassa continua sendo a queima direta para produção de vapor e eletricidade em ciclo Rankine. (Chauhan et al., 2011).

Caldeiras são equipamentos amplamente utilizados desde a invenção da máquina a vapor por Watt ainda no século XVIII. O conceito por trás da tecnologia do funcionamento das caldeiras muito pouco se alterou, porém houve grande evolução em termos de eficiência dos equipamentos. (Dahl, et al., 2004).

Esta melhoria se deve aos avanços em termos de novos materiais que permitem operar com níveis de pressão e temperatura mais altos além de detalhes de montagem e fabricação dos equipamentos modernos como alterações aerodinâmicas na fornalha visando maior aproveitamento da energia contida na biomassa disponível além de minimizar as emissões de gases do efeito estufa (GEE) (Li et al., 2009).

Pesquisas de caldeiras aquatubulares que operam com combustíveis gasosos e líquidos são mais comuns do que as pesquisas com caldeiras que operam com combustíveis sólidos. Mesmos dentre as caldeiras que operam com combustíveis sólidos, são mais comuns

pesquisas nas que operam com carvão pulverizado em detrimento às que operam com outros tipos de biomassa. (Oberberger et al., 2000).

Recentes avanços em tecnologias de micro e mini geração com vapor de água (expansores de rosca, turbinas radiais e motores a vapor) tem aumentado o interesse pelo acréscimo de eficiência em caldeiras a vapor a biomassa de pequena capacidade. As caldeiras híbridas constituem uma opção que combinam as tecnologias aquatubulares e pitotubulares.

Diversas pesquisas tem estudado os processos da combustão de biomassa em caldeiras de leito fixo em função de variação de parâmetros operacionais como a vazão mássica de ar primário e secundário, além da aerodinâmica na fornalha. Esta variação de parâmetros pode fornecer informações sobre o comportamento do processo da combustão em termos de mapas de temperatura e de formação de espécies de gases. Normalmente o objetivo destas pesquisas é avaliar a eficiência do equipamento melhorando a qualidade da combustão e mitigando as emissões de poluentes.

Para a avaliação destas mudanças geométricas e aerodinâmicas nas caldeiras é necessário um grande investimento pela necessidade de intervenções metalúrgicas e construtivas a cada alteração, além da demanda de grandes períodos de tempo entre cada teste. A modelagem dos equipamentos com simulação matemática computacional também é uma alternativa. Existem disponíveis softwares comerciais em Mecânica dos Fluidos Computacional como o CFD (Computational Fluid Dynamics), cujos custos de licenças, apesar de mais acessíveis que no passado, continuam um fator limitante na capacidade e no custo de processamento. (Mann, et al., 2005).

Existem pesquisas na área de intensificação acústica principalmente para combustíveis gasosos que sugerem que as pulsações acústicas geralmente podem aumentar as taxas de transferência de momento, massa e calor. Como consequência pode-se esperar o aumento da potência máxima do equipamento e de sua eficiência de combustão, além do decréscimo das emissões de CO, NO<sub>x</sub> e fuligem. Além disso, apresenta para testes uma menor complexidade de montagem, menor custo para avaliação e instalação de mudanças de projeto. O ruído produzido pela pulsação é uma desvantagem que pode ser mitigada com a utilização de isoladores acústicos (Zinn, 1992) e (Alfie et al., 2014)

Uma possibilidade de se obter melhorias na eficiência da combustão realizada em fornalhas de caldeiras à biomassa e aumento da potência destes equipamentos é através da intensificação acústica, ou seja, utilizando um gerador de ondas sonoras associado a um gerador de frequência na entrada de ar para obter na velocidade da entrada de ar, na turbulência, na mistura do ar com o combustível com conseqüente aumento na velocidade da

combustão, pois a biomassa queima em sua quase totalidade em fase gasosa, após a sua volatilização, logo, a intensificação acústica pode ter uma influência positiva sobre a combustão.

Nos laboratórios do NEST da UNIFEI existe uma caldeira mista aquatubular e flamotubular, em escala de laboratório, de pequeno porte (21 [bar] de pressão máxima). A caldeira foi reformada para possibilitar a realização de testes e disponibilizada para este trabalho.

Esta tese de doutorado é de caráter experimental e se propôs a avaliar o processo de combustão de eucalipto em fornalha de leito fixo em escala de laboratório com e sem a intensificação acústica em seu fornecimento de ar primário.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo experimental da combustão de eucalipto com alimentação por bateladas no leito em caldeira de leito fixo com avaliação da influência da intensificação acústica da combustão, inserida no fornecimento de ar primário, operando com parâmetros pré-determinados, através da comparação dos perfis de temperatura na câmara de combustão, inclusive no leito e da composição de gases no leito e na chaminé.

Este estudo também almeja a ampliação do conhecimento do processo de combustão de biomassa em caldeira de leito fixo além de gerar grande quantidade de dados experimentais que poderão ser referência para construção e validação de modelos matemáticos em trabalhos futuros, inclusive do NEST.

### **1.2.2 Objetivos Específicos**

- Determinação dos parâmetros operacionais tais como a Relação de Equivalência, a relação entre ar primário e ar secundário, a altura do leito e a granulometria da

biomassa para possibilitar a avaliação da influência da intensificação acústica no processo de combustão.

- Desenvolvimento e construção de sonda (pirômetro de sucção) refrigerada a água que permita realizar coleta de amostra de gases continuamente no leito de combustão.
- Desenvolvimento de sonda que permita realizar medidas de temperatura no leito de combustão.
- Definição dos sistemas de controle, de instrumentação e aquisição de dados necessários para a realização dos testes.
- Desenvolvimento de metodologia experimental que possa garantir a realização dos ensaios e coleta de informações.
- Análise da utilização de intensificação acústica da combustão implementada na entrada de ar primário com avaliação da frequência de oscilação do gerador de ondas sonoras na performance do equipamento.

### **1.3 METODOLOGIA**

As pesquisas que fundamentaram esta tese de doutorado foram realizadas na Fornalha fabricada pela AGTherm, existente nos laboratórios do NEST/UNIFEI remodelada pela própria AGTherm com recursos da FAPEMIG projeto “Convênio Fapemig TEC APQ 02924-10”. A caldeira está devidamente descrita no item 3.1 do capítulo 3.

Foi utilizada a caracterização físico-química do eucalipto, incluindo composição elementar e imediata realizada por Oliveira, 2014.

A caldeira foi devidamente instrumentada, e ferramentas computacionais e equipamentos adequados permitiram realizar a aquisição dos dados. A instrumentação e o planejamento dos testes práticos estão descritos nos itens 3.4.2 e 3.7.3 do capítulo 3, respectivamente.

Inicialmente foram determinados os parâmetros operacionais da caldeira que possibilitaram avaliar a influência da intensificação acústica no processo de combustão.

A pesquisa foi então dividida em duas etapas experimentais e uma terceira etapa de análises:

Etapa 1: Nesta etapa foram realizados testes com a configuração do arranjo 1 da caldeira descrito no item 3.6.1 sem a intensificação acústica para a obtenção de dados sobre o perfil de temperaturas na câmara de combustão, na chaminé e na saída de vapor, da composição dos gases de combustão na câmara de combustão, inclusive no leito de combustão e na chaminé para posterior análise.

Etapa 2: Nesta etapa foram realizados testes com a configuração do arranjo 2 da caldeira descrito no item 3.6.2 com a intensificação acústica para a obtenção de dados sobre o perfil de temperaturas na câmara de combustão, na chaminé e na saída de vapor, da composição dos gases de combustão na câmara de combustão, inclusive no leito de combustão e na chaminé para posterior análise. Para isso, foi anexado ao sistema de fornecimento de ar primário da caldeira um sistema acústico, que está descrito no item 4.5. Para esta análise, a caldeira será operada com os mesmos parâmetros operacionais utilizados na Etapa 1, porém, com a intensificação acústica no fornecimento de ar primário.

Para cada um dos testes de forma independente foi desenvolvido um protocolo de teste que descreve como ele foi realizado. Tanto o plano de teste quanto o protocolo de teste estão apresentados no item 3.7.5.

Etapa 3: Nesta etapa foram tabulados e analisados todos os dados obtidos durante as etapas experimentais anteriores.

Foram realizadas comparações das operações do equipamento com e sem a intensificação acústica através da análise dos perfis de temperatura, na composição dos gases de combustão no leito e na chaminé e consequentemente na geração específica de vapor, na potência máxima gerada no equipamento e na eficiência da combustão da biomassa operando com e sem a intensificação acústica.

Foram feitos gráficos comparativos para ilustrar a análise da operação com e sem a intensificação acústica no fornecimento de ar primário. A partir destes gráficos comparativos foi feita a análise dos resultados deste trabalho.

## 1.4 TREINAMENTO PARA OPERAR A CALDEIRA

Em atendimento aos requisitos da NR13 para operação de caldeiras e vasos de pressão o autor participou do treinamento e foi certificado como “Operador de Caldeiras” na própria caldeira do NEST em que foram realizados os experimentos desta tese. A certificação ocorreu em atividades realizadas nos dias 10, 17 e 18/09/2015 nos laboratórios do NEST e foi ministrada pelo Eng. José Garcia Pereira, representante do fabricante AGTherm. Como verificação e preparação do equipamento para a operação e certificação foram realizados testes hidrostáticos e mandrilagem da tubulação nos espelhos.

Para a realização dos testes hidrostáticos a caldeira foi enchida com água e a bomba de entrada de água foi acionada aumentando a pressão interna até 6 [kgf/cm<sup>2</sup>] com subsequente vistoria das junções dos tubos nos espelhos do tubulão. Nos tubos que apresentaram vazamentos foi realizada a mandrilagem. O processo se repetiu aumentando a pressão até o limite de 9,75 [kgf/cm<sup>2</sup>] quando a primeira válvula de segurança atuou. A Figura 3 e a Figura 4 mostram os tubos com o vazamento após o aumento da pressão no teste hidrostático a 6 [kgf/cm<sup>2</sup>] e a 9 [kgf/cm<sup>2</sup>] respectivamente. A Figura 5 mostra a operação de mandrilagem na caldeira.



Figura 3: Vazamento nos tubos após a pressão ser elevada a 6 kgf/cm<sup>2</sup>.



Figura 4: Vazamento nos tubos após a pressão ser elevada a 9 kgf/cm<sup>2</sup>.



Figura 5: Operação de mandrilagem nos tubos da caldeira.

Após a realização dos testes hidrostáticos, a caldeira foi operada em duas sessões de testes de quatro horas queimando lenha de eucalipto. Nestas seções de testes foram ensaiadas todas as situações de operação. Foram testadas as válvulas de segurança, de alívio de vapor, de purga do tubulão, assim como todos os equipamentos, como o ventilador (soprador), a rosca de alimentação e a bomba de alimentação de água. Observa-se que as duas válvulas de segurança estão reguladas para atuar quando o nível de pressão interna atingir  $9,75 \text{ kgf/cm}^2$  e  $10 \text{ kgf/cm}^2$ , respectivamente. A Figura 6 e a Figura 7 mostram a caldeira em operação.



Figura 6: Caldeira em operação, manômetro registra  $7 \text{ [kgf/cm}^2]$ .



Figura 7: Caldeira em operação, fornalha queimando lenha de eucalipto.

## **1.5 CONTRIBUIÇÕES CIENTÍFICAS DO TRABALHO**

- Estudo realizado em caldeira mista piroquatubulares.
- Análise do efeito da intensificação acústica na performance do equipamento

## Capítulo 2

# REVISÃO DE LITERATURA

## 2.1 GERADORES DE VAPOR

Vapor de água é usado como meio de geração e transporte de energia desde o início do desenvolvimento industrial no século XVIII quando surgiram os primeiros equipamentos para a sua geração. Uma das razões para a utilização do vapor é que a água é a substância mais abundante da Terra, sendo assim de baixo custo. Além disso, na forma de vapor a água possui alto conteúdo de energia por unidade de massa. Possui relações de temperatura e pressão de saturação que permitem utilização como fonte de calor a temperaturas médias e de larga utilização industrial com pressões de trabalho toleráveis pela tecnologia disponível.

O vapor pode ser utilizado na geração de energia elétrica como fluido de conversão da energia térmica para mecânica de eixo. Pode também ser utilizado em indústrias químicas como principal fonte de aquecimento: reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos, além de outros setores industriais, como metalúrgico, metalomecânico, dentre outros. Pode-se utilizar de vapor como fonte de aquecimentos de diversos processos.

Algumas unidades de distribuição de energia térmica podem ser projetadas com outros fluidos de trabalho que não o vapor de água, como por exemplo, óleos minerais ou outros fluidos orgânicos sintéticos. Em determinadas situações estes fluidos apresentam a vantagem de possuírem baixas temperaturas de ebulição (entre 170 e 350 °C).

A maioria dos processos industriais utiliza vapor saturado com pressões inferiores a 10,2 [kgf/cm<sup>2</sup>] (10 [bar]), que é o caso da pressão de operação da caldeira que será utilizada neste trabalho. Apesar de poder trabalhar com pressões de até 21 [kgf/cm<sup>2</sup>] (20,59 [bar]), ela será operada entre 7 [kgf/cm<sup>2</sup>] (6,86 [bar]) e 8 [kgf/cm<sup>2</sup>] (7,85 [bar]) neste trabalho. Já os acionamentos mecânicos utilizam normalmente vapor superaquecido, com pressões de trabalho normalmente maiores, limitadas pela capacidade dos materiais de construção empregados.

Grandes caldeiras a biomassa são utilizadas tanto para geração própria de energia elétrica quanto para processos de aquecimento, estão limitadas a pressões da ordem de 100 kgf/cm<sup>2</sup>. Existem caldeiras de maiores pressões, mas utilizadas somente em grandes centrais termoelétricas ou grandes complexos industriais, representando um número muito reduzido de unidades, em comparação com as milhares de pequenas caldeiras em operação (Bizzo, 2003) e (Bazzo, 1995).

Podem-se segregar as faixas de pressão de utilização do vapor de trabalho para caldeiras aquatubulares segundo Lora et al., 2004 conforme abaixo:

- Caldeiras de vapor de baixa e média pressão: até 101,97 [kgf/cm<sup>2</sup>] (100 [bar]).
- Caldeiras de vapor de alta pressão: entre 101,97 [kgf/cm<sup>2</sup>] (100 [bar]) e 163,15 [kgf/cm<sup>2</sup>] (160 [bar]).
- Caldeiras de vapor de pressão super alta: acima de 173,35 [kgf/cm<sup>2</sup>] (170 [bar]).
- Caldeiras de vapor de pressão supercrítica: acima de 225,36 [kgf/cm<sup>2</sup>] (221 [bar]).
- Caldeiras de vapor de pressão deslizante: Consiste em operar a cargas parciais em uma pressão de vapor menor que a nominal.
- Em pequena escala, a geração distribuída com vapor saturado (expansores de rosca, turbinas radiais e motores) faz com que seja necessário aprimorar a eficiência das caldeiras a biomassa.

### 2.1.1 DEFINIÇÕES

Gerador de vapor é um complexo trocador de calor que produz vapor a partir da energia térmica proveniente da combustão, reação exotérmica do combustível com o ar, e do fluido vaporizante, ou de trabalho. Todos os geradores de vapor cabem nesta definição, desde os que utilizam fluidos térmicos (mercúrio ou fluidos de alta temperatura) até os que vaporizam água conhecidos como **Caldeiras a Vapor**.

Pode-se também gerar vapor não através da queima de combustíveis, mas pelo aproveitamento da energia residual de processos industriais ou de motores de combustão interna. Estas são as **Caldeiras de Recuperação**.

Pode-se ainda não gerar vapor e somente aquecer a água que será aproveitada em estado líquido, porém em alta temperatura para os processos. Esta é a **Caldeira de Água de Alta Temperatura** ou de fluídos térmicos.

**Geradores Reatores Nucleares:** São aqueles que produzem vapor utilizando como fonte de calor a energia liberada por combustíveis nucleares.

## 2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DE CALDEIRAS A VAPOR

### 2.1.2.1 Quanto à disposição relativa do fluido de trabalho

As caldeiras podem ser classificadas quanto à circulação do fluido de trabalho, como caldeiras aquatubulares ou flamotubulares.

### Caldeiras Flamotubulares ou Tubo de fumaça

As caldeiras flamotubulares ou caldeiras tubo de fumaça ou multitubulares, ou ainda pirotubulares são aquelas nas quais os gases da combustão atravessam toda a caldeira pelo interior dos tubos, cedendo calor à água contida no corpo que envolve os tubos. Alguns tipos de caldeiras flamotubulares são mostradas na Figura 8.

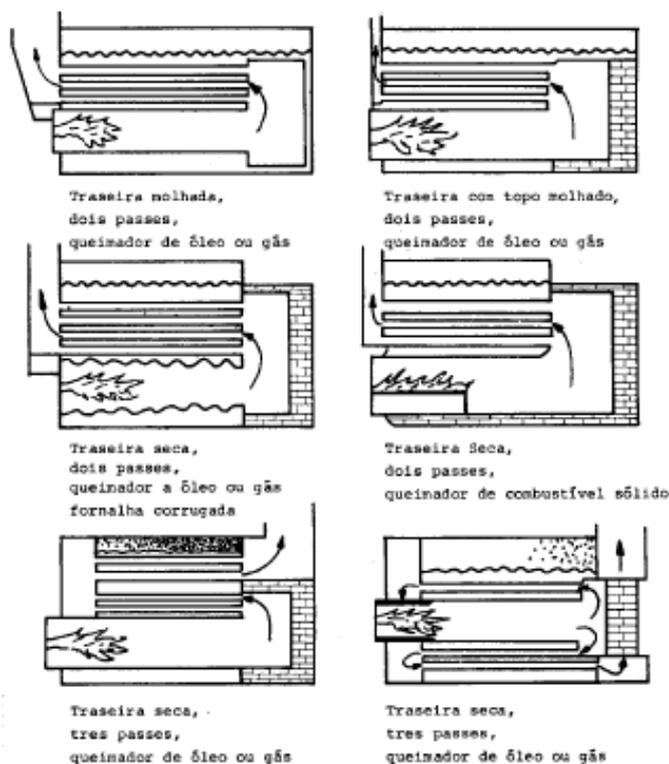


Figura 8: Esquema de tipos de caldeira (Bizzo, 2003).

Estas caldeiras têm o seu uso restrito a pequenas instalações industriais como lavanderias, pequenas indústrias e aquecimento distrital, por trabalhar com vapor saturado, em pequenas pressões de até 15,3 [kgf/cm<sup>2</sup>] (15 [bar]) e baixa produção de vapor, cerca de 20 [t/h].

As caldeiras flamotubulares horizontais constituem-se de um vaso de pressão cilíndrico horizontal, com dois tampos planos (os espelhos) onde estão fixados os tubos e a fornalha. Caldeiras modernas têm vários passes de gases, sendo mais comum uma fornalha e dois passes de gases. A saída da fornalha é chamada câmara de reversão e pode ser revestida completamente de refratários ou constituída de paredes inseridas no volume de água.

Os melhores rendimentos térmicos são produzidos por Câmaras de reversão molhadas, uma vez que estas câmaras diminuem as perdas de calor ao ambiente, porém apresentam a contrapartida de serem mais caras por serem mais complexas construtivamente.

O dimensionamento destas fornalhas deve ser cuidadoso para que a combustão ocorra completamente no seu interior, evitando assim que ocorra a reversão de chama que atinja diretamente os espelhos, diminuindo a vida útil da caldeira.

A fornalha também se constitui de um corpo cilíndrico e está completamente imersa em água. Caldeiras flamotubulares modernas só queimam combustíveis líquidos ou gasosos, devido a dificuldade de se instalar grelhas para combustíveis sólidos, excetuando-se algumas caldeiras flamotubulares de pequena capacidade, que queimam combustíveis sólidos através de adaptação de grelhas na fornalha, porém são limitadas ao tamanho necessário da área de grelha (caldeiras híbridas piroaquatubulares).

Desde as primeiras caldeiras do século XVII, até os modelos atuais, as caldeiras flamotubulares passaram por sucessivos desenvolvimentos até a atual concepção de uma fornalha e mais dois passes de gases de combustão.

A grande aceitação deste tipo para pequenas capacidades está associada principalmente no seu baixo custo de construção, em comparação com uma aquatubular de mesma capacidade.

Porém, por questões de segurança, as pressões de trabalho e a qualidade do vapor são limitadas na condição de vapor saturado, uma vez que condiciona um grande volume de água.

A Figura 9 mostra uma caldeira flamotubular moderna, com câmara de reversão inserida no volume de água e fornalha corrugada.

A água acumulada no corpo da caldeira pode funcionar como um pulmão de vapor, respondendo a súbitas flutuações de demanda com pouca queda de pressão da rede de vapor, sendo adequada para aplicações onde o consumo é variável. A eficiência térmica destas

caldeiras está na faixa de 80 a 90%, sendo difícil se atingir maiores valores pela dificuldade de se acrescentar equipamentos adicionais de recuperação de calor.

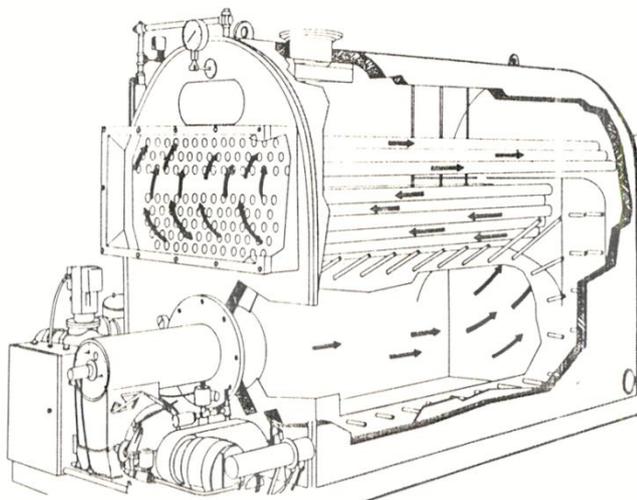


Figura 9: Partes internas de caldeira flamotubular com câmara de reversão molhada e fornalha corrugada (Bizzo, 2003).

## Caldeiras Aquatubulares

As caldeiras aquatubulares têm aplicação mais abrangente, sendo utilizadas desde pequenas fábricas até grandes centrais termelétricas. Nestas caldeiras, a água circula por dentro dos tubos e os gases trocam calor com a água através dos mesmos, e frequentemente são adaptadas em unidades equipadas com economizadores e aquecedores.

As superfícies de troca de calor destas caldeiras são arranjadas em forma de um conjunto de tubos verticais, também chamados de paredes de água, que revestem a fornalha, além de superfícies radiantes e convectivas dispostas nos dutos de passagem dos gases de combustão. Nas paredes de água a transferência de calor ocorre predominantemente por radiação.

As caldeiras aquatubulares tem a produção de vapor dentro de tubos que interligam 2 ou mais reservatórios cilíndricos horizontais, conforme esquema construtivo mostrado na Figura 10. A separação da fase líquida e do vapor se dá no tubulão superior, enquanto que a decantação e a purga dos sólidos em suspensão se dá no tubulão inferior. A Figura 11 mostra um esquema de caldeira aquatubular.

Os tubos podem ser retos ou curvados. As primeiras caldeiras aquatubulares utilizavam tubos retos, solução não mais utilizada, apesar de apresentar vantagens, como a facilidade de limpeza interna dos tubos.

As caldeiras de tubos curvados interligando os balões proporcionam arranjos e projetos de câmaras de combustão completamente fechadas por paredes de água, com capacidades praticamente ilimitadas. Em função da maior complexidade construtiva em relação às caldeiras flamotubulares, as aquatubulares são preferidas somente para maiores capacidades de produção de vapor e pressão, exatamente onde o custo de fabricação das flamotubulares começa a aumentar desproporcionalmente.

Em relação ao modo de transferência de calor no interior de caldeira existem normalmente duas secções:

- a secção de radiação, onde a troca de calor se dá por radiação direta da chama aos tubos de água, os quais geralmente delimitam a câmara de combustão.
- a secção de convecção, onde a troca de calor se dá por convecção forçada, dos gases quentes que saíram da câmara de combustão atravessando um banco de tubos de água.

Não há limite físico para capacidades. Para aplicação industrial, as capacidades variam da ordem de 15 a 150 t/h, com pressões entre 91,77 [kgf/cm<sup>2</sup>] (90 [bar]) até 102 [kgf/cm<sup>2</sup>] (100 [bar]).

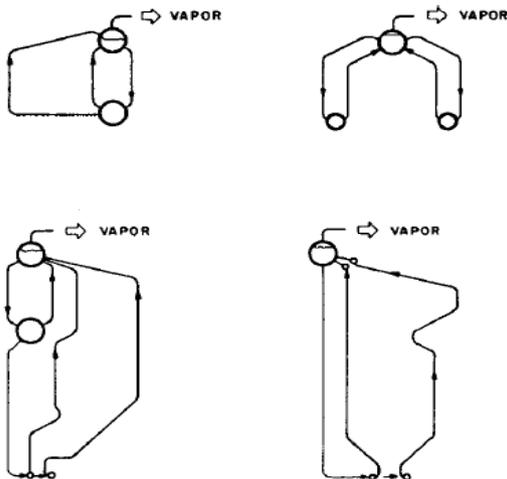


Figura 10: Esquemas construtivos de caldeiras aquatubulares, com circulação natural. (Bizzo, 2003).

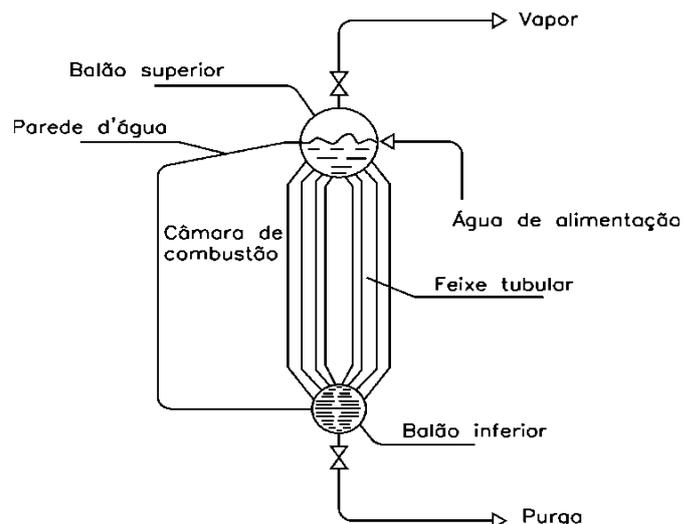


Figura 11: Esquema de uma caldeira aquatubular. (Lora et al., 2004).

## Caldeiras híbridas (piroaquatubulares)

São caldeiras que possuem uma fornalha com paredes de água e passes de tubos de fumaça que percorrem o tubulão imersos no volume de água. Geralmente são menores e menos eficientes que as caldeiras aquatubulares. Esquemas de caldeiras mistas podem ser vistos na Figura 12 e na Figura 13.

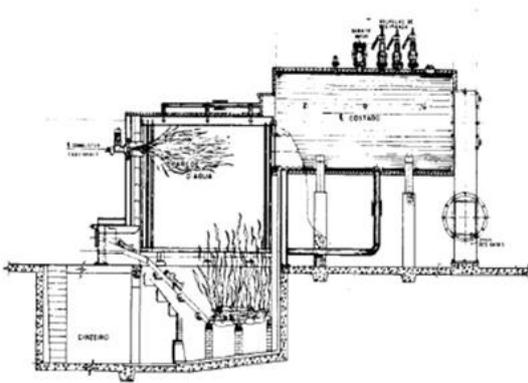


Figura 12: Caldeira flamotubular com ante fornalha de paredes de água.

([https://www.google.com.br/search?q=imagens+de+caldeiras+híbridas&biw=1280&bih=699&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0CBsQsARqFQoTCP\\_u27Sy7cgCFQ](https://www.google.com.br/search?q=imagens+de+caldeiras+híbridas&biw=1280&bih=699&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0CBsQsARqFQoTCP_u27Sy7cgCFQ)).

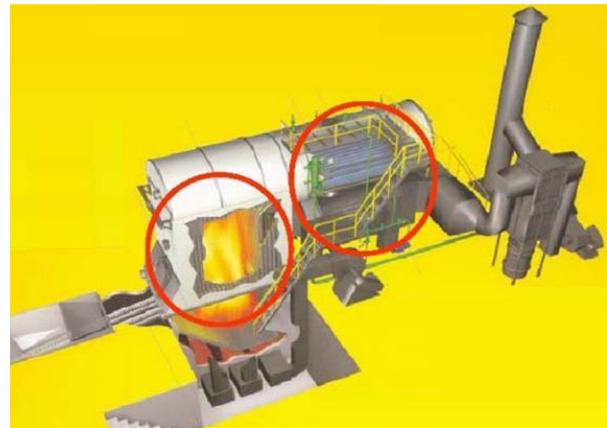


Figura 13: Esquema de caldeira Mista ou Híbrida piroaquatubular.

([http://pt.slideshare.net/Love\\_Pharmacy/caldeiras-industriais-11837358](http://pt.slideshare.net/Love_Pharmacy/caldeiras-industriais-11837358)).

## 2.2 FORNALHAS PARA COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS

A fornalha é o componente da unidade geradora de vapor que se destina a converter a energia química contida no combustível em energia térmica pela reação de combustão do combustível como ar. Esta conversão depende do tipo e da qualidade do combustível disponível.

Neste item serão discutidas as fornalhas para operação com os combustíveis sólidos, uma vez que este trabalho se destina a tratar da geração de vapor baseada na combustão de biomassa.

### 2.2.1 FORNALHAS DE QUEIMA EM GRELHA

As fornalhas de queima em grelha são geralmente projetadas para atenderem caldeiras de pequeno e médio porte. Com carvão até aproximadamente 12 [t/h] e em unidades maiores com bagaço de cana até cerca de 100 [t/h]. Pequenas unidades utilizam para a combustão da lenha em toras ou pedaços, a grelha de barras fixas ou grelha em escada.

Estas grelhas são assim chamadas em virtude de não sofrerem nenhum movimento durante a queima do combustível. Existem diversos perfis para estas grelhas. Cada fabricante tem suas alegações de vantagens para suas grelhas. O que difere entre elas é o seu formato em função dos diversos combustíveis queimados.

Assim, uma grelha onde se queima, por exemplo, serragem, tem as passagens de ar com dimensões menores e mais numerosas para permitir boa distribuição do ar e para evitar que o combustível caia entre grelhas. No caso de queima de lenha, as passagens são maiores, porém não tão grandes que permitam a perda das brasas formadas na combustão.

O ar que passa através destas passagens, além de fornecer oxigênio para a combustão, resfria o metal evitando que sua temperatura se eleve muito. Dentro desta mesma classificação, existem as grelhas tubulares que são de tubos de paredes grossas e constituem as grelhas resfriadas por circular água da caldeira por dentro dos tubos, o que garante baixa temperatura do metal (Pêra, 1990). A Figura 14 mostra quatro exemplos de grelhas fixas, inclinadas, bastante utilizadas para combustíveis picados. Figura 15 mostra o esquema de uma grelha tubular.

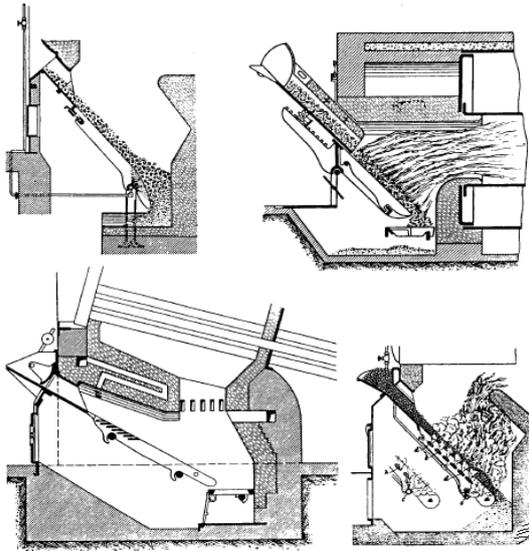


Figura 14: Quatro exemplos de grelhas fixas inclinadas.

Fonte: Pêra (1990).

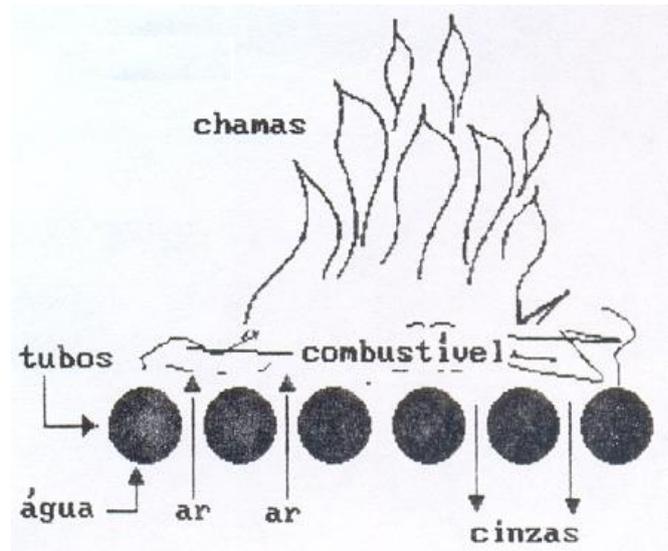


Figura 15: Esquema de uma grelha tubular.

Fonte: Pêra (1990).

Na grelha tubular a água circula pelos tubos e o combustível queima sobre eles e as cinzas passam pelos intervalos entre os tubos caindo no cinzeiro. O ar de combustão penetra por estes espaços livres da mesma maneira que nas grelhas planas. Para aumentar a vida útil dos tubos pode se optar por grelhas sobrepostas, no qual os tubos contendo água as suportam. Os furos alternados permitem a passagem do ar para cima e a eliminação das cinzas para baixo.

## 2.2.2 FORNALHAS DE GRELHA PLANA

Nestas fornalhas para atender caldeiras de pequeno porte a alimentação de combustível pode ser manual ou com equipamento de alimentação automática de combustível. As cinzas caem no cinzeiro, que é o espaço abaixo das grelhas de onde são retiradas manualmente pela porta de limpeza. As barras que constituem estas grelhas têm o seu perfil escolhido para permitir suportar o impacto do combustível, resistir ao calor e acomodar as dilatações térmicas decorrentes. A Figura 16 mostra um esquema de fornalha com grelhas planas de alimentação feita manualmente por operador. A Figura 17 mostra o esquema de uma fornalha de grelha plana com alimentação automática de combustível.

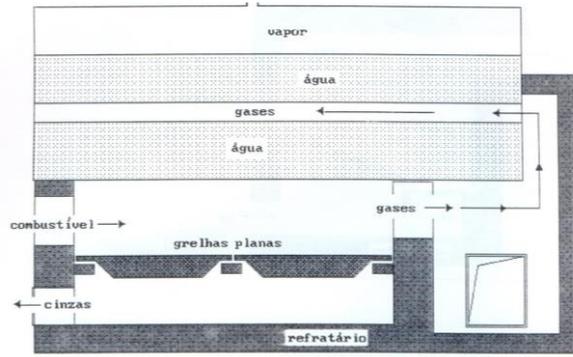


Figura 16: Esquema de fornalha com grelhas planas.

Fonte: Pêra (1990).

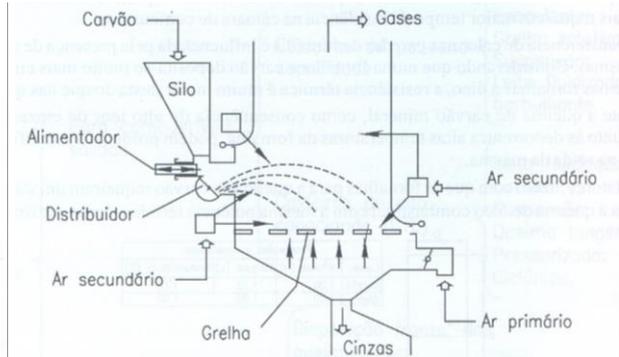


Figura 17: Esquema de uma fornalha de grelha plana com alimentação automática.

Fonte: Bazzo (1995).

A grelha plana pode estar ligeiramente inclinada. A Figura 18 apresenta alguns modelos de grelhas planas disponíveis comercialmente.

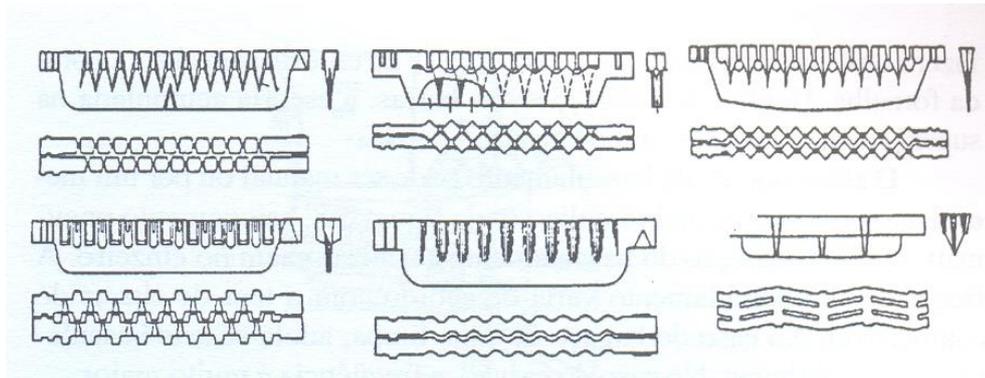


Figura 18: Seis modelos de grelhas planas.

Fonte: Pera (1990).

As grelhas planas basculantes utilizadas em fornalhas de médio e grande porte são constituídas de peças dispostas e fixadas sobre elementos estruturais de suporte articulados que permitem um movimento de basculamento por secções independentes, permitindo assim a retirada de cinzas sobre a grelha.

## 2.3 COMBUSTÃO DE BIOMASSA

### 2.3.1 DEFINIÇÕES

Segundo Coelho et al., (2007) a definição mais completa da combustão foi dada por Linán e Willians (1993). Estes se referem à combustão como a “ciência das reações químicas exotérmicas em escoamentos com transmissão de calor e massa”.

A combustão compreende as reações químicas envolvidas na oxidação, queima, de um composto. Como durante estas reações ocorre liberação de energia, diz-se que este composto é um combustível. Em temperatura ambiente os combustíveis são substâncias estáveis, mas, com auxílio de uma fonte externa de energia, reagem em cadeia liberando energia na forma radiativa e produzindo calor.

O primeiro combustível aproveitado pelo homem foi a biomassa florestal (madeira). A grande parte dos combustíveis tem origem orgânica, e, portanto, são constituídos majoritariamente de Carbono, Hidrogênio e Enxofre.

De maneira geral, define-se combustão como uma reação química entre duas substâncias ditas combustível e comburente, ocorrendo a alta velocidade e alta temperatura, onde se dá uma intensa liberação de calor com a emissão simultânea de luz, na maioria das vezes, dependendo, entre outros fatores, do tipo de combustível.

Normalmente, o comburente utilizado é o oxigênio do ar atmosférico, por outro lado, os combustíveis se inserem numa faixa de tipos e qualidades, muito embora possa ser dito que a maioria daqueles utilizados industrialmente têm em sua composição, entre outros elementos, o carbono, o hidrogênio e o enxofre.

Na prática, costuma-se fazer uma distinção entre duas formas básicas de reação de combustão. Diz-se que a combustão é completa quando o combustível queima em sua totalidade, ou seja, os reagentes são levados ao seu grau de oxidação máxima. As principais reações existentes, nesse caso, são os seguintes:

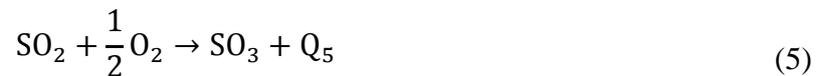


Nas reações anteriores,  $Q_1$ ,  $Q_2$ ,  $Q_3$  representam as “quantidades de calor” liberadas em cada uma das reações. Além das reações acima, outras duas merecem destaque. A primeira delas é a que leva à formação de CO:



É importante observar que, desde que sejam adotadas as mesmas condições de temperatura e pressão na qual ocorram as reações, então a “quantidade de calor”  $Q_4$  é menor que a quantidade  $Q_1$ , portanto a combustão incompleta é um processo menos eficiente que a combustão completa, quando o que se procura é a liberação de calor.

Outra reação que merece destaque é a que leva à formação de  $\text{SO}_3$ :



A quantidade de  $\text{SO}_3$  formado, na maioria das vezes, é pequena. O grande problema é que essa substância, reagindo com o vapor d’água forma ácido sulfúrico gasoso, o qual pode condensar dependendo das condições de temperatura dos gases. Nesse caso, existem todos os inconvenientes da corrosão provocada pela deposição da substância ácida em paredes.

A condensação do ácido sulfúrico é um fenômeno que deve ser cuidadosamente analisado, quando se pensa em instalar um recuperador de calor na chaminé de um equipamento.

Quando se queimam combustíveis sólidos como lenha ou lascas de madeira, por exemplo, essa preocupação praticamente inexistente, pois a quantidade de enxofre presente na biomassa é desprezível.

Quando se utilizam combustíveis fósseis deve-se considerar para cálculos práticos, admitir que no máximo 3% de  $\text{SO}_2$  se transformam em  $\text{SO}_3$ . Assim, admitindo um excesso de ar de 30%, a temperatura de condensação do ácido sulfúrico (ponto de orvalho), para os gases de combustão de óleo BPF (4% de enxofre), será da ordem de  $120^\circ\text{C}$ , no caso do óleo BTE (0,9% de enxofre) de  $90^\circ\text{C}$ . Esses valores são válidos para uma pressão total da ordem de  $1,013 \times 10^5$  [Pa] (760 [mmHg]). Dessa forma, quando se quer evitar a corrosão da chaminé, é conveniente manter a temperatura dos gases 40 ou  $50^\circ\text{C}$  acima do ponto de orvalho.

### 2.3.1.1 Poder calorífico de combustíveis

Segundo Lora et al. (2012) o poder calorífico é a quantidade de calor (energia térmica) que se libera durante a combustão completa de uma unidade de massa ou de volume do combustível [kJ/kg] ou [kJ/Nm<sup>3</sup>]. Pode ser expresso nas bases úmida, analítica, seca e combustível. Pode

ser superior ou inferior e seu valor quantitativo pode variar muito em função do teor de umidade da biomassa

O conceito do Poder Calorífico Superior (PCS) considera que o vapor da água presente nos gases de combustão é condensado, enquanto que o Poder Calorífico Inferior (PCI) considera que isso não ocorre.

O poder calorífico pode ser medido utilizando-se um calorímetro tipo Joule, que pode determinar a capacidade térmica específica de materiais sólidos e líquidos, assim como medir o equivalente termoeletrico.

Para efeitos de cálculo do balanço de massa e energia em equipamentos termoquímicos, é indispensável conhecer o poder calorífico do combustível utilizado, em que base este é expresso e a umidade da biomassa considerada.

Nos cálculos de rendimento dos sistemas de combustão podem se adotar ambos os tipos de poder calorífico. É sempre importante deixar claro o poder calorífico que se tem empregado. Como o calor de condensação da umidade dos gases é tecnicamente irrecuperável, é preferível o uso do PCI.

O PCI depende da composição química da biomassa ou do combustível em geral e também do total de umidade, da composição química (lignina, cinzas, extrativos, por ex.), do tempo de estocagem, (perda de extrativos) e da época da estocagem (Brand, 2007 apud Moraes, 2011).

A dependência do poder calorífico em relação ao teor de umidade pode ser visualizada na Figura 19 que mostra a variação do poder calorífico em função da umidade para a madeira.

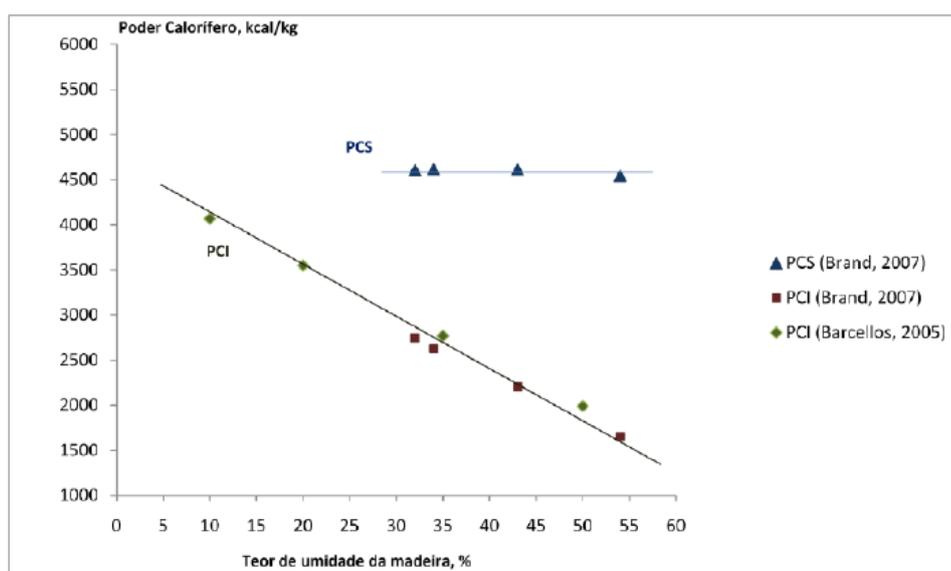


Figura 19: Variação do poder calorífico com o teor de umidade da madeira. (Moraes, 2011).

### 2.3.1.2 Estequiometria da combustão e excesso de ar

Segundo Lora et al. 2004 diz-se que a reação é estequiométrica ou de combustão completa ou ainda teórica quando o oxigênio consumido é o necessário e suficiente para queimar completamente os elementos contidos no combustível. Quando a quantidade de oxigênio é maior, ocorre combustão com excesso de oxigênio; em caso contrário, ocorre com falta de oxigênio, situação na qual não se realiza a combustão completa, podendo formar-se CO e até partículas de carbono, estas últimas constituindo o que se denomina fuligem. Use-se o sobrescrito “0” para a combustão estequiométrica.

Na maioria das vezes, a combustão se processa com excesso de ar. Define-se então, o coeficiente de excesso de ar ( $\alpha$ ) como sendo:

$$\alpha = \frac{m_a}{m_a^0} \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{V_a}{V_a^0} \quad (7)$$

Onde:

$\alpha$  = Coeficiente de excesso de ar

$m_a$  = Massa real de ar [ $\text{kg}_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

$V_a$  = Volume real de ar [ $\text{Nm}^3_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

$m_a^0$  = Massa estequiométrica de ar [ $\text{kg}_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

$V_a^0$  = Volume estequiométrico de ar [ $\text{Nm}^3_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

Lora et al. 2012 recomendam a utilização de um valor médio de  $\alpha = 1,3$  para a queima de biomassa em grelha. Além disso, o valor ótimo para o coeficiente de excesso de ar somente pode ser conseguido após a realização do teste de balanço da caldeira e da construção do gráfico de eficiência em função do excesso de ar.

Existem fórmulas que permitem o cálculo dos parâmetros anteriormente fornecidos, desde que se conheça a composição elementar do combustível. Esses cálculos são mostrados no item 3.3 do capítulo 3.

Considere-se o caso geral de um combustível qualquer, do qual é conhecida a composição em massa, em base úmida e expressa em porcentagem:

$C^t$ : [kg] de carbono por [kg] de combustível

$H^t$ : [kg] de hidrogênio por [kg] de combustível

$O^t$ : [kg] de oxigênio por [kg] de combustível

$W^t$ : [kg] de água (umidade) por [kg] de combustível

$S^t$ : [kg] de enxofre por [kg] de combustível

$N^t$ : [kg] de nitrogênio por [kg] de combustível

As quantidades de ar de combustão e de gases gerados são utilizados para a obtenção do balanço de massa, bem como do balanço energético, sem os quais é praticamente impossível a otimização do modo de operação do equipamento estudado. Além disso, possibilitam o dimensionamento de exaustores e trocadores (recuperadores) de calor, que tem no conhecimento da vazão de gases um parâmetro importante de projeto.

Possibilitam ainda a análise de gases: com base no estudo das reações químicas é possível, tendo a composição do combustível, avaliar a composição volumétrica dos gases de combustão, seja esta estequiométrica, com falta ou excesso de ar. Em sentido inverso, a análise da composição dos produtos de combustão permite determinar como se deu a combustão, primeiro passo para a atuação nas variáveis que a influenciam.

Um excesso de ar muito alto, que reduza a temperatura no interior da fornalha, diminui sensivelmente a troca de calor e a eficiência dos equipamentos. Essa é a razão pela qual o excesso de ar sempre que possível, deve ser mantido em níveis mínimos, compatíveis com a exigência de combustão completa.

Nos casos onde se deseja minimizar o excesso de ar, a análise dos produtos de combustão passa a ser de grande importância, já que, como foi visto anteriormente, pode afetar a qualidade da combustão. Deve-se utilizar equipamentos que permitam determinar a composição volumétrica dos gases secos, fornecendo os teores de  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $O_2$ ,  $SO_2$  e  $N_2$ .

No entanto, quando a temperatura dos gases de chaminé é relativamente baixa (abaixo de  $500^\circ C$ ), verifica-se, experimentalmente, que os teores de  $CO$  são mínimos. Nesses casos, portanto não se costuma verificar o teor de  $CO$ , sendo determinado apenas o teor de  $CO_2$  ou de  $O_2$ .

A determinação do teor de  $CO_2$ , presente nos gases de chaminé, é mais simples e usual. A verificação exata da emissão de fuligem pode também ser feita mediante a utilização de

instrumentação simples. Existem escalas de índice de fuligem que permitem a comparação com a amostra coletada.

## **2.3.2 COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS**

A combustão de biomassa, inclusive do cavaco de eucalipto ocorre em seis etapas consecutivas e nítidas, definidas como segue:

- 1) Secagem
- 2) Emissão de voláteis
- 3) Ignição dos voláteis
- 4) Queima dos voláteis em chama
- 5) Extinção da chama dos voláteis
- 6) Combustão do resíduo de carbono (coque)

### **2.3.2.1 Secagem e aquecimento da partícula**

Inicialmente a superfície da partícula recebe calor por radiação e convecção e o seu interior recebe energia transmitida por condução. A umidade irá evaporar a baixas temperaturas (50 – 100°C). O local físico em que isto ocorre dentro da fornalha depende da granulometria da partícula e do tipo de queima utilizada. A mudança de fase da umidade pode originar fissuras suficientemente grandes para partir a própria partícula, caso o vapor não seja liberado rapidamente pela superfície, causando a diminuição da pressão no seu interior. Este é um fenômeno comum em ambientes com elevadas temperaturas e taxas de aquecimento. Deve ser observado o teor de umidade do eucalipto a ser queimado, cuidando para que não exceda 60% em peso (base úmida), valor acima do qual as temperaturas podem cair abaixo da necessária para manter o processo de combustão por ser requerida muita energia para evaporar a umidade contida na madeira e ainda aquecer o vapor de água (Abreu, 2009) e (Lora et al. 2012).

### **2.3.2.2 Devolatilização e ignição da partícula**

A devolatilização nada mais é do que a liberação do material sólido volatilizado presente na partícula. Os parâmetros que influenciam a taxa de volatilização são a temperatura, taxa de

aquecimento, tempo de residência, pressão, dimensão da partícula e tipo de combustível utilizado. Quanto maior for a temperatura final atingida pela partícula, maior será a quantidade de matéria volátil libertada. Esta temperatura está diretamente ligada ao tempo de residência, já que quanto maior for a duração da sua exposição, maior será a libertação de voláteis. No carvão a volatilização inicia-se em temperaturas entre 350-400°C (Werther et al. , 2000 apud Abreu, 2009). Na madeira a devolatilização se inicia por volta dos 200°C. A 400°C a maior parte dos voláteis da madeira já foram liberados e a taxa de devolatilização diminui rapidamente. A lignina se decompõe entre 400 e 500°C, faixa na qual ocorre uma baixa taxa de devolatilização. (Lora et al. 2012).

No caso da biomassa, uma fração importante da sua massa é libertada sobre a forma de gases voláteis durante a combustão, entre 85-95% da massa inicial da partícula. No caso do carvão a volatilização consome menos matéria, cerca de 50-65% da sua massa inicial (Robinson et al., 1998 apud Abreu, 2009).

A volatilização da biomassa é mais rápida que a do carvão, em caso de granulometria semelhante, diminuindo o tempo necessário para que ocorra a sua combustão completa (Robinson et al., 2002 apud Abreu, 2009).

Experimentalmente, sabe-se que cerca de 67% do poder calorífico da biomassa é liberado durante a combustão da matéria volátil, sendo assim esperado que durante a combustão de biomassa exista uma libertação significativa de calor próxima do local onde se dá a volatilização, no caso deste trabalho, na região do leito. Os produtos da volatilização são H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, hidrocarbonetos leves, principalmente CH<sub>4</sub> e hidrocarbonetos pesados, conhecidos como alcatrões. Na presença de oxigênio ocorre a ignição dos produtos gasosos em fase homogênea e forma-se uma chama em redor da partícula. A chama mantém a partícula em constante aquecimento, facilitando a sua volatilização. (Abreu, 2009).

### **2.3.2.3 Combustão do carbono residual**

A combustão do carbono residual é a última etapa do processo de combustão de uma partícula sólida. Este se forma após a conclusão do processo de volatilização, sendo composto essencialmente de carbono fixo e cinzas com pequenas quantidades de hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre (Abreu, 2009).

A reação de oxidação dá origem à formação de CO no interior da partícula que, posteriormente, se converte em CO<sub>2</sub>.

Em ambientes oxidantes, o carbono residual participa da reação de oxidação heterogênea com o oxigênio. Esta reação de oxidação pode ser controlada quimicamente (pela cinética química) ou fisicamente (pela difusão), sendo muito mais lenta que o processo de volatilização. Em termos práticos, alguns destes processos podem ocorrer simultaneamente como, por exemplo, a devolatilização e a oxidação do carbono residual. A Figura 20 mostra as etapas da combustão da madeira e a relação da fração em massa consumida em função da temperatura em cada etapa da combustão de uma partícula sólida.

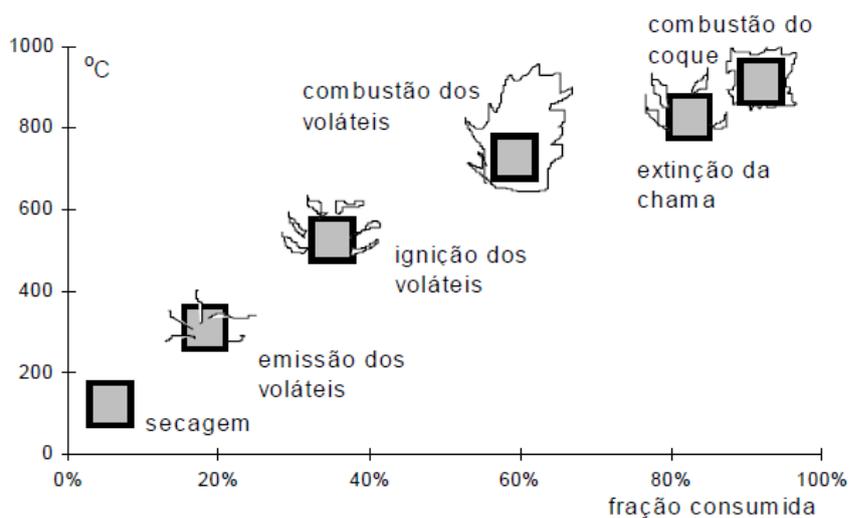


Figura 20: Etapas da combustão da madeira (relação da fração em massa consumida em função da temperatura em cada etapa da combustão de uma partícula sólida) (Lora et al., 2012)

## 2.4 BIOMASSA

### 2.4.1 MADEIRA

Praticamente todas as fontes de energia – hidráulica, biomassa, eólica, combustíveis fósseis e energia dos oceanos – são formas indiretas de energia solar. A utilização de fontes de energia renováveis como a biomassa visa satisfazer a demanda do setor energético de forma sustentável, além disso, a queima da biomassa tem como principal vantagem, a redução na emissão de poluentes na atmosfera (Lima, 2004).

Durante os anos 2000, a biomassa representava cerca de 10-14% da energia produzida em todo o mundo (Mckendry, 2001). A Crise do petróleo na década de 70 causou grande intensificação no uso da biomassa como fonte de energia. Alguns programas de utilização de biomassa iniciados nesta época se mostraram muito bem sucedidos, como o Proálcool, no Brasil, aproveitamento de biogás, na China, coque vegetal, no Brasil, florestas energéticas, nos EUA, aproveitamento de madeira para fins energéticos, na Suécia, aproveitamento de resíduos agrícolas, na Grã-Bretanha, plantações de eucaliptos, na Etiópia, aproveitamento do bagaço de cana, nas Ilhas Maurício. Muitos desses projetos deram certo como apoio de incentivos governamentais, como é o caso do Proálcool brasileiro (Lima, 2004).

Nos países em desenvolvimento, a biomassa é uma importante fonte de energia. Especialmente em áreas rurais, a utilização da biomassa é, por vezes, a forma mais barata de produzir eletricidade ou ar quente para secagem de produtos agrícolas, sendo por vezes a única forma de energia acessível para cocção de alimentos. A maioria dos sistemas que estão sendo utilizados para a produção de calor a partir de biomassa tem baixa eficiência, não somente pelas características do combustível, mas também pela pequena dimensão das centrais de produção (Silva, 2004 apud Lima, 2004).

Busca-se hoje minimizar os custos de coleta / transporte da biomassa com o aumento da eficiência de conversão de equipamentos e sistemas de pequena capacidade, aumento das pressões de operação e da eficiência das turbinas. No Brasil, o custo da madeira plantada é baixo, principalmente em função do crescimento da indústria de papel e celulose (CGEE, 2001). Com o aumento globalizado da utilização dos combustíveis de origem fóssil e o decréscimo dos custos para o plantio de madeira, espera-se a viabilidade comercial de ciclos termelétricos no Brasil em curto prazo.

Mais uma característica positiva da utilização de biomassa como fonte de energia é a possibilidade de se utilizar uma ou mais culturas simultaneamente de forma a se complementar a disponibilidade dos recursos.

Com o aumento da procura de madeira para atendimento das necessidades de diferentes setores da indústria e o crescimento das restrições ambientais ao uso de determinadas espécies nativas, tem crescido a demanda por madeira de reflorestamento, inclusive com espécies do gênero *Eucalyptus*.

Segundo a ABRAF (2013) estimam-se as áreas de florestas plantadas no Brasil em 6.664.812 ha com eucalipto e pinus, sendo que a área plantadas com eucaliptos é de 5.102.030 ha e com pinus de 1.562.782 ha.

Existe um crescente interesse por parte dos produtores na madeira do gênero eucalyptus por sua grande versatilidade nos diversos segmentos do setor florestal, por apresentar espécies de rápido crescimento e também por contribuir para a formação de uma matriz energética renovável, na forma de lenha ou carvão vegetal.

O uso da madeira como fonte de energia acarreta vantagens ambientais, o que a potencializa como alternativa à utilização de combustíveis fósseis, uma vez que a produção de carvão vegetal pode ser conduzida de forma a reduzir as emissões dos gases do efeito estufa durante o processo. (Santana, 2009).

Biomassa é a massa orgânica produzida pelo vegetal e pode ser expressa em massa verde ou massa seca. Sua medição é um instrumento útil na medição de ecossistemas em função da análise da produtividade para a conversão de energia (Campos, 1992 apud Santana, 2009).

A produção de biomassa juntamente com o seu poder calorífico são critérios fundamentais para a seleção de uma espécie para fins energéticos. Pode-se ainda ressaltar que a quantidade de energia concentrada em unidade de massa da madeira está distribuída em celulose, lignina e carboidratos simples. A incorporação de biomassa é crescente na árvore, tendendo a se estabilizar quando esta atinge sua idade adulta.

O eucalipto pode ainda ser uma alternativa a se considerar para a captura e sequestro de carbono, uma vez que seu crescimento é relativamente rápido e colabora para a fixação do carbono em forma de sua estrutura física, apresentando assim uma análise de ciclo de vida melhor que a dos combustíveis fósseis quando da sua combustão.

## **2.4.2 CARACTERIZAÇÃO DO EUCALIPTO PARA ENERGIA**

A utilização de uma determinada variedade de madeira para fins energéticos deve basear-se no conhecimento do seu poder calorífico e no seu potencial para a produção de biomassa, além das suas características físico-químicas e sua análise elementar.

Tanto técnica quanto economicamente, é importante o controle das variáveis de qualidade da madeira para a produção de energia, desde os aspectos de silvicultura como também a manipulação das toras de madeira após o corte.

Ressalta-se ainda que os requisitos de qualidade para a madeira de uso energético não são os mesmos da madeira para produção de celulose.

Florestas de eucalipto para energia podem ser desenvolvidas com menor espaçamento (até 0,3m) e exploradas muitas vezes com menor idade (4,5 a 5 anos ao invés de 7 anos), requerendo menores áreas de plantio (Quirino et al., 2004 apud Moraes, 2011).

A seguir, serão evidenciadas algumas variáveis importantes para a caracterização da madeira para fins energéticos.

### 2.4.2.1 Composição Química do eucalipto

A composição química média da madeira é mostrada na Tabela 1. Além destes elementos, são encontradas pequenas quantidades de enxofre, o que, apesar de ser problemático com relação à formação de poluentes sulfurosos, se torna uma vantagem quando comparadas aos combustíveis de origem fóssil. (Corder, 1973 e Brito, 1994 apud Santana, 2009).

Tabela 1: Composição química média para madeira em base seca.  
(Corder, 1973 e Brito, 1994 apud Santana, 2009).

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
C - Carbono	49,00
H - Hidrogênio	6,00
O - Oxigênio	44,00
N - Nitrogênio	0,40
Outros	0,60

#### Composição elementar

A análise elementar fornece as porcentagens em massa de cada um dos elementos presentes na amostra, carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O) e nitrogênio (N). Segundo Cortez et al., (2008), a composição elementar é a característica técnica mais importante do combustível e constitui a base para análise dos processos de combustão.

A Tabela 2 mostra a composição elementar média do eucalipto em base seca. A constituição elementar compreende a formação essencialmente orgânica da madeira, sendo fundamental para a compreensão de seu comportamento quanto ao processo de combustão.

O eucalipto é praticamente livre da presença de enxofre.

Tabela 2: Composição elementar média para o eucalipto em base seca.  
(Lora et al., 2012).

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
C - Carbono	49,00
H - Hidrogênio	5,87
O - Oxigênio	43,97
N - Nitrogênio	0,30
S - Enxofre	0,01
CI - Cinzas	0,13
Outros	0,72

### Composição Imediata

A análise da composição imediata do eucalipto oferece as frações em peso de voláteis, carbono fixo e cinzas da amostra.

A Tabela 3 mostra a composição imediata do eucalipto em base seca.

Tabela 3: Composição imediata para o eucalipto em base seca.  
(Lora et al., 2012).

<b>Elemento</b>	<b>%</b>
V – Matéria Volátil	81,42
K – Carbono Fixo	17,82
A - Cinzas	0,76

### Massa Específica

Pode variar de um valor médio de 300 a 700 [kg-seco/m<sup>3</sup>] (Ferreira, 1979). De 4 a 5 anos de idade a densidade da madeira é muito baixa ainda. São desejáveis para o eucalipto com fins energéticos densidades acima de 530 [kg/m<sup>3</sup>].

### Teor de umidade

A combustão do eucalipto nas caldeiras a biomassa é diretamente influenciada pelo teor de umidade da madeira. (Barcellos et al., 2005 apud Moraes, 2011).

O teor de umidade pode variar de 50% a 60%, em função da época do ano do corte da madeira.

#### Teor de minerais

No eucalipto, usualmente expresso como teor de cinzas, corresponde, em geral, a menos de 1% da biomassa em base seca. Esses minerais, em combinação com compostos orgânicos, formam complexos que desempenham funções fisiológicas na árvore. Os principais minerais encontrados são cálcio, magnésio, fósforo e silício.

### 2.4.2.2 Poder Calorífico do Eucalipto

O eucalipto pode apresentar certa variação em seu poder calorífico dependendo das variações amostrais.

A coluna 2 da Tabela 4 mostra o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior do eucalipto em base seca segundo Lora et al., 2012 e a coluna 3 mostra o valor calculado para o poder calorífico em base úmida a partir do valor do poder calorífico em base seca, considerando-se a umidade de 11,17%.

Tabela 4: Poder calorífico do eucalipto.

(Lora et al., 2012).

<b>Poder Calorífico</b>	<b>Base seca</b>	<b>Base úmida</b>
	<b>MJ/kg</b>	<b>MJ/kg</b>
PCS	19,42	17,25
PCI	18,23	16,19

## 2.5 DINÂMICA DA INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA

Para que a reação de combustão possa acontecer, é necessária a mistura do ar e do combustível, no caso a biomassa de eucalipto. Na grelha da câmara de combustão da caldeira o escoamento de ar primário passa através da grelha e da biomassa. A mistura depende da granulometria da biomassa, e da sua porosidade e da vazão de ar que passa pela biomassa.

A Figura 21 mostra o esquema da passagem de ar pela grelha e pela biomassa ainda sem combustão.



Figura 21: Esquema da passagem do ar primário pela grelha e pela biomassa.

No início do processo de combustão a biomassa se aquece, seca e libera os voláteis que a circundam, se misturam com o ar e formam as chamas. Este processo pode ser visto na Figura 22.



Figura 22: Mistura do ar com os voláteis da biomassa em início de processo de combustão.

Quando a combustão já está em regime permanente, o processo de aquecimento, secagem e liberação dos voláteis ocorre mais rapidamente e pode ser verificado na Figura 23. Além disso o ar também reage com o carbono fixo da biomassa na medida em que existe a mistura ou contato com a superfície da biomassa.

A intensificação acústica pode influenciar a mistura do ar com a biomassa e seus voláteis, uma vez que soma ao escoamento de ar picos de pressão acústica que em determinada frequência podem aumentar a velocidade de distribuição do ar em relação à velocidade média do escoamento. Isso cria faixas de velocidades e pressões diferenciadas perpendiculares ao escoamento.

Nas faixas onde a pressão é maior, a mistura acontece mais rapidamente que nas demais, fazendo com que a reação de combustão aconteça com maior velocidade.



Figura 23: Chamas formadas pela reação do ar com os voláteis da biomassa em regime permanente de combustão.

Este efeito pode ocorrer tanto na mistura entre o ar e o carbono fixo quanto na mistura de ar com os voláteis. Na primeira, a mistura depende da granulometria, da porosidade e da área de

contato da biomassa em questão, já na segunda depende das vazões de ar e de voláteis, da velocidade e do tipo do escoamento.

Por esse motivo então, pode-se ter a intensificação acústica influenciando mais na mistura de ar com os voláteis ao longo do escoamento do que na grelha na mistura do ar com o carbono fixo da biomassa.

Pode-se verificar se isso ocorre analisando-se os perfis de temperatura e a composição de gases no leito de combustão e ao longo do escoamento da câmara de combustão até a chaminé.

## **2.6 ESTADO DA ARTE**

### **2.6.1 ESTUDOS EXPERIMENTAIS DE PROCESSOS DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA EM LEITO FIXO**

Ronnback et al., 2000, realizaram estudo experimental em duas instalações experimentais contra corrente, uma fornalha de laboratório com 0,2 [m] de diâmetro e 0,6 [m] de altura e uma do mesmo tamanho de uma fornalha doméstica para análise da variação das temperaturas e na formação de espécies no leito de combustão em função da variação de vazão de ar primário e da granulometria do combustível.

A instalação da fornalha de laboratório é constituída de aço inox de 3 mm de espessura e isolada com lã de vidro de 5 mm de espessura. O ar primário é fornecido por baixo no cilindro e os gases de combustão saem pelo topo, onde o ar secundário é fornecido antes da entrada da chaminé. O combustível é colocado na grelha e ignitado por uma tocha pelo topo. Então a frente de ignição se movimenta a contra fluxo em relação ao ar primário até a grelha. Dados de temperatura são coletados por dois termopares tipo K localizados a 150 [mm] e a 300 [mm] acima da grelha sendo que o primeiro mede a temperatura no leito e o segundo acima do leito. Os gases de combustão são amostrados ao deixar o leito, porém antes do fornecimento de ar secundário.

A fornalha doméstica é equipada para medir o fluxo de ar primário, perda de massa e altura do leito. Temperaturas podem ser medidas no leito e acima do leito por termopares encamisados por proteção de 1 [mm] tipo K montados em ambos os lados, ortogonal à frente de ignição e ao fornecimento de ar primário.

O leito em combustão pode ser observado através um visor de vidro. Neste caso o ar primário é fornecido ao topo do leito de combustão e a ignição acontece no fundo do leito eletricamente por espiras na grelha. A frente de ignição também se movimenta em contra corrente, pois se move em direção ao topo do leito em direção contrária ao fluxo de ar. A Figura 24 mostra o esquema de ignição e de fornecimento de ar na fornalha de laboratório e a Figura 25 mostra o esquema de ignição e de fornecimento de ar na fornalha doméstica

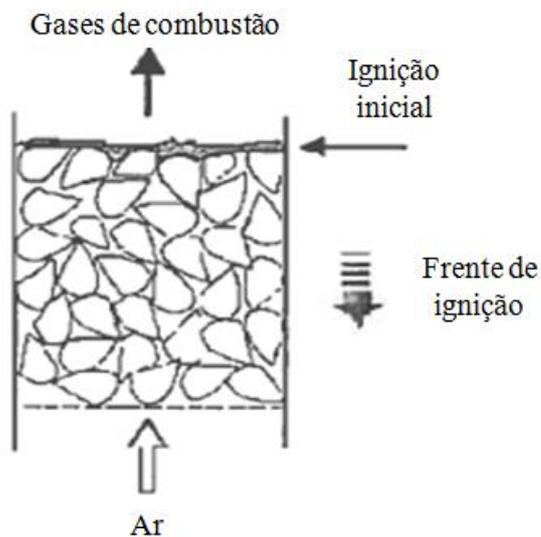


Figura 24: Frente de ignição se movendo contra o fluxo de ar na fornalha de laboratório.

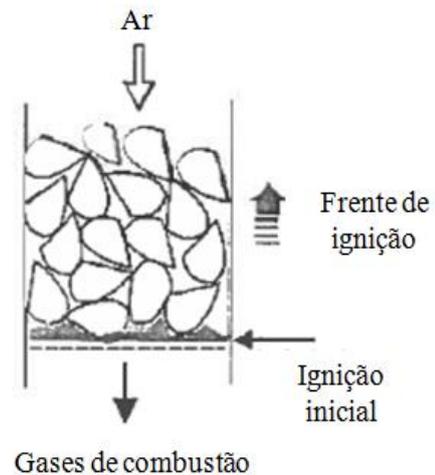


Figura 25: Frente de ignição se movendo contra o fluxo de ar na fornalha doméstica.

Os combustíveis pesquisados foram *pellets* de madeira e cilindros de madeira. Os *pellets* eram feitos de serragem comprimida com diâmetro de 8 [mm]. Os cilindros de madeira tinham três diâmetros, 8, 12 e 34 [mm]. A análise aproximada e composição elementar dos combustíveis foram aproximadamente idênticas, como pode ser visto na Tabela 5. A densidade e a condutividade térmica dos *pellets* é cerca do dobro das da madeira. Os *pellets* foram queimados em ambas as instalações, enquanto que a madeira foi queimada somente na fornalha de laboratório.

As concentrações de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e HCT (hidrocarbonetos totais) foram medidas em tempo real. O gás foi amostrado o mais perto possível do leito de combustão. Na fornalha doméstica o gás foi extraído 50 mm abaixo da grelha. A distância da frente de ignição é 100 – 350 mm, aumentando enquanto a frente se movimentava para cima no leito. Na fornalha de laboratório o gás foi extraído 450 [mm] acima da grelha. A distância da frente de ignição é então maior que 450 [mm].

Tabela 5: Análise aproximada e composição elementar dos combustíveis.

	<i>pellets</i>		Madeira	
C (% massa, base seca)	50,5		51,4	
H (% massa, base seca)	6,2		6,7	
O (% massa, base seca)	43,1		41,7	
N (% massa, base seca)	0,15		0,047	
S (% massa, base seca)	0		0	
Umidade (% massa)	8,3		9,1	
H <sub>i</sub> (MJ/kg, base seca)	20,2		19,3	
Condutividade térmica (J/mK)	0,32		0,16	
Diâmetro	8	8	12	34
Densidade do combustível (kg/m <sup>3</sup> )	1259	579	585	581
Densidade do leito (kg/m <sup>3</sup> )	680	307	305	279
Leito vazio	0,46	0,47	0,48	0,52
Vazão mássica de ar (kg/m <sup>2</sup> .s)	0,035-0,41	0,07-0,53		

A sonda de amostragem de gás é resfriada para garantir a extinção das reações nas amostras sendo que a temperatura do gás amostrado cai para menos de 100°C em 200 [mm].

Ronnback et al., 2000 realizaram também medições de temperaturas e coletas de amostras de gases no leito e concluíram que as emissões de CO são similares nas duas fornalhas testadas, assim como os perfis de temperatura. A Figura 26 mostra o as temperaturas em função de fluxos de ar e a Figura 27 mostra as concentrações medidas na fornalha de laboratório.

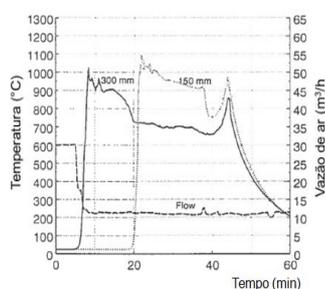


Figura 26: Temperatura na fornalha de laboratório - 150 mm e 300 mm acima da grelha Biomassa: cilindros de madeira de 8 mm. Fluxo de ar: 0,11 kg/m<sup>2</sup>.s.

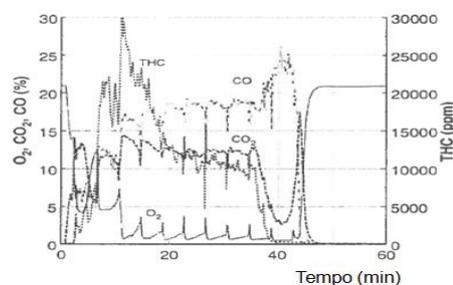


Figura 27: Concentrações na fornalha de laboratório de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO e TCH – Hidrocarbonetos totais.

A Figura 28 mostra perfis de temperatura e a Figura 29 mostra as emissões na fornalha doméstica.

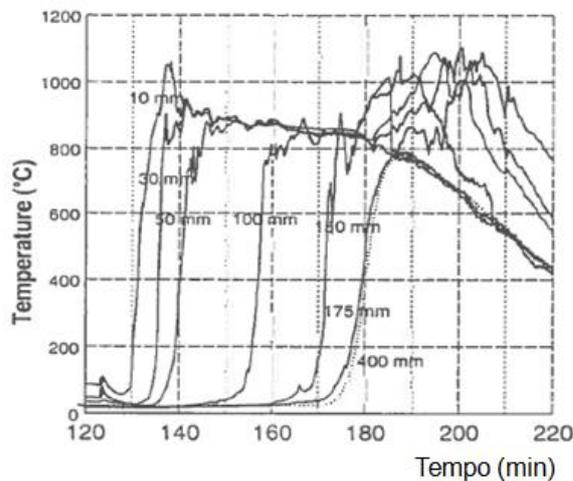


Figura 28: Temperatura na fornalha doméstica – de 10 [mm] a 400 [mm] acima da grelha

Biomassa: *pellets* de 8 [mm]

Fluxo de ar: 0,12 [kg/m<sup>2</sup>s].

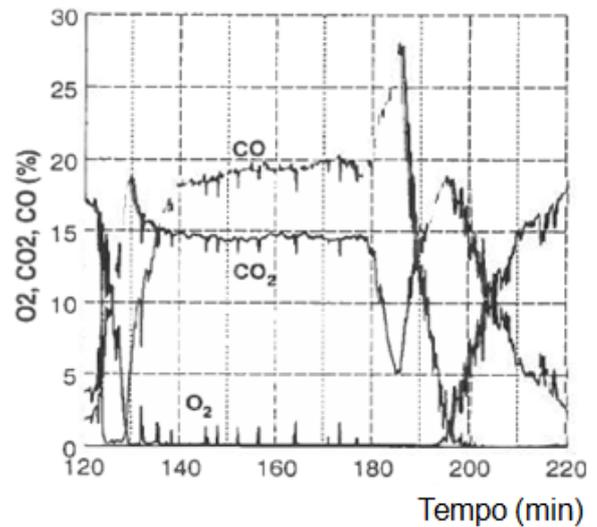


Figura 29: Emissões na fornalha doméstica de O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CO.

Samuelsson et al., 2004, realizaram estudos experimentais numa fornalha queimando *pellets* para análise da influência do fluxo de ar nas temperaturas e na formação de compostos de Nitrogênio. Esta pesquisa foi realizada em um reator de seção transversal quadrada de 0,3 x 0,3 [m<sup>2</sup>], com altura de leito de combustão de 0,4 [m]. A frente de ignição se propagou do topo do leito para a grelha em contra corrente com o fluxo de ar. A combustão na câmara pôde ser dividida em duas fases. Na primeira, ocorre a ignição e a devolatilização do combustível pela frente de ignição e na segunda fase, o carvão remanescente é queimado.

A fornalha de testes possui vários acessos para tomadas de temperatura e amostras de gases. A fornalha é colocada sobre uma balança. Para prevenir o retorno da chama, a fornalha é prolongada com um tubo de fumaça onde o ar secundário é fornecido. A Figura 30 mostra a instalação de testes com balança, fonte de ar primário, grelha, termopares, sonda de sucção, visor de vidro e tubo de fumaça.

O gás foi extraído do leito por uma sonda feita de aço. Dentro da sonda um vidro de quartzo foi colocado para prevenir reações catalíticas. Os gases extraídos pela sonda foram transportados através de um sistema de limpeza para os analisadores.

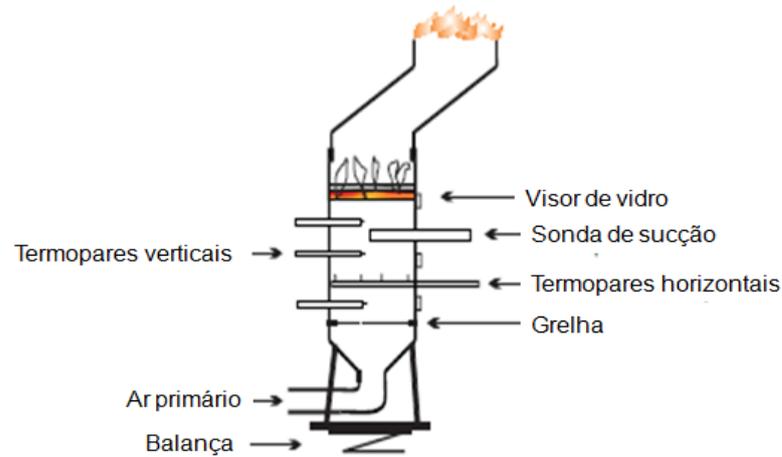


Figura 30: Instalação de testes sobre uma balança, mostrando o ponto de injeção de ar primário, grelha, termopares, sonda de sucção, visor de vidro e tubo de fumaça.

Como pode ser visto na Figura 31 existem duas linhas de amostragem, uma para os gases não diluídos e outra para os gases diluídos. CO, CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e H<sub>2</sub> foram analisados frios e não diluídos. NH<sub>3</sub>, HCN, NO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub> e C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> foram analisados em um estado diluído quente. NO foi analisado frio e diluído. A temperatura no sistema era de 190 °C, exceto para o capturador de alcatrão que teve a temperatura mantida em 170 °C.

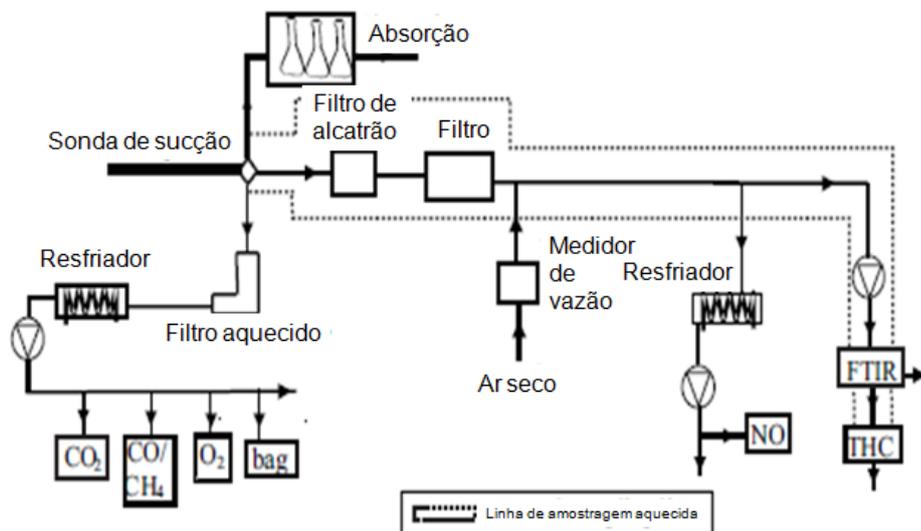


Figura 31: Limpeza de gases, diluição e sistema de análise.

O combustível consiste em *pellets* de serragem e cascas. Os *pellets* são homogêneos em tamanho, forma e umidade, Os diâmetros dos *pellets* eram 8[mm] e o comprimento 12 – 20

[mm]. A Tabela 6 mostra algumas propriedades dos combustíveis. Os dois combustíveis são bastante similares, exceto por diferentes teores de nitrogênio e cinzas.

Tabela 6: Propriedades dos combustíveis usados nos experimentos.

	<i>Pellets</i> de serragem	<i>Pellets</i> de casca
Análise aproximada		
C (% massa, base seca)	50,5	55,1
O (% massa, base seca)	43,1	38,3
H (% massa, base seca)	6,2	6,2
N (% massa, base seca)	0,15	0,40
Cinzas (% massa, base seca)	0,39	3,3
Outros parâmetros físicos		
Umidade (% massa, base seca)	11,3	9,4
Porosidade do leito	0,46	
H <sub>i</sub> (MJ/kg, base seca)	18,9	20,3
Densidade do leito (kg/m <sup>3</sup> ) substância seca	593	554

Nove experimentos foram realizados, cinco com *pellets* de serragem e quatro com *pellets* de cascas como pode ser visto na Tabela 7. Para *pellets* de serragem o fluxo de ar primário variou entre 0,09 e 0,45 kg/m<sup>2</sup>s. Para o pellet de cascas não foi medido o fluxo de ar primário porque ocorreu um vazamento neste suprimento.

Tabela 7: Experimentos.

Exp	<i>Pellet</i>	Ar fornecido (kg/m <sup>2</sup> s)	Taxa de ignição (kg/m <sup>2</sup> s)	Exp	<i>Pellet</i>	Ar fornecido (kg/m <sup>2</sup> s)	Taxa de ignição (kg/m <sup>2</sup> s)
P2	Serragem	0,09	0,050		Casca	-	0,035
P3	Serragem	0,18	0,062		Casca	-	0,032
P4	Serragem	0,27	0,067		Casca	-	0,044
P5	Serragem	0,39	0,069		Casca	-	0,068
P6	Serragem	0,45	0,058				

Os resultados mostraram que quando a frente de ignição se propaga para o leito  $\text{NH}_3$  é o principal composto de nitrogênio formado, sendo formadas também pequenas quantidades de HCN e NO. Durante a fase de combustão do carvão, com excesso de  $\text{O}_2$ , somente NO foi detectado. Esses resultados podem ser usados para a validação de modelos pré-estabelecidos de formação de compostos de nitrogênio. A Figura 32 mostra alguns dos dados medidos.

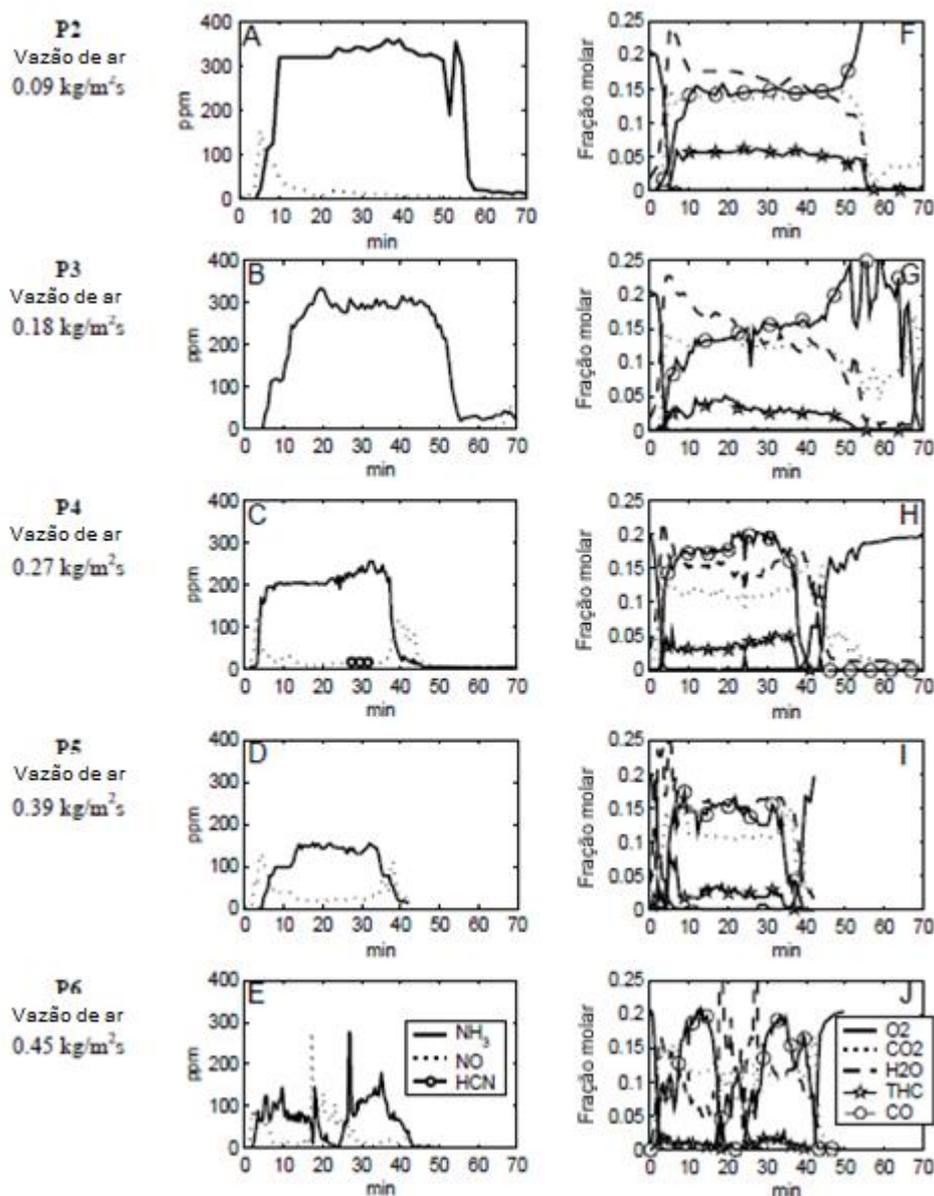


Figura 32: Concentrações medidas de  $\text{NH}_3$  (amônia), HCN (Hidrogênio Cianeto) e NO (Monóxido de hidrogênio) (esquerda) e Concentrações medidas de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$ , CO e TCH – Hidrocarbonetos totais. (direita) em função do fluxo de ar.

Serrano et al., 2013, realizaram experimento com duas espécies de pinus da floresta espanhola do Mediterrâneo, *Pinus halepensis* e *Pinus pinaster*, que foram caracterizadas no laboratório. As duas espécies apresentaram diferentes teores de umidade e cinzas. As cinzas

de ambas as espécies apresentaram uma temperatura de deformação inicial acima de 1100 °C no teste de fusibilidade.

Também obtiveram a distribuição da cinza dentro de cada fração de tamanho de partícula da massa.

A eficiência de combustão e as emissões em uma caldeira de 50 kW foram analisadas e comparadas com os resultados de um teste com *pellets* de pinho. O estudo paramétrico mostrou que o excesso de ar na caldeira reduz as emissões gasosas, mas também a eficiência da caldeira, enquanto o aumento da taxa de ar secundário não teve efeitos sobre a eficiência, mas reduziu as emissões de CO abaixo do limite EN 14785.

A Figura 33 mostra o esquema da caldeira em que foram realizados os experimentos:

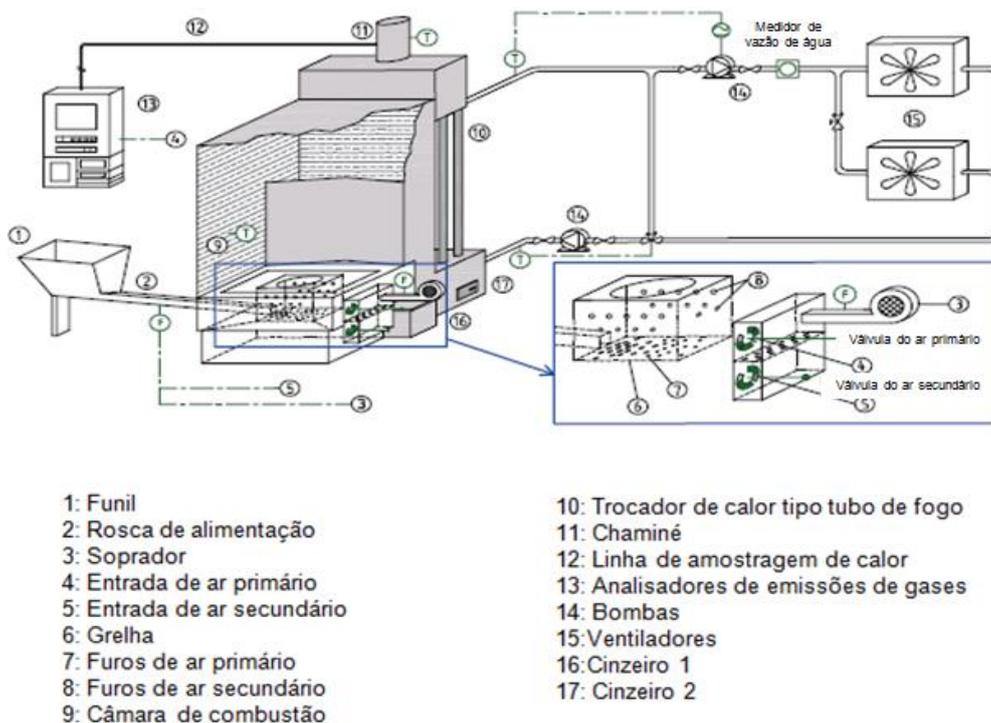


Figura 33: Esquema da planta piloto de combustão.

A Figura 34 mostra os perfis de temperatura durante a combustão dos dois tipos de pinus e a Tabela 8 mostra as condições operativas, emissões e perdas de eficiência da combustão dos dois tipos de pinus, onde:

$T_{ff}$  = Temperatura do escoamento na câmara de combustão

$T_{sf}$  = Temperatura do escoamento na chaminé

$\lambda$  = Excesso de ar

$q_a$  = Perda de eficiência devido ao calor sensível

$q_b$  = Perda de eficiência devido aos compostos não queimados

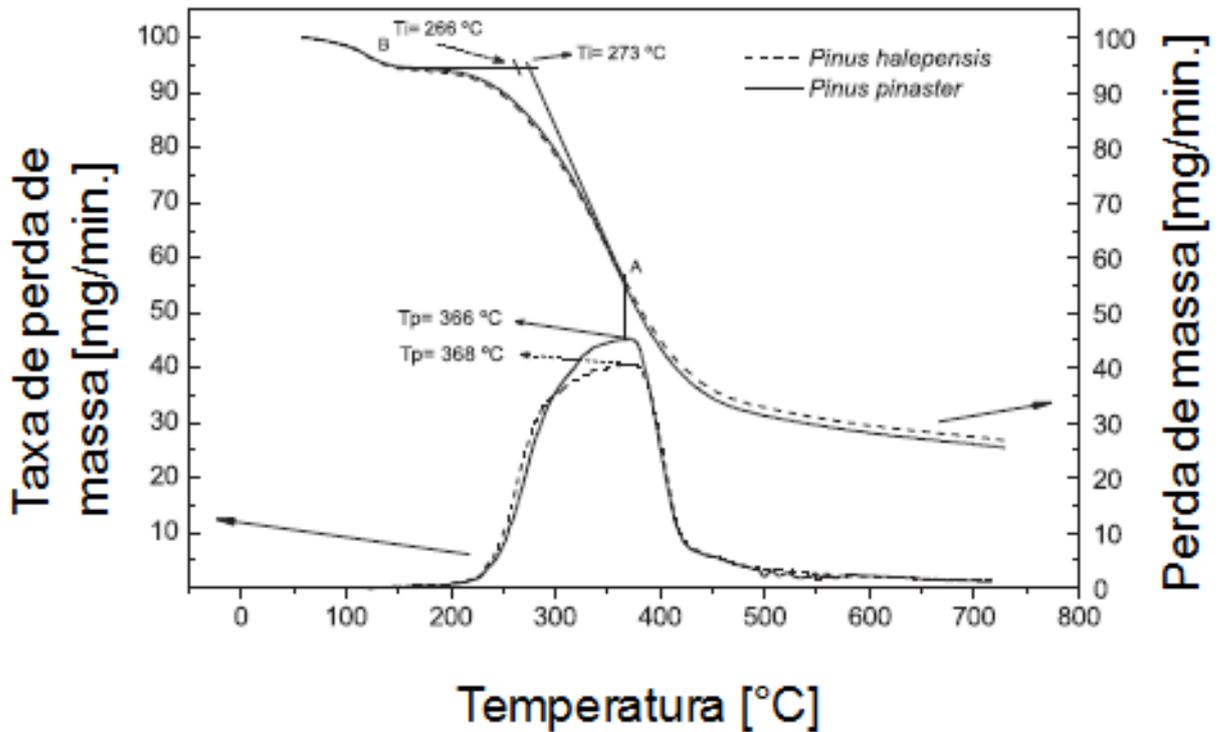


Figura 34: Perfis de queima de P. Halepensis e P. Pinaster.

Tabela 8: Condições operativas.

$\lambda$	SA (%)	$T_F$ (°C)		$T_{sr}$ (°C)		$O_2$ (vol.%)		$CO_2$ (vol.%) <sup>a</sup>		$NO_x$ (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>		$TOC$ (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>		$CO$ (mg/m <sup>3</sup> ) <sup>a</sup>		$q_a$ (%)	$q_b$ (%)
		Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd	Mean	Sd		
<i>P. halepensis</i> chips; $m_{bio} = 12.7$ kg/h; $m_{bdaj} = 10.3$ kg/h; $P_b = 52.5$ kW; $P_w = 46.9$ kW																	
1.16	55	726.9	30.5	155.4	3.3	5.1	0.9	7.2	0.3	76.3	3.3	57.0	25.0	554.5	760.4	7.61	0.47
1.16	68	728.4	16.7	152.1	1.2	5.0	0.8	7.2	0.3	74.9	1.5	59.0	20.8	408.0	347.1	7.40	0.39
1.15	84	697.8	11.4	152.2	2.0	4.7	0.9	7.2	0.3	74.8	3.6	37.8	10.2	240.1	187.9	7.31	0.25
1.24	75	707.5	17.5	156.8	2.2	5.4	0.7	7.2	0.2	80.2	1.7	33.0	1.3	114.0	79.7	8.01	0.16
1.34	74	705.2	20.7	160.5	1.6	6.4	0.8	7.2	0.3	85.4	2.8	33.6	1.2	48.6	36.2	8.72	0.13
<i>P. pinaster</i> chips; $m_{bio} = 12.4$ kg/h; $m_{bdaj} = 9.3$ kg/h; $P_b = 47.7$ kW; $P_w = 41.8$ kW																	
1.22	58	641.5	34.6	147.7	2.2	7.6	1.1	7.4	0.4	92.5	2.3	93.9	14.9	619.2	146.8	7.94	0.53
1.22	71	637.7	59.4	150.2	7.5	7.8	1.4	7.4	0.5	94.5	6.2	79.0	14.5	569.9	354.7	7.89	0.48
1.27	85	669.0	28.1	150.7	3.0	7.7	0.6	7.4	0.2	96.4	2.9	72.5	4.2	396.9	83.2	8.21	0.40
1.32	69	682.1	17.4	150.1	6.3	7.3	0.6	7.5	0.2	97.6	1.8	68.8	4.3	368.9	97.0	8.57	0.40
1.39	71	684.7	71.0	160.5	3.2	8.0	0.5	7.5	0.2	101.3	2.8	68.4	0.7	284.0	29.6	9.43	0.35

A Figura 35 mostra os resultados da análise do efeito do excesso de ar e da porcentagem de ar secundário sobre as emissões de CO e sobre as perdas de eficiência.

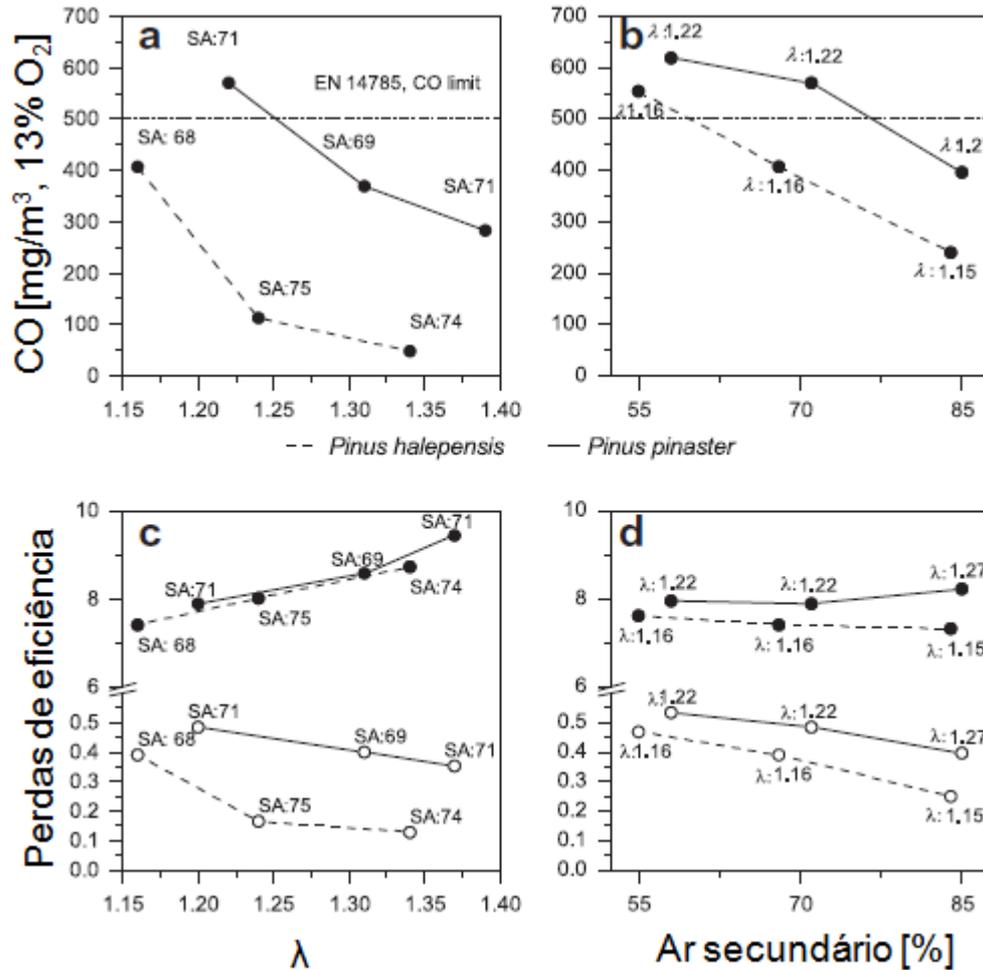


Figura 35: Efeito de  $\lambda$  e da porcentagem de ar secundário nas emissões de CO (a e b) e sobre as perdas de eficiência  $q_a$  (símbolos cheios) e  $q_b$  (símbolos vazios (c e d)).

## 2.6.2 ESTUDOS DE PROCESSOS DE COMBUSTÃO INTENSIFICADA ACUSTICAMENTE

Chirone et al., 1992, realizaram pesquisa da utilização de campo acústico com o objetivo de melhorar a mistura de ar e combustível na combustão de partículas aglutinadas de carbono.

A pesquisa foi desenvolvida a partir da necessidade ambiental de se realizar a combustão completa dos particulados carbônicos oriundos de combustão de diesel e gás de gaseificação de biomassa. Uma desvantagem desse tipo de combustão é a necessidade de um alto tempo de residência em razão da baixa taxa de mistura de ar com as partículas de carbono em função de sua aglutinação.

Esta pesquisa é sobre o comportamento da combustão de carbono pulverizado aglutinado sob o efeito de campo acústico. Os resultados são comparados com modelos de combustão no leito fluidizado.

Bateladas de carbono pulverizado de 1 – 45 [ $\mu\text{m}$ ] coletados em ciclone secundário de um gaseificador são queimadas em leito fluidizado intensificado acusticamente. O combustor tem 40 mm de diâmetro interno e 1 m de altura. A altura do leito varia de 5 a 17 [mm]. A temperatura do leito é de 850 °C. O ar é usado como gás fluidizante com velocidade de 60 mm/s. A frequência acústica é de 120 [Hz] e a pressão acústica varia até o máximo de 140 [dB] e potência de 40 [W]. A Figura 36 mostra o esquema da instalação experimental para a realização dos testes.

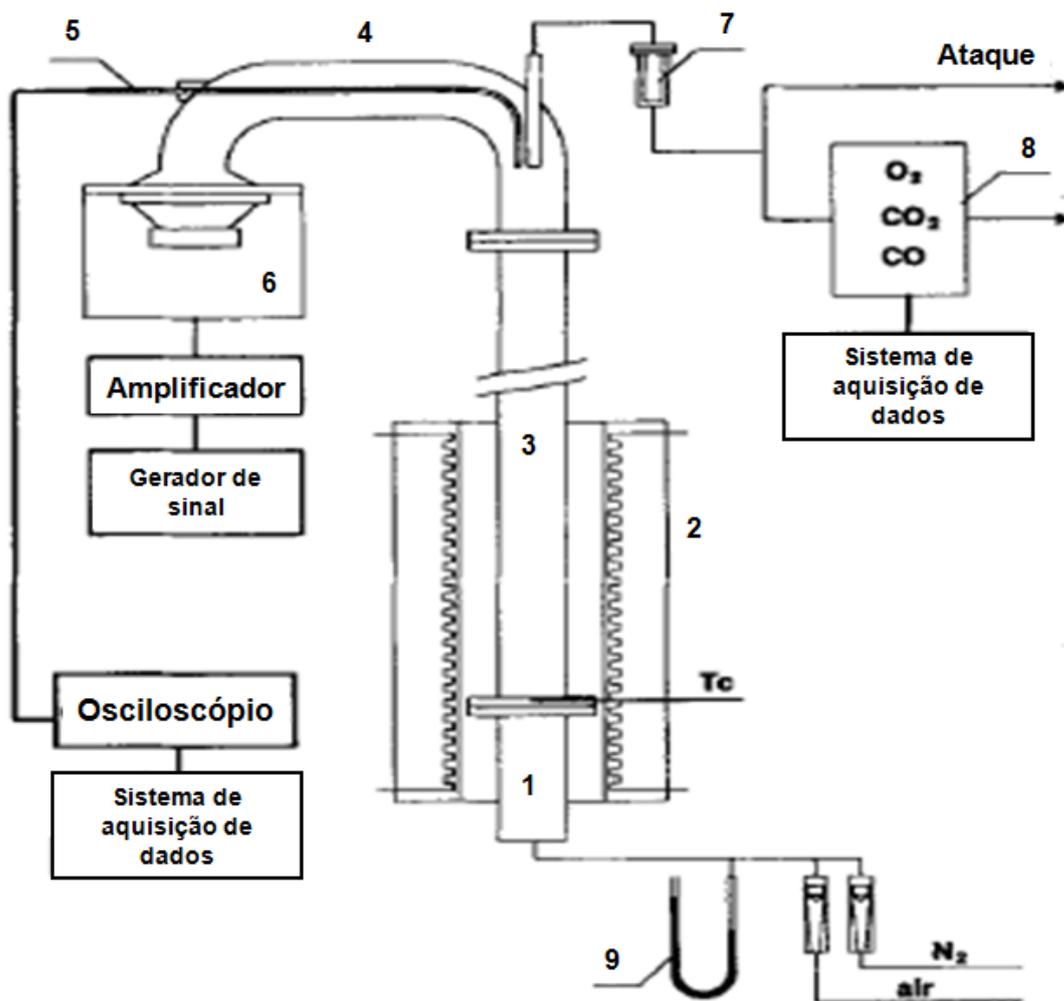


Figura 36: Instalação experimental, 1) Pré aquecedor de ar, 2) Fornalha elétrica, 3) Tubo de quartzo, 4) Guia de onda sonora, 5) Sonda microfônica, 6) Auto falante, 7) Filtro de gás de combustão, 8) Analisador de gases, 9) Micromanômetro.

É apresentado um modelo de combustão que considera a cinética de combustão do carbono com equações padrão de reatores de leito fluidizado.

Os resultados combinam com o modelo principalmente nas intensidades acústicas maiores.

Os resultados mostram que a intensificação acústica ajudou a quebrar as aglomerações de partículas em aglomerações menores e conseqüentemente melhorou a mistura de ar com o combustível, diminuindo o tempo de residência e a queima de carbono pulverizado no reator de leito fluidizado.

A comparação entre a queda da pressão e a taxa de expansão no leito é mostrada com a intensificação acústica na Figura 37 e sem na Figura 38.

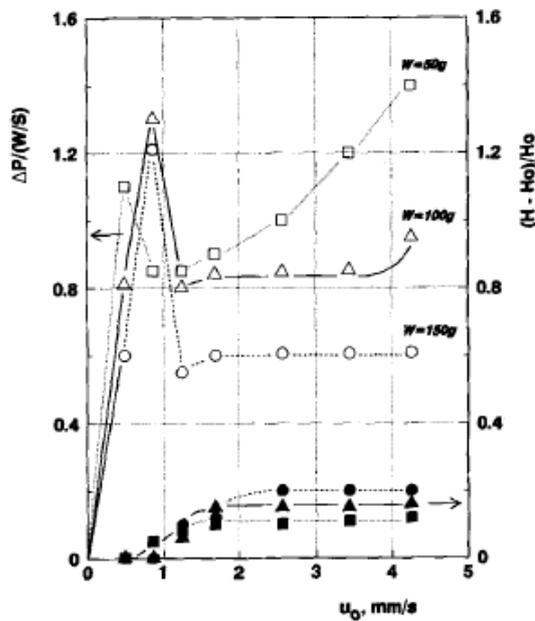


Figura 37: Queda de pressão ( $\Delta P$ ) e taxa de expansão no leito  $((H-H_0)/H_0)$  X velocidade do gás para diversas massas no leito sem intensificação acústica.

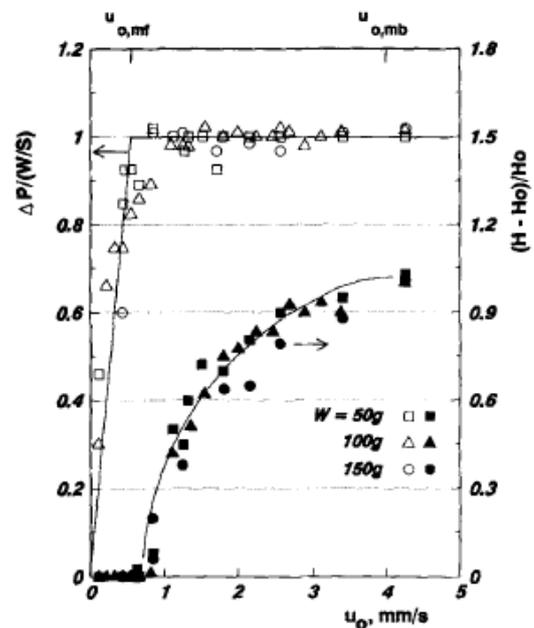


Figura 38: Queda de pressão ( $\Delta P$ ) e taxa de expansão no leito  $((H-H_0)/H_0)$  X velocidade do gás para diversas massas no leito com intensificação acústica.

Onde:

P=Pressão [Pa]

W=Massa no leito [g]

S=Seção transversal do leito [ $\text{mm}^2$ ]

$u_0$ =Velocidade superficial do gás [mm/s]

H=Altura do leito do experimento de Chirone [mm]

$H_0$ =Altura do leito não expansível do experimento de Chirone [mm]

A Figura 39 mostra o perfil de evolução do tempo de residência e da taxa de diminuição de massa do carbono em função da variação do nível de pressão acústica.

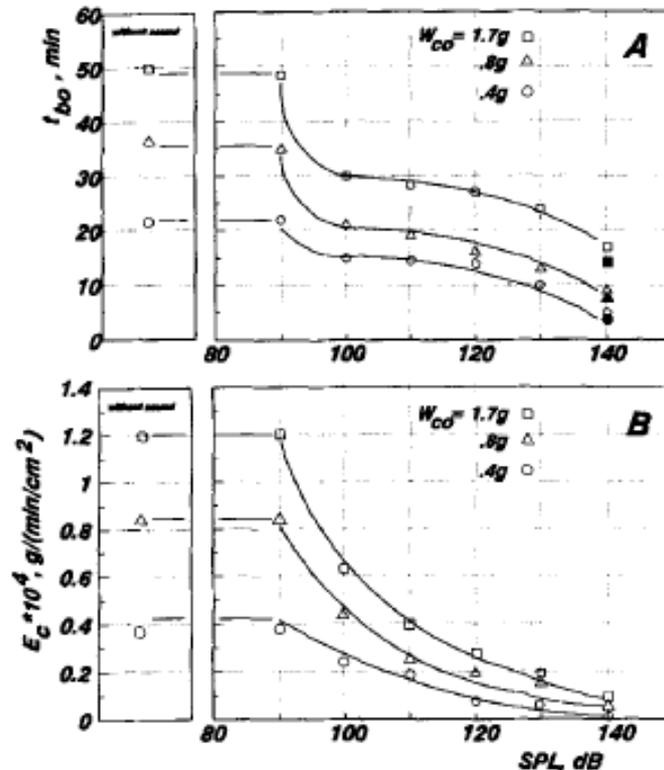


Figura 39: Tempo de residência ( $t_{bo}$ ) e taxa de perda de massa de carbono ( $E_c$ ) X nível de Pressão Acústica (SPL) para  $W = 100g$  e  $f=120Hz$ .

Onde:

$W_{co}$ = Massa de carbono no leito em  $t=0$  [g]

SPL=Nível de pressão acústica

Torres. et al., 1992, realizaram um estudo da combustão com intensificação acústica da combustão da casca do fruto da palma em um tubo de Rijke com a utilização de combustão pulsada com 200 mm de diâmetro interno. Dois comprimentos do combustor foram testados, 2400 e 3200 mm. A parede do combustor foi resfriada com uma jaqueta de água. A Figura 40 mostra o diagrama esquemático do combustor.

O combustível foi fornecido por um sistema de alimentação que consiste de um cilindro rotativo com aberturas. A análise imediata do combustível em laboratório resultou 53,7% C, 4,5% H, 39,2% O, 0,04% N e 2,2% cinzas. O PCI resultou 3900 [cal/g] (16,302MJ/kg) e a umidade 9,9%. O combustível consistiu em casca esférica de 20 mm de diâmetro e espessura

aproximada de 3 [mm]. Testes foram conduzidos para a determinação da altura do leito de combustão para evitar a ocorrência de atalhos preferenciais pelo fluxo de ar.

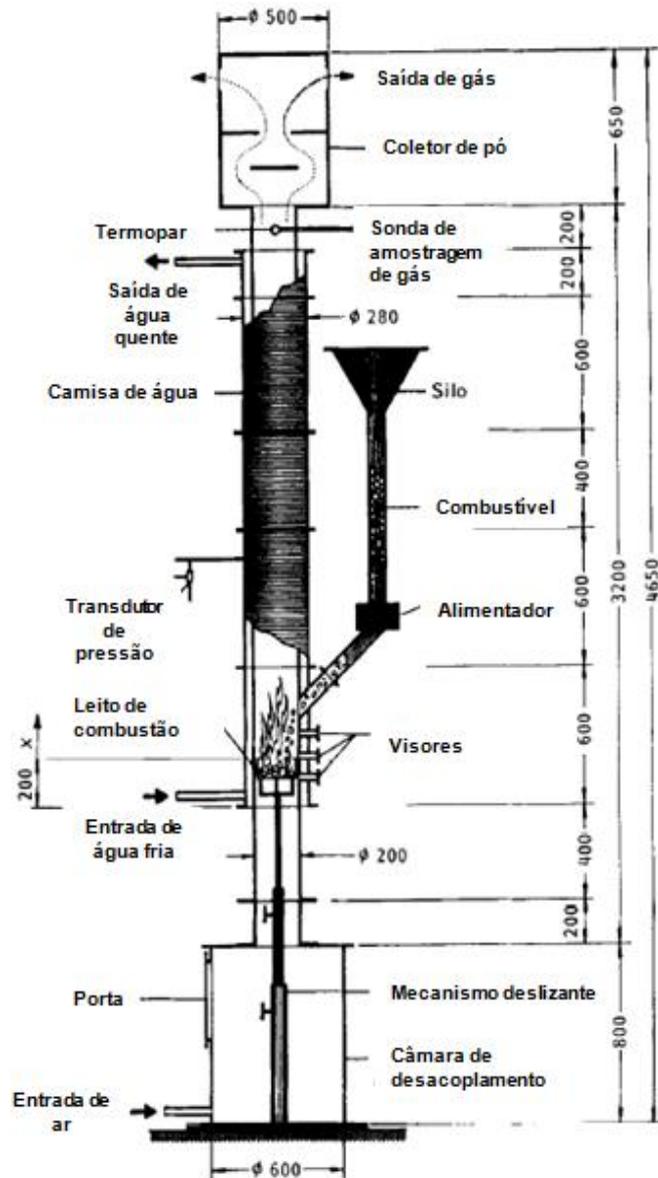


Figura 40: Diagrama esquemático do combustor (dimensões em mm)  
Torres et al., (1992).

Como resultado houve a geração de uma potência máxima de 1,9 [MW/m<sup>2</sup>]. A máxima eficiência do equipamento foi de 96%, obtida com um excesso de ar de 10%. A frequência variada entre 65 [Hz] e 70 [Hz] na configuração mais longa do combustor e entre 85 [Hz] e 90 [Hz] na configuração mais curta. A amplitude de pressão acústica alcançou 4 [kPa] (0,04 [kgf/cm<sup>2</sup>] ou 0,04 [bar]).

Rocha et al., 2008, realizaram trabalho experimental que mostra como resultado mudanças na estrutura da chama quando campos acústicos são aplicados em chamas de difusão turbulenta Delft queimando gás natural. O campo acústico (pulsação de combustão) gera zonas de mistura intensa de reagentes na região da chama promovendo uma combustão mais completa e, conseqüentemente, menores emissões de poluentes, aumento das taxas de transferência de calor por convecção e menor consumo de combustível. Os resultados mostram que a presença do campo acústico altera drasticamente a estrutura da chama, principalmente nas frequências naturais do queimador. No entanto, para amplitudes acústicas ou pressões acústicas mais elevadas, uma chama piloto de hidrogênio é necessária para Manter a chama principal ancorada. Nas regiões de chama onde o campo acústico é mais intenso, foram observadas as características de chama pré-misturadas. Além disso, o regime pulsante modifica a estrutura de combustão axial e radial, o que pode ser verificado pela distribuição radial das concentrações de  $O_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  e  $NO_x$  e pelo perfil de temperatura. Os experimentos também mostraram a redução do comprimento da chama com o aumento da amplitude acústica.

A presença do campo acústico, conforme ilustrado Figura 41 b, afeta a estrutura da chama consideravelmente. Como a oscilação Aumenta a amplitude, há um aumento das taxas de mistura, A chama torna-se azulada, indicando mudanças drásticas de uma chama predominantemente difusiva para uma chama com características de pré-mistura. Além da observação visual, as alterações na estrutura da chama resultante da presença do campo acústico podem ser observadas por meio do campo radial e distribuições axiais das concentrações de  $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $CO$  e  $NO_x$  e temperatura.

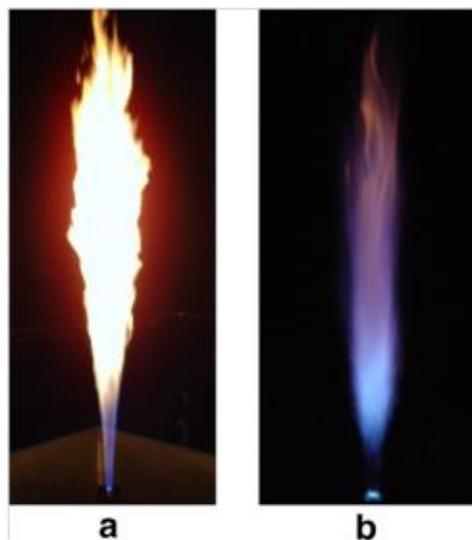


Figura 41: Chama sem atuação do campo acústico (a) e com atuação do campo acústico (b).  
(Rocha et al., 2008).

O estudo realizado por Rocha et al., 2008 investigou a influência de um campo acústico na combustão de gás natural num queimador do tipo de jacto circular (queimador Delft). Os resultados indicam mudanças significativas na estrutura das chamas, criando chamas com características de pré-mistura, cor azulada e comprimento de chama mais curto.

Alterações nas características de formação de  $\text{NO}_x$ , um poluente indesejável e na distribuição de  $\text{O}_2$ ,  $\text{CO}_2$  e  $\text{CO}$  também foram observados. Como regra geral, observou-se que o processo de combustão acionada acusticamente, pode ser um forte aliado para controlar as condições de combustão, quando for necessário mudar as taxas de fluxo de combustível e ar.

Um meio de controlar a emissão de  $\text{NO}_x$  em dispositivos práticos é promover a pré-mistura entre os reagentes em misturas pobre, que resultam em baixas temperaturas e um razoável ponto de operação, com baixas taxas de  $\text{NO}_x$  e produtos de combustão de oxidação parcial.

No entanto, uma série de problemas está associada com a pré-mistura, como a ignição na câmara de pré-mistura, ancoragem de chama, instabilidades de combustão, etc.

Esta excitação acústica tem o potencial de promover chamas de baixa temperatura, com características de pré-mistura sem os problemas causados pela pré-mistura dos reagentes. Além disso, ha uma melhor distribuição da temperatura e uma diminuição da temperatura de picos na região da chama.

Govardhan et al., 2008, realizaram trabalho experimental de implementação de TOC (Tecnologia de Combustão oscilante) sobre os combustíveis líquidos em condições ambientes de fusão de alumínio metálico num fornalha de fundição. Além disso, realizaram um estudo sobre as características de desempenho melhoradas da combustão oscilante comparando os efeitos térmicos com os do modo de combustão convencional. O dispositivo oscilante, desenvolvido pelo autor é uma válvula eletro mecânica acionada por came que causa oscilações no fluxo de combustível. Experimentos foram conduzidos, variando-se a relação ar-combustível, volume de alumínio, frequência e amplitude da válvula oscilante.

Os resultados quando comparados com a combustão convencional levou a baixo consumo de combustível e específico, maior taxa de transferência de calor, aumento da eficiência da fornalha com volumes visivelmente baixos de gases de combustão e emissões reduzidas.

A figura xx mostra os resultados obtidos em termos de temperatura na fornalha.

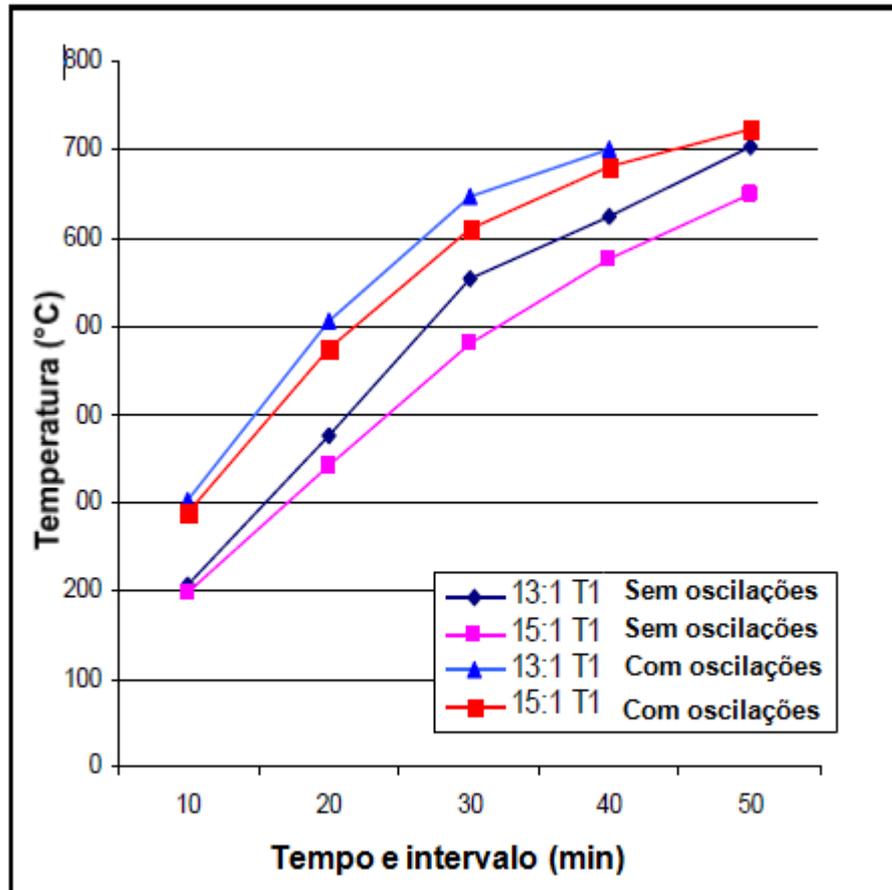


Figura 42: Distribuição de temperaturas. (Govardhan et al., 2008).

O experimento foi realizado para se investigar a distribuição de temperaturas e as características de transferência de calor radiativo de cargas de alumínio em um forno a combustível com combustão convencional e modos de combustão oscilante de operações em diferentes parâmetros. Os resultados da combustão oscilante foram comparados com os resultados da combustão convencional. Os resultados mostraram que devido a oscilações no fluxo de combustível pela válvula oscilante há melhorias nas características de desempenho com a combustão oscilante com aumento de 2 [%] a 6 [%] na eficiência do forno, melhoria da taxa de transferência de calor, redução do consumo específico de energia de 16,5 [%] para 32 [%] acarretando economias de combustível da ordem de 7 [%] a 27 [%], além de tempo de fusão reduzido e aumento da taxa de produtividade com volumes reduzidos de gases de combustão.

## Capítulo 3

# PLANEJAMENTO DA EXPERIMENTAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se o planejamento para a realização dos testes na forma em que foi pensada antes da preparação do laboratório, da instrumentação, do equipamento e de seus anexos. Houve modificações neste planejamento para a real preparação do equipamento e do laboratório para a realização dos testes. A montagem do equipamento e da instrumentação como realmente aconteceu para a realização dos testes está descrita no capítulo 4 deste documento.

## 3.1 DESCRIÇÃO DA CALDEIRA DE TESTES

Neste item descreve-se o equipamento que foi o objeto de estudo e base para todas as pesquisas fundamentais previstas nesta tese de doutorado.

A caldeira piloto estudada nesta pesquisa tem capacidade térmica de 40.500 [kcal/h] (169,29[MJ/h]), volume da fornalha 0,27 m<sup>3</sup> e consumo de biomassa (lenha) de 26 [kg/h] e pressão de operação máxima de 21 [kgf/cm<sup>2</sup>] (20,59 [bar]), mas foi operada em 4 [kgf/cm<sup>2</sup>] (3,92 [bar]). Esta caldeira gera vapor saturado e é híbrida (piroaquatubular) com 2 passes, fabricada pela AGTherm, está instalada nos laboratórios do NEST/UNIFEI. Foi completamente remodelada pela própria AGTherm com recursos da FAPEMIG projeto “Convênio Fapemig TEC APQ 02924-10” para adequação aos experimentos a serem realizados neste trabalho.

Sua construção é em tubos de aço ASTM A-178, com coletor superior de diâmetro de 200 mm e coletores inferiores com diâmetro de 100 [mm] Paredes integralmente radiantes em tubos de aço de 12,7 [mm] DIN – 2458, aletadas com chapa de aço de 6,35 [mm] soldadas eletricamente por processo contínuo. A porta de alimentação de biomassa tem as dimensões: 200x250 [mm], e é isolada com concreto refratário (Barros, 2005).

Os dados fornecidos pelo fabricante estão na Tabela 9.

Tabela 9: Dados da caldeira do NEST.  
(AGTherm).

<b>Item</b>	<b>Descrição</b>
Combustível	Cavaco de madeira
Pressão máxima de trabalho	21 kgf/m <sup>2</sup>
Pressão de teste Hidrostático	32 kgf/m <sup>2</sup>
<b>Superfície de aquecimento</b>	
Fornalha	6,00 m <sup>2</sup>
Fornalha (Área inserida no volume de água)	3,60 m <sup>2</sup>
1º passe	0,70 m <sup>2</sup>
2º passe	2,40 m <sup>2</sup>
Total (aquecimento)	6,70 m <sup>2</sup>
Área de suporte da grelha (original)	0,63 m <sup>2</sup>
Área de suporte da grelha (arranjos 1 e 2)	0,41 m <sup>2</sup>
Volume da câmara de combustão	0,60 m <sup>3</sup>
<b>Parâmetros térmicos</b>	
PCI do combustível	2700 kcal/h – 11,304 MJ/kg
Consumo de combustível a plena carga	51 kg/h
Carga térmica de suporte	152000 kcal/h – 176,7 kW
Potência absorvida na fornalha	70 kW
Temperatura na saída da fornalha	800 °C
Potência absorvida no 2º passe	12 kW
Temperatura na saída	700 °C
Temperatura na saída da chaminé	200 – 230 °C
Eficiência considerada na Fornalha	85%
Capacidade de geração de vapor	120 kg/h a 10 kgf/cm <sup>2</sup> 1250 L/h a 80 °C
Isolamento	Lã de rocha de 2”
Revestimento	Chapa de 0,9 mm

### 3.1.1 REFORMA REALIZADA NA CALDEIRA

O Projeto APQ 02924-10 da FAPEMIG contemplou com seus recursos a realização das modificações na caldeira já existente nos laboratórios do NEST. Esta modificação ocorreu em duas fases. Na primeira foram realizadas alterações na geometria da caldeira e a inserção de pontos de acesso para sondas, além da fabricação de um alimentador com rosca sem fim vertical.

Porém, para se ter o controle de todos os parâmetros de entrada da caldeira de forma independente foi preciso alterar a concepção do alimentador, trocando a rosca sem fim vertical por uma horizontal, além de alterar a altura de entrada da biomassa na câmara de combustão e separar a alimentação da entrada de ar primário. A caldeira pronta para operação após a reforma pode ser vista na Figura 43 e seu esquema pode ser visto na Figura 44.



Figura 43: Foto da caldeira reformada e pronta para testes.

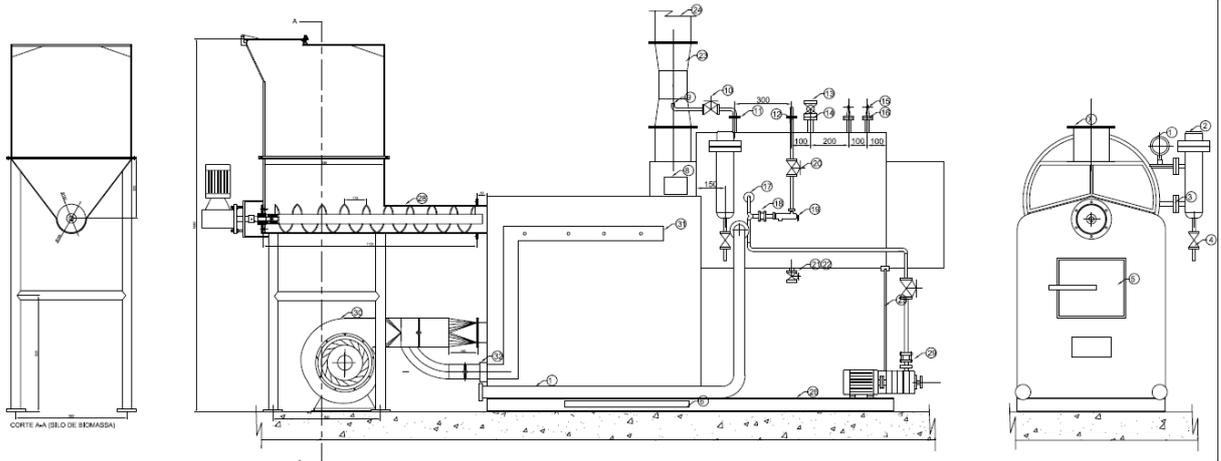


Figura 44: Esquema da caldeira após a reforma.

Pode-se ver na Figura 45 a parede de água da fornalha, na Figura 46 a entrada do 1º passe no tubulão da caldeira, na Figura 47 a saída do 1º passe e entrada do 2º passe e na Figura 48 a saída do 2º passe e a entrada da chaminé.



Figura 45: Parede de água da fornalha.



Figura 46: Entrada do 1º passe.

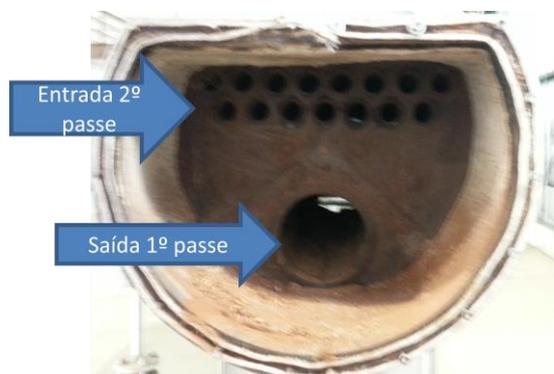


Figura 47: Saída do 1º passe e entrada do 2º passe.



Figura 48: Saída do 2º passe e entrada da chaminé.

## 3.2 CARACTERIZAÇÃO DA BIOMASSA A SER UTILIZADA NOS TESTES

A biomassa considerada é o eucalipto, previsto para ser utilizado inicialmente na forma de cavaco como mostrado na Figura 49.



Figura 49: Biomassa em cavacos.

### 3.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO EUCALIPTO NOS LABORATÓRIOS DO NEST

A descrição e caracterização da biomassa conforme encontrado na literatura já foi apresentada no item 2.4.2.1 do capítulo 2. Em seguida é apresentada a caracterização do eucalipto nos laboratórios do NEST. Esta caracterização foi realizada por Oliveira, (2014) e será considerada para os cálculos deste trabalho.

Para a caracterização do eucalipto foram utilizados pedaços da madeira escolhidos de forma aleatória de uma amostra de 1.000 [kg] aproximadamente. Para a realização da análise elementar (CHNS), as amostras de eucalipto foram picadas num moinho de martelo para redução de sua granulometria, em sequência num moinho de esfera para obtenção de uma amostra em forma de pó. Imagens deste processo podem ser vistos na Figura 50.



Figura 50: Preparação de amostras de eucalipto para análise (Oliveira, 2014).

### 3.2.1.1 Análise elementar e imediata do eucalipto

O analisador CHNSO da Perkin Elmer series II 2400 do laboratório do NEST/UNIFEI, que pode ser visto na Figura 51, foi utilizado para a determinação da composição elementar (C, H, N, S, O) do eucalipto em conjunto com uma balança que faz a medição da massa da amostra que deve ser menor que 3 mg e pode ser vista na Figura 52. Como o analisador não está equipado para a determinação do valor de  $O_2$ , este foi determinado analiticamente por diferença.

Como o analisador CHNS trabalha com amostras com granulometria entre 2-3 [mg], houve a necessidade da redução da granulometria e homogeneização para garantir a representatividade da amostra.



Figura 51: Analisador CHNSO da Perkin Elmer series II 2400. (Oliveira, 2014).



Figura 52: Balança conectada ao Analisador CHNSO da Perkin Elmer series II 2400. (Oliveira, 2014).

Foi usado o analisador termogravimétrico da marca LECO 701, que pode ser visto na Figura 53, para a realização da análise imediata (cinzas, voláteis, carbono fixo). Na Figura 54 podem ser vistas amostras depois de realizada a análise termogravimétrica.

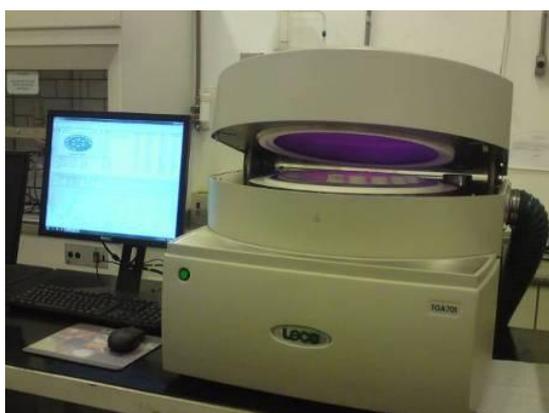


Figura 53: Analisador termogravimétrico TGA LECO.

(Oliveira, 2014).



Figura 54: Amostras depois de realizada à análise termogravimétrica.

(Oliveira, 2014).

A composição elementar do eucalipto em bases seca e úmida, sendo considerados valores médios, é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Composição elementar do eucalipto em bases seca e úmida (valores médios).

(Oliveira, 2014).

Elementos da composição elementar da biomassa	%	Fração	Fração	Fração
		(Base seca sem cinzas e umidade) (Kg <sub>elemento</sub> /kg <sub>biomassa</sub> )	(Base úmida sem cinzas) (Kg <sub>elemento</sub> /kg <sub>biomassa</sub> )	(Base úmida com cinzas e umidade) (Kg <sub>elemento</sub> /kg <sub>biomassa</sub> )
C	49,00	0,490	0,43520	0,4318284
H	6,30	0,063	0,05596	0,0555208
N	0,30	0,003	0,00267	0,0026438
O	44,40	0,444	0,39516	0,3912894

A análise imediata do eucalipto, sendo considerados valores médios, é apresentada na Tabela 11.

Tabela 11: Análise imediata do eucalipto (valores médios).

(Oliveira, 2014).

Amostra biomassa	Umidade (W <sup>t</sup> ) (%)	Voláteis (%)	Cinzas (A <sup>t</sup> ) (%)	Carbono Fixo (%)
Eucalipto	11,17	72,862	0,79	15,178

### 3.2.1.2 Granulometria

Segundo Patiño, (2009) os combustíveis sólidos podem apresentar grande variação em sua granulometria devido aos processos de fabricação. Isso pode ocorrer também nos combustíveis não processados, pelos métodos de obtenção, transporte e manipulação.

O cavaco de eucalipto pode ter variação em sua granulometria devido ao processo de corte e picagem da madeira. Esta variação de tamanho para um mesmo material pode variar desde pequenas partículas que formam uma massa que pode não chegar a reagir por completo no leito até de magnitude maior. O comportamento de uma e de outra é bastante diferente, uma vez que as partículas menores apresentam maior superfície por unidade de volume e conseqüentemente uma melhor transferência de calor de seu entorno, o que modificará os tempos de secagem e devolatilização influenciando o processo de combustão.

Foi então necessário o ajuste da granulometria. Este ajuste foi feito por Patiño, (2009) utilizando expressão do tipo Rosin-Rammler, como mostrado na Figura 55 e pode ser empregado também para o ajuste da granulometria do cavaco de eucalipto.

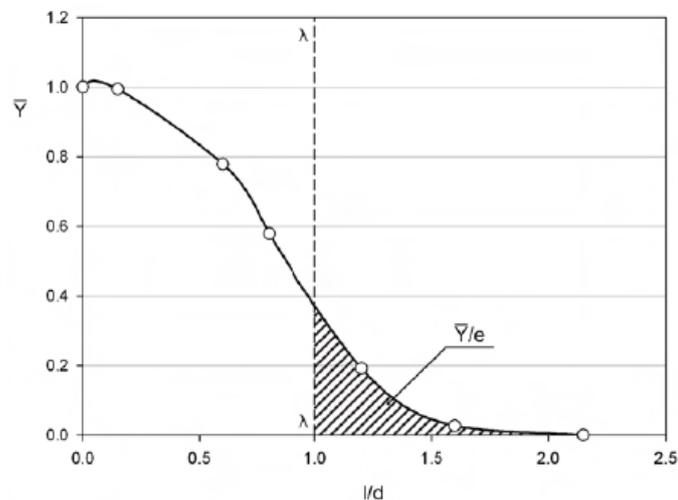


Figura 55: Comprimento característico ( $\lambda$ ) do combustível cuja granulometria foi ajustada por uma distribuição Rosin-Rammler. (Patiño, 2009).

Onde:

$l$  = Comprimento da partícula

$d$  = Diâmetro da partícula

$\bar{Y}$  = Massa total acumulada da distribuição

A Figura 56 mostra a caracterização geométrica da partícula representativa do combustível cujas dimensões são:

$\lambda$  = comprimento característico da distribuição

$d_1$  = largura da partícula

$d_2$  = Espessura da partícula

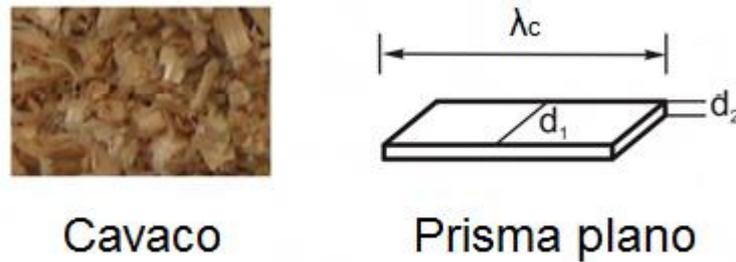


Figura 56: Caracterização geométrica da partícula representativa do combustível. (Patiño, 2009).

A massa da partícula característica pode ser calculada pela equação 8.

$$\mu = V_p \cdot \rho_p \text{ [kg]} \quad (8)$$

Onde:

$V_p$  = Volume da partícula

$\rho_p$  = Massa específica da partícula

O volume da partícula pode ser calculado pela equação 9.

$$V_p = \lambda \cdot d_1 \cdot d_2 \text{ [m}^3\text{]} \quad (9)$$

Uma vez conhecida a partícula característica representativa do combustível, pode-se calcular o raio de sua esfera equivalente ( $r_{eq}$ ), com mostrado na equação 10. A equação 11 mostra o cálculo da superfície equivalente e a equação 12 sua esfericidade ( $\psi$ ), definida como a razão entre a superfície da esfera equivalente e a superfície da partícula.

$$V_{esf} = \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_{eq}^3 \text{ [m}^3\text{]} \Rightarrow r_{eq} = \left( \frac{3 \cdot V_{esf}}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{1}{3}} \text{ [m]} \quad (10)$$

$$S_{\text{esf}} = 4 \cdot \pi \cdot r_{\text{eq}}^2 = 4 \cdot \pi \left( \frac{3 \cdot V_{\text{esf}}}{4 \cdot \pi} \right)^{\frac{2}{3}} = \pi^{\frac{1}{3}} \cdot (6 \cdot V_p)^{\frac{2}{3}} [\text{m}^2] \quad (11)$$

$$\psi = \frac{\pi^{\frac{1}{3}} \cdot (6 \cdot V_p)^{\frac{2}{3}}}{S_p} \quad (12)$$

Onde:

$V_{\text{esf}}$  = Volume da esfera equivalente

$r_{\text{eq}}$  = Raio equivalente

$S_{\text{esf}}$  = Superfície da esfera equivalente

$V_p$  = Volume da partícula

$S_p$  = Superfície da partícula

$\psi$  = Esfericidade

A densidade de empacotamento, aparente ou a granel ( $\rho_{\text{emp}}$ ) é a relação entre o volume ocupado pela massa de partículas e o volume total de seu conteúdo.

Finalmente pode-se determinar a porosidade do leito ( $\varepsilon$ ) como mostrado na equação 13.

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{\text{emp}}}{\rho_p} \quad (13)$$

Onde:

$\rho_{\text{emp}}$  = Densidade de empacotamento

$\rho_p$  = Massa específica da partícula

$\varepsilon$  = Porosidade

Nas proximidades das paredes do leito pode ocorrer uma ordenação forçada de partículas denominada Efeito de Parede. Para se evitar tal efeito deve-se utilizar a dimensão lateral e a altura do leito pelo menos 10 vezes maior que a dimensão média das partículas que o formam (Patiño, 2009)

As características de granulometria consideradas para o trabalho podem ser as mesmas calculadas por Patiño (2009), uma vez que foi realizado o estudo granulométrico para o

cavaco de pinus, que tem a densidade similar ao cavaco de eucalipto que será utilizado neste trabalho.

A Tabela 12 mostra as propriedades das partículas e do empacotamento do leito para o cavaco de pinus.

Tabela 12: Propriedades das partículas e do empacotamento do leito para o cavaco de pinus. (Patiño, 2009).

<b>Amostra</b>	$r_{eq}$	$\psi$	$\rho_p$	$\rho_{emp}$	$\epsilon$
<b>biomassa</b>	[mm]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]
Cavaco de Pinus	1,30	0,30	530	150	0,72

### 3.3 CÁLCULOS A SEREM REALIZADOS

Partindo da composição elementar do combustível, pôde-se então calcular alguns dos parâmetros operacionais que servirão como referência no planejamento dos testes.

Para um combustível qualquer, do qual é conhecida a composição em massa, em base úmida e expresso em porcentagem:

$C^t$ : [kg] de carbono por [kg] de combustível

$H^t$ : [kg] de hidrogênio por [kg] de combustível

$O^t$ : [kg] de oxigênio por [kg] de combustível

$W^t$ : [kg] de água (umidade) por [kg] de combustível

$S^t$ : [kg] de enxofre por [kg] de combustível

$N^t$ : [kg] de nitrogênio por [kg] de combustível

#### 3.3.1 VOLUMES DE AR E DE GASES DE COMBUSTÃO

Pode-se calcular os volumes de ar estequiométrico e de gases gerados durante a combustão de 1kg de combustível para  $\alpha=1,0$  segundo as equações 14 e 15 para combustíveis sólidos e líquidos (Lora et al. 2004):

$$V_a^0 = 0,0889 \cdot (C^t) + 0,265 \cdot H^t - 0,0333 \cdot O^t = 4,0073 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (14)$$

$$V_g^0 = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 4,7930 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (15)$$

Onde:

$V_a^0$  = Volume estequiométrico de ar [ $\text{Nm}^3_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

$V_g^0$  = Volume estequiométrico gases gerados durante a combustão de 1[kg] de combustível para  $\alpha = 1,0$  [ $\text{Nm}^3_{\text{gas}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

$V_{\text{RO}_2}^0$  = Volume estequiométrico de oxigênio [ $\text{Nm}^3_{\text{O}_2}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

$V_{\text{N}_2}^0$  = Volume estequiométrico de Nitrogênio [ $\text{Nm}^3_{\text{N}_2}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

$V_{\text{H}_2\text{O}}^0$  = Volume estequiométrico de vapor de água [ $\text{Nm}^3_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ]

As equações 16, 17 e 18 mostram os cálculos do Volume estequiométrico de oxigênio [ $\text{Nm}^3_{\text{O}_2}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ], do Volume estequiométrico de Nitrogênio [ $\text{Nm}^3_{\text{N}_2}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ] e do Volume estequiométrico de vapor de água [ $\text{Nm}^3_{\text{H}_2\text{O}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ] respectivamente.

$$V_{\text{RO}_2}^0 = V_{\text{CO}_2} + V_{\text{SO}_2}^0 = 0,01866 \cdot (C^t + 0,375 \cdot S^t) \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (16)$$

$$V_{\text{N}_2}^0 = 0,79 \cdot V_a^0 + 0,008 \cdot N^t \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (17)$$

$$V_{\text{H}_2\text{O}}^0 = 0,111 \cdot H^t + 0,0124 \cdot W^t + 0,0161 \cdot V_a^0 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \quad (18)$$

Podem-se calcular os volumes de gases de combustão e de gases secos reais conforme as equações 19 e 20.

$$V_{\text{gs}} = V_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 + (\alpha - 1) \cdot V_a^0 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \text{ ou } \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{m}^3} \right] \quad (19)$$

$$V_g = V_g^0 + 1,0161 \cdot (\alpha - 1) \cdot V_a^0 \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{kg}} \right] \text{ ou } \left[ \frac{\text{Nm}^3}{\text{m}^3} \right] \quad (20)$$

Sendo:

$V_{gs}$  = Volume estequiométrico de ar [ $\text{Nm}^3_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ] ou [ $\text{Nm}^3_{\text{ar}}/\text{m}^3_{\text{comb}}$ ].

$V_g$  = Volume real gases gerados durante a combustão [ $\text{Nm}^3_{\text{ar}}/\text{kg}_{\text{comb}}$ ] ou [ $\text{Nm}^3_{\text{ar}}/\text{m}^3_{\text{comb}}$ ].

$\alpha$  = Coeficiente de excesso de ar

### 3.3.2 ENTALPIAS DO AR E DOS GASES DE COMBUSTÃO

Podem-se calcular as entalpias do ar e dos gases de combustão estequiométricos e real, além da entalpia dos gases gerados durante a combustão real, conforme as equações 21, 22 e 23 (Lora et al. 2004).

$$h_a^0 = c_{\text{ar}} \cdot V_a^0 \cdot t \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \text{ ou } \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] \quad (21)$$

$$h_g^0 = [V_{\text{RO}_2} \cdot c_{\text{RO}_2} + V_{\text{N}_2}^0 \cdot c_{\text{N}_2} + V_{\text{H}_2\text{O}}^0 \cdot c_{\text{H}_2\text{O}}] \cdot t + h_{\text{cinzas}} \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \text{ ou } \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] \quad (22)$$

$$h_g = h_g^0 + (\alpha - 1) \cdot h_a^0 \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right] \text{ ou } \left[ \frac{\text{kJ}}{\text{m}^3} \right] \quad (23)$$

Sendo:

$h_a^0$  = Entalpia teórica de ar [ $\text{kJ}/\text{kg}$  ou  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ]

$h_g^0$  = Entalpia teórica de gases de combustão [ $\text{kJ}/\text{kg}$  ou  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ]

$h_g$  = Entalpia real de gases de combustão [ $\text{kJ}/\text{kg}$  ou  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ]

$c_{\text{ar}}$  = Calor específico do ar [ $\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$c_{\text{RO}_2}$  = Calor específico do oxigênio [ $\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$c_{\text{N}_2}$  = Calor específico do nitrogênio [ $\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$c_{\text{H}_2\text{O}}$  = Calor específico do vapor [ $\text{MJ}/\text{m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$ ]

$h_{\text{cinzas}}$  = Entalpia da cinza volátil presente nos produtos da combustão [ $\text{kJ}/\text{kg}$  ou  $\text{kJ}/\text{m}^3$ ]

### 3.3.3 EXCESSO DE AR

Para determinar o valor do coeficiente de excesso de ar ( $\alpha$ ) experimentalmente podem-se utilizar duas expressões, uma a partir do  $\text{CO}_2$  e outra a partir do  $\text{O}_2$ . A equação 24 mostra o cálculo do coeficiente de excesso de ar através da concentração de  $\text{CO}_2$ .

$$\alpha = \frac{\text{CO}_2^{\text{max}}}{\text{CO}_2} \quad (24)$$

Onde:

$\text{CO}_2^{\text{max}}$  = Concentração máxima possível de  $\text{CO}_2$  nos gases de combustão

$\text{CO}_2$  = Concentração de  $\text{CO}_2$  nos gases de combustão

O valor máximo de concentração de  $\text{CO}_2$  pode ser calculado pela equação 25.

$$\text{CO}_2^{\text{max}} = \frac{21}{1 + \beta} \quad (25)$$

Sendo:

$\beta$  = Coeficiente de Bunte

O valor do coeficiente de Bunte pode ser calculado pela equação 26.

$$\beta = 2,35 \cdot \frac{H^t - 0,126 \cdot O^t + 0,038 \cdot N^t}{C^t + 0,375 \cdot S^t} \quad (26)$$

Caso não se possa medir a concentração de  $\text{CO}_2$ , pode-se calculá-la através de  $\beta$  conforme a equação 27.

$$\text{CO}_2 = \frac{21 - \text{O}_2}{1 - \beta} = [\%] \quad (27)$$

O valor do coeficiente de excesso de ar também pode ser calculado através da concentração de  $\text{O}_2$  para a combustão completa pela equação 28.

$$\alpha = \frac{21}{21 - O_2} \quad (28)$$

Para o caso de combustão incompleta, o coeficiente de excesso de ar pode ser calculado conforme equação 29.

$$\alpha = \frac{21}{21 - (O_2 - 0,5 \cdot CO - 0,5 \cdot H_2 - 2 \cdot CH_4)} \quad (29)$$

Onde:

$O_2$  = Concentração de  $O_2$  nos gases de combustão [%]

$CO$  = Concentração de  $CO$  nos gases de combustão [%]

$H_2$  = Concentração de  $H_2$  nos gases de combustão [%]

$CH_4$  = Concentração de  $CH_4$  nos gases de combustão [%]

A Figura 57 mostra um gráfico de barras indicativo das tendências dos gases de combustão para os diferentes valores de coeficiente de excesso de ar. Nota-se que os teores de  $CO_2$  e  $O_2$  podem ser usados para o cálculo do coeficiente  $\alpha$  por constituírem indicadores diretos deste coeficiente.

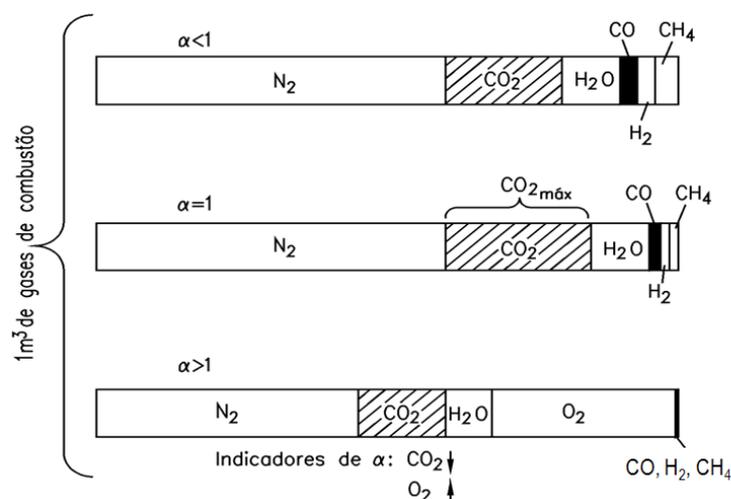


Figura 57: Composição dos produtos da combustão para diferentes valores de coeficiente de excesso de ar (Lora et al. 2004).

### 3.3.4 PERDA DE CARGA

No intuito de avaliar o potencial da intensificação acústica, o cálculo da perda de carga entre o gerador de ondas sonoras e o leito de combustão pode revelar dados sobre a capacidade de penetração das ondas sonoras no leito.

A perda de carga foi calculada em duas partes distintas. Foi primeiramente calculada a perda de carga na tubulação de acoplamento do Sistema Acústico entre o gerador de ondas sonoras e a tubulação de fornecimento de ar primário e neste, até a grelha. Depois foi calculada a perda de carga no leito, considerando-se a sua altura e porosidade em função do cavaco de eucalipto.

#### 3.3.4.1 Perda de carga entre o gerador de ondas sonoras e a grelha

O sistema acústico (SA) foi anexado ao sistema de fornecimento de ar primário. Esta conexão está explicada no item 3.4.1.5 do capítulo 3.

O duto de ar primário tem uma seção circular de 0,3 [m] de comprimento e 0,075 [m] de raio (seção 1 do duto de ar primário) e uma seção retangular de lados 0,205 [m] e 0,11 [m] e 0,5 [m] de comprimento respectivamente (seção 2 do duto de ar primário). O duto que conecta o Sistema Acústico (SA) se conecta na seção 2 do tubo de fornecimento de ar primário. A perda de carga no duto de ar primário ( $\Delta P_{ap}$ ) até a fornalha pode ser calculada pela equação 30.

$$\Delta P_{ap} = \Delta P_{aps1} + \Delta P_{aps2} = 1,6591 [\text{Pa}] \quad (30)$$

Onde:

$\Delta P_{ap}$  = Perda de carga no duto de fornecimento de ar primário

$\Delta P_{aps1}$  = Perda de carga na seção 1 do duto de ar primário

$\Delta P_{aps2}$  = Perda de carga na seção 2 do duto de ar primário

Para a seção 1 do duto de ar primário a perda de carga ( $\Delta P_{s1}$ ) pode ser calculada conforme equação 31 descrita em Bazzo, (1995).

$$\Delta P_{aps1} = f \cdot \frac{L_{s1}}{d_{es1}} \cdot \rho_a \cdot \frac{v^2}{2} = 0,6305[\text{Pa}] \quad (31)$$

Onde:

$\Delta P_{aps1}$  = Perda de carga na seção 1 do duto de fornecimento de ar primário [Pa]

f = Fator de atrito

$L_{s1}$  = Comprimento da seção 1 do duto de fornecimento de ar primário [m]

$d_{es1}$  = Diâmetro equivalente do tubo na seção 1 do duto de fornecimento de ar primário [m]

$\rho_a$  = Massa específica do ar [ $\text{kg/m}^3$ ]

v = Velocidade média do ar em escoamento na seção [m/s]

O fator de atrito (f) é determinado experimentalmente em função do número de Reynolds (Re), da rugosidade relativa da parede do tubo. Pode variar entre (f=0,01 a 0,03) (Bazzo,1995).

Da mesma forma para a seção 2 do duto de ar primário a perda de carga ( $\Delta P_{s2}$ ) pode ser calculada conforme equação 32.

$$\Delta P_{aps2} = f \cdot \frac{L_{s2}}{d_{es2}} \cdot \rho_a \cdot \frac{v^2}{2} = 1,0286[\text{Pa}] \quad (32)$$

Onde:

$\Delta P_{aps2}$  = Perda de carga na seção 2 do duto de fornecimento de ar primário [Pa]

f = Fator de atrito

$L_{s2}$  = Comprimento da seção 2 do duto de fornecimento de ar primário [m]

$d_{es2}$  = Diâmetro equivalente do tubo na seção 2 do duto de fornecimento de ar primário [m]

$\rho_a$  = Massa específica do ar [ $\text{kg/m}^3$ ]

v = Velocidade média do ar em escoamento na seção

O sistema acústico foi anexado ao sistema de fornecimento de ar primário conforme esquema descrito no item 3.4.1.5 do capítulo 3. A perda de carga no duto que conecta o sistema acústico com o duto de ar primário pode ser considerada nula, uma vez que a velocidade média do ar neste duto é nula. Isto ocorre porque durante um ciclo o sistema acústico desloca certo volume de ar no sentido positivo do duto e depois no sentido negativo do mesmo.

### 3.3.4.2 Perda de carga no leito

O leito é formado por cavacos de eucalipto que estão descritos no item 3.2.1.2 do capítulo 3. A perda de carga no leito pode ser calculada conforme a equação 33. Esta equação é chamada Equação de Ergun e foi aplicada por Patiño (2009) para este cálculo também em leito de cavacos.

$$\frac{\Delta P}{H_L} = 150 \cdot \frac{(1 - \epsilon)^2}{\epsilon^3} \cdot \frac{\mu_a}{d_p^2} \cdot v_{av} + 1,75 \cdot \frac{(1 - \epsilon)}{\epsilon^3} \cdot \frac{\rho_a}{d_p} \cdot v_{av}^2 = 34,9824 \left[ \frac{\text{Pa}}{\text{m}} \right] \quad (33)$$

Onde:

$\Delta P$  = Perda de carga [Pa]

$H_L$  = Altura do leito [m]

$\epsilon$  = porosidade do Leito [-]

$\mu_a$  = viscosidade do ar [kg/ms]

$d_p$  = Diâmetro equivalente da partícula [m]

$\rho_a$  = Massa específica do ar [kg/m<sup>3</sup>]

$v_{av}$  = Velocidade média do ar em escoamento no duto vazio [m/s]

Considerações:

$H_L$  = Altura do leito = 0,2 [m]

$A_L$  = Área do Leito = 0,41 [m<sup>2</sup>]

Observa-se que neste cálculo não foi considerada a porcentagem vazada da grelha, pois a mesma ainda não estava definida nesse momento do planejamento. Considerou-se, portanto para este cálculo a área da grelha 100% vazada.

A vazão mássica de biomassa considerada é a máxima informada pelo fabricante:

$C = 51$  [kg/h]

Pode-se então calcular a velocidade do ar no duto vazio conforme a equação 34.

$$v_{av} = \frac{V_a}{A_L} = 0,18 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (34)$$

Onde:

$v_{av}$  = Velocidade do ar no leito vazio

$V_a$  = Vazão do ar

$A_L$  = Área do leito

Mas, para o cálculo da vazão de ar, se considerou vazão mássica máxima de biomassa informada pelo fabricante e  $\alpha = 1,3$ ).

$\mu_a = 18,2 \cdot 10^{-6}$  [Pa.s] para  $T=20^\circ\text{C}$

$\rho_a = 1,205$  [kg/m<sup>3</sup>] para  $T=20^\circ\text{C}$

### 3.3.5 CÁLCULO DE PRESSÃO ACÚSTICA NO SISTEMA ACÚSTICO(SA)

Existem dois tipos de ondas mecânicas: longitudinais, onde as moléculas movem-se na mesma direção de propagação da onda; e transversais, quando as moléculas movem-se perpendicularmente a essa direção. As ondas de pressão que caracterizam o som, que se pode chamar de ondas sonoras, são do tipo longitudinal que se propagam por uma série de compressões/descompressões em um meio, normalmente o ar.

Ondas sonoras propagam-se através de qualquer meio material com velocidade que depende das propriedades físicas deste meio. A descrição matemática das ondas sonoras é muito parecida com descrição das outras ondas mecânicas. Ondas sonoras podem ser divididas em três categorias, dependendo da sua frequência:

Ondas audíveis: são aquelas com frequências entre 20 e 20000 [Hz], que é o intervalo que a grande maioria dos ouvidos humanos percebe e interpreta estas ondas como som.

Ondas de infra-som: são as com frequências abaixo do limite do intervalo audível (<20 [Hz]).

Ondas de ultra-som: são ondas sonoras com frequências acima do limite do intervalo audível (>20000 [Hz]). Neste trabalho serão utilizadas frequências de trabalho entre 50 e 200 [Hz].

Para a avaliação da intensificação acústica é importante que se possa comparar a pressão acústica gerada no gerador de ondas sonoras com a perda de carga que ocorre nos dutos que

conectam o gerador de ondas acústicas até o leito e neste inclusive. Para tal, foi necessário calcular a pressão acústica gerada pelo sistema gerador de ondas sonoras.

### 3.3.5.1 Nível de Intensidade Sonora (SIL)

É a taxa com a qual a energia flui numa determinada direção, através de uma determinada área. Pode ser calculada conforma a equação 35. O fluxo de potência sonora de referência pode ser visto na equação 36.

$$SIL = 10 \cdot \log \left( \frac{I_r}{I_{ref}} \right) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (35)$$

$$I_{ref} = 10^{-12} \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad (36)$$

Onde:

SIL = Nível de intensidade sonora [ $W/m^2$ ]

$I_r$  = Fluxo de potência sonora real [ $W/m^2$ ]

$I_{ref}$  = Fluxo de potência sonora de referência [ $W/m^2$ ]

### 3.3.5.2 Nível de Potência Sonora (PWL)

É a taxa com a qual a energia do som flui numa determinada direção, através de uma determinada área. Considerando os 500 [W] de potência sonora real do sistema acústico, pode-se calcular o PWL conforma a equação 37. A Potência sonora de referência [W] pode ser vista na equação 38. Salienta-se que 500[W] era a potência da caixa amplificada informada pela University of Iowa, que forneceu o equipamento e o gerador de frequências para os testes, ambos descritos no item 3.4.1.5.

$$PWL = 10 \cdot \log \left( \frac{W_r}{W_{ref}} \right) = 146,99 \text{ [dB]} \quad (37)$$

$$W_{ref} = 10^{-12} \text{ [W]} \quad (38)$$

Onde:

PWL = Nível de potência sonora [dB]

$W_r$  = Potência sonora real [W]

$W_{ref}$  = Potência sonora de referência [W]

### 3.3.5.3 Nível de Pressão Sonora (SPL)

É a medida da amplitude da onda sonora. Pode ser calculada pela equação 39. A Pressão de referência [Pa] pode ser vista na equação 40.

$$SPL = 20 \cdot \log \frac{P_r}{P_{ref}} \text{ [dB]} \quad (39)$$

$$P_{ref} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ [Pa]} \quad (40)$$

Onde:

SPL = Nível de pressão sonora [dB]

$P_r$  = Pressão real [Pa]

$P_{ref}$  = Pressão de referência [Pa]

Como, no caso de fontes sonoras singulares, pode-se considerar a PWL igual a SPL, a pressão real da onda sonora em seu valor máximo pode ser calculado como na equação 41.

$$SPL = 20 \cdot \log \frac{P_r}{P_{ref}} \text{ [dB]} = 146,99 \text{ [dB]} \Rightarrow P_r = 10^{\left(\frac{146,99}{20}\right)} \cdot P_{ref} = 447,21 \text{ [Pa]} \quad (41)$$

Pretendia-se para os testes da etapa dois a utilização de três valores da  $P_r$ , que foram calculados a partir da variação da potência a um terço, dois terços e total conforme valores mostrados na Tabela 13.

Tabela 13: Valores de pressão acústica real em função da potência acústica real.

Potência acústica	Pressão acústica
$W_r$ [W]	$P_r$ [Pa]
165	256,90
330	363,32
500	447,22

### 3.3.6 CÁLCULO DO DUTO DE CONEXÃO DO SA E ESCOLHA DE FREQUÊNCIAS DE TRABALHO

A conexão entre o SA e o duto de fornecimento de ar primário deve ser realizada por um duto cujo comprimento seja preferencialmente múltiplo do comprimento de onda ( $\lambda$ ), para que a SPL seja transmitida em sua máxima amplitude ao escoamento de ar primário fornecido para a fornalha. Isso porque a forma de onda senoidal é a que melhor se adéqua para representar o deslocamento da pressão sonora gerada no SA. O comprimento de onda é a distância entre duas cristas de ondas consecutivas, como mostrado na Figura 58.

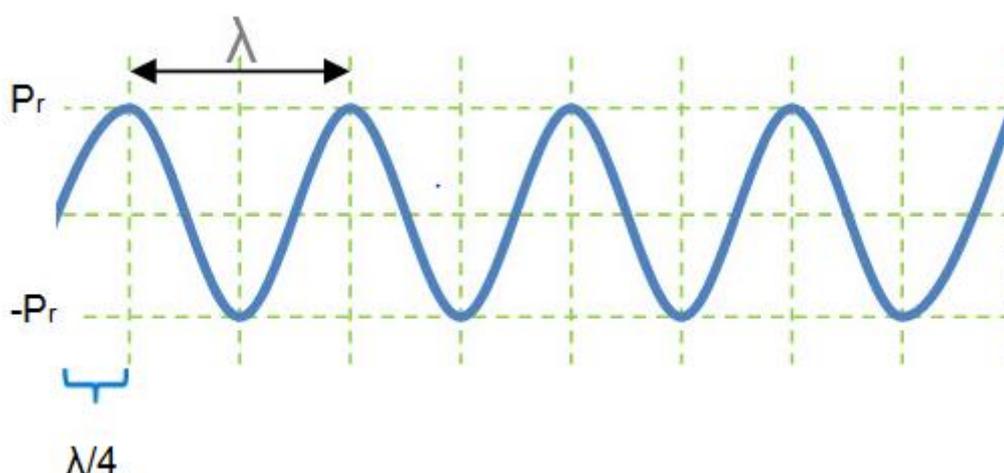


Figura 58: Comprimento de onda.

O comprimento de onda pode ser calculado a partir da velocidade do som no ar, que é de 344[m/s] a 20 [°C] e da frequência conforme equação 42.

$$\lambda = \frac{c}{f_r} [\text{m}] \quad (42)$$

Onde:

$\lambda$  = Comprimento de onda [m]

$c$  = Velocidade do som no ar [m/s]

$f_r$  = frequência [Hz]

pretendia-se utilizar três frequências para a realização dos testes entre 21 e 200 [Hz] que é a faixa de resposta de frequências para o alto falante do SA. A escolha destas frequências deve ser feita levando-se em conta a possibilidade do comprimento do duto de conexão do SA e do duto de fornecimento de ar primário também serem preferencialmente múltiplos do valor de comprimento de onda calculado para cada uma das frequências escolhidas. A Tabela 14 mostra os valores de frequência inicialmente escolhidos para teste e seus respectivos valores de comprimento de onda.

Valores múltiplos de frequência geram valores múltiplos de comprimento de onda. Os valores escolhidos possibilitam a multiplicidade entre os valores de comprimento de onda e consequentemente a definição do comprimento do duto de conexão entre o SA e o duto de ar primário, que pode ser do tamanho do maior comprimento de onda, conforme a equação 43.

Tabela 14: Valores de comprimento de onda para vários valores de frequência.

<b>Frequência</b>	<b>Comprimento de onda</b>
<b>F[Hz]</b>	<b><math>\lambda</math>[m]</b>
50	6,88
100	3,44
200	1,72

$$L_d = 6,88[\text{m}] \quad (43)$$

Onde:

$L_d$  = Comprimento do duto de conexão entre o SA e o duto de ar primário

### 3.3.7 BALANÇO DE MASSA E ENERGIA NA CALDEIRA

Na caldeira em questão, além dos fluxos de água e vapor, entram o combustível e o ar para a combustão. Como o combustível é sólido, parte dele é constituída por cinzas. Uma fração destas cinzas é removida pelo silo sob a fornalha e a outra parte é arrastada pelos gases e sai para o meio ambiente através da chaminé. Como a caldeira tem tiragem natural serão consideradas nulas as infiltrações de ar. Também serão consideradas nulas as purgas de água do tubulão. A Figura 59 mostra o balanço de massa da caldeira do NEST considerando os seguintes fluxos de massa:

$L_a$  = Fluxo de ar para a combustão [Kg/s] ou [ $m^3/s$ ]

$L_g$  = Fluxo de gases de escape [Kg/s] ou [ $m^3/s$ ]

$C$  = Consumo de combustível [kg/s]

$G_{cin1}$  = Fluxo de cinzas removido pelo silo abaixo da fornalha [kg/s]

$G_{cin2}$  = Fluxo de cinzas arrastada com os gases de combustão [kg/s]

$\dot{m}_{vsat}$  = Vazão de vapor saturado [kg/s]

$\dot{m}_{aa}$  = Vazão de água de alimentação [kg/s]

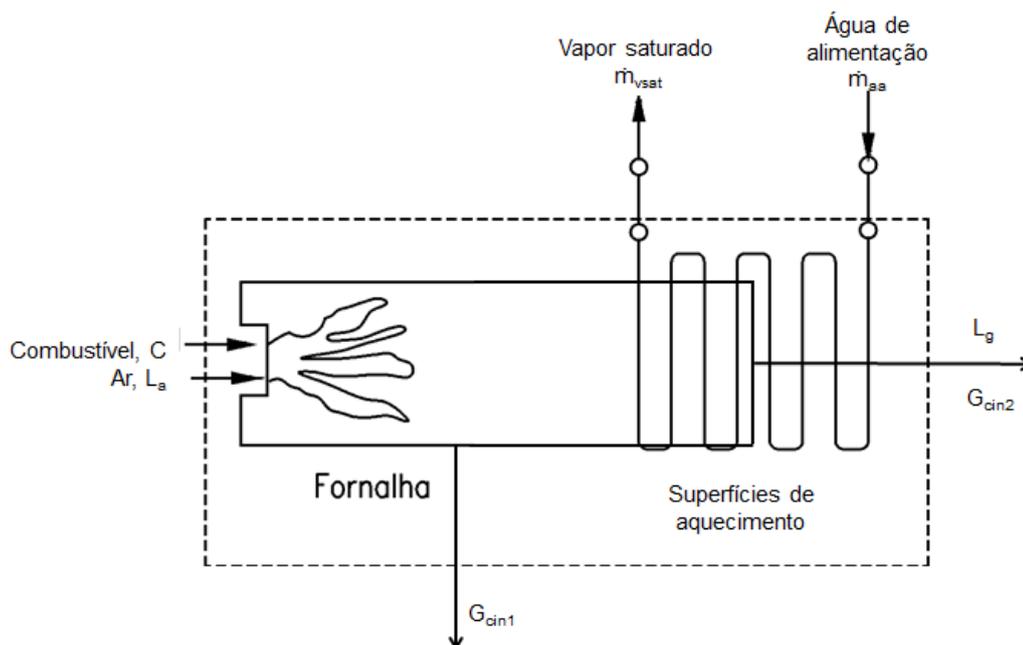


Figura 59: Fluxos de massa da caldeira do NEST.

O balanço de massa relativo ao combustível e os gases de combustão pode ser expresso conforme a equação 44.

$$L_a + C = L_g + \sum_{i=1}^2 G_{cin_i} \quad (44)$$

O balanço da água e vapor pode ser escrito conforme a equação 45.

$$\dot{m}_{aa} = \dot{m}_{vs} \quad (45)$$

Para as cinzas, como a quantidade total de cinzas que entra na caldeira ( $A^t \cdot C$ ) é igual à soma das vazões removidas pelo silo sob a fornalha ( $G_{cin1}$ ) e a arrastada pelos gases de combustão ( $G_{cin2}$ ), seu balanço pode ser como mostrado na equação 46.

$$A^t \cdot C = G_{cin_1} + G_{cin_2} \quad (46)$$

Onde:

$A^t$  = teor de cinzas na composição elementar do combustível [%]

Segundo Lora et al., (2004) o balanço de energia permite a análise da relação entre a energia disponível (com base no poder calorífico do combustível), a energia absorvida pelo fluido de trabalho nas diversas superfícies de aquecimento e as “perdas de calor” com os gases de exaustão, combustão incompleta, alta temperatura e presença de carbono nos resíduos das cinzas, etc. O balanço de energia da caldeira do NEST pode ser visto na Figura 60.

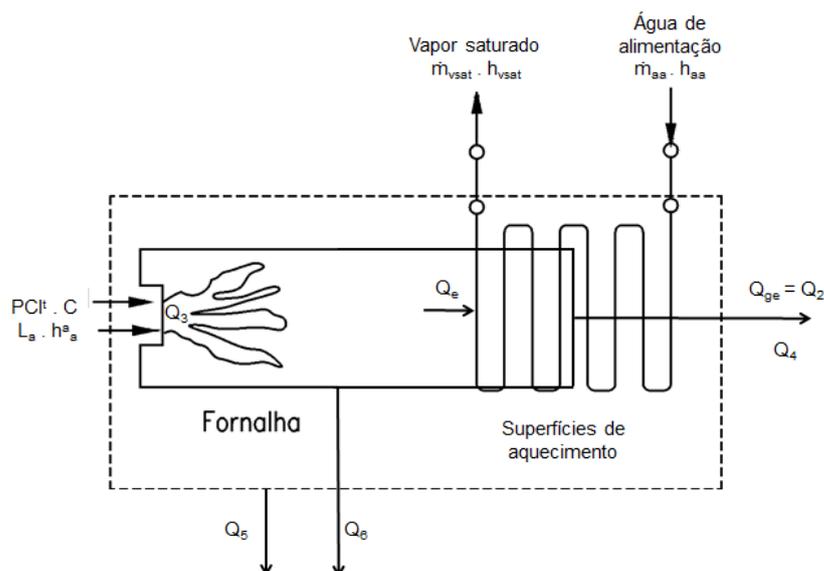


Figura 60: Balanço de energia da caldeira do NEST.

Onde:

$PCI^t$  = Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]

$L_a$  = Fluxo de ar para a combustão [Kg/s] ou [m<sup>3</sup>/s]

$L_g$  = Fluxo de gases de escape [Kg/s] ou [m<sup>3</sup>/s]

$C$  = Consumo de combustível [kg/s]

$\dot{m}_{vsat}$  = Vazão de vapor saturado [hg/s]

$\dot{m}_{aa}$  = Vazão de água de alimentação [hg/s]

$h_a^a$  = Entalpia do ar para a combustão à temperatura ambiente [kJ/kg]

$h_{aa}$  = Entalpia da água de alimentação [kJ/kg]

$h_{vsat}$  = Entalpia do vapor saturado [kJ/kg]

$Q_e$  = Energia absorvida pelas superfícies de troca de calor

$Q_2$  = Perdas com os gases de escape

$Q_3$  = Perda por combustão química incompleta

$Q_4$  = Perdas por combustão mecânica incompleta

$Q_5$  = Perdas ao meio ambiente

$Q_6$  = Perdas devidas a alta temperatura dos resíduos de cinzas

O balanço de energia pode ser expresso de acordo com a equação 47.

$$PCI^t = Q_{\text{útil}} + (\text{Perdas de Calor})$$

(47)

Ou:

$$PCI^t = \frac{\dot{m}_{vsat}}{C} \cdot (h_{vsat} - h_{aa}) + (h_{ge} - \alpha_{ge} \cdot h_{af}^0) + \sum_{i=3}^6 Q_i \quad (48)$$

Onde:

$h_{ge}$  = Entalpia dos gases de exaustão [kJ/kg]

$\alpha_{ge}$  = Excesso de ar nos gases de exaustão [%]

$h_{af}^0$  = Entalpia do ar para a combustão à temperatura dos gases de exaustão [kJ/kg]

### 3.3.8 CÁLCULO DE EFICIÊNCIA DO EQUIPAMENTO

O cálculo da eficiência da caldeira será realizado pelo método do balanço indireto. Para tal, segundo Lora et al., (2004), deve-se conhecer as perdas de calor na caldeira. A Tabela 15 mostra as perdas de calor na caldeira, o que as evidencia e suas causas.

Tabela 15: Perdas de calor na caldeira.

(Lora et al., 2004).

<b>Perda</b>	<b>Descrição</b>	<b>Evidência</b>	<b>Causa</b>
$q_2$	Perdas com os gases de escape	$t_{ge} \gg t_a$	Áreas de troca de calor insuficientes
$q_3$	Perda por combustão química incompleta	Presença de produtos de combustão incompleta nos gases (CO, H <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , C <sub>n</sub> H <sub>n</sub> , etc.)	Ar secundário ou tempo de permanência insuficientes
$q_4$	Perdas por combustão mecânica incompleta	Partículas de carbono e fuligens nos gases	Ar secundário insuficiente, problemas com a aerodinâmica da fornalha por arrasto excessivo, alta umidade da biomassa, etc.
$q_5$	Perdas ao meio ambiente		Temperatura das superfícies externas da caldeira maior que a $t_a$
$q_6$	Perdas devidas a alta temperatura dos resíduos de cinzas		Resíduos extraídos durante a limpeza da grelha tem temperatura maior que $t_a$

Onde:

$t_{ge}$  = Temperatura dos gases de escape

$t_a$  = Temperatura ambiente

A eficiência da caldeira pode ser calculada pela equação 49.

$$\eta_c = 1 - \sum_{i=2}^6 q_i \quad (49)$$

Onde:

$\eta_c$  = Eficiência da caldeira

$q_i$  = perdas

A perda  $q_2$  pode ser calculada de acordo com a equação 50.

$$q_2 = \frac{h_{g,e} - \alpha_{ge} \cdot h_{a,f}^0}{Q_t^d} \cdot (100 - q_4) \quad (50)$$

Onde:

$h_{g,e}$  = Entalpia dos gases de escape, calculada a partir do coeficiente de excesso de ar e da temperatura dos gases [kJ/kg]

$\alpha_{ge}$  = Volume de gases de escape

$h_{a,f}^0$  = Entalpia do volume de ar teoricamente necessário para a combustão de 1 [kg] de combustível

$Q_t^d$  = Energia que entra no volume de controle configurado pela caldeira, no caso da nossa caldeira é o PCI<sup>t</sup>.

Considerou-se para no volume de controle que não haverá infiltrações de ar na caldeira, então a perda  $q_2$  pode ser escrita conforme equação 51.

$$q_2 = \frac{h_{g,e}}{PCI} \cdot (100 - q_4) \quad (51)$$

A perda  $q_3$  pode ser calculada de acordo com a equação 52.

$$q_3 = (126,4 \cdot \text{CO} + 358,2 \cdot \text{CH}_4 + 108,0 \cdot \text{H}_2) \cdot \frac{V_{g,s}}{\text{PCI}} \quad (52)$$

Onde:

CO = Conteúdo de CO nos gases de exaustão [%]

CH<sub>4</sub> = Conteúdo de CH<sub>4</sub> nos gases de exaustão [%]

H<sub>2</sub> = Conteúdo de H<sub>2</sub> nos gases de exaustão [%]

V<sub>g,s</sub> = Volume dos gases secos [m<sup>3</sup>/kg]

A perda **q<sub>4</sub>** pode ser calculada de acordo com a equação 53.

$$q_4 = \left( a_p \cdot \frac{C_p}{100 - C_p} + a_{arr} \cdot \frac{C_{arr}}{100 - C_{arr}} \right) \cdot \frac{327,8 \cdot A^t}{\text{PCI}} \quad (53)$$

Onde:

a<sub>p</sub> = Fração da quantidade total de cinzas nos resíduos extraídos pelo fundo da fornalha [%]

C<sub>p</sub> = Teor de carbono nos resíduos retirados pelo fundo da fornalha [%]

a<sub>arr</sub> = Fração da quantidade total de cinzas na chaminé [%]

C<sub>arr</sub> = Teor de carbono nos resíduos arrastados pela chaminé [%]

A<sup>t</sup> = Teor de cinzas na composição elementar do combustível [%]

A perda **q<sub>5</sub>** pode ser calculada segundo a equação 54.

$$q_5 = q_{5nom} \cdot \frac{\dot{m}_{v,s,nom}}{\dot{m}_{vsat}} \quad (54)$$

Onde:

q<sub>5nom</sub> = perdas de calor ao meio ambiente para uma produção nominal de vapor [%]

$\dot{m}_{v,s,nom}$  = produção nominal (nom) de vapor [t/h]

$\dot{m}_{vsat}$  = produção de vapor saturado [t/h]

A perda **q<sub>5nom</sub>** é normalmente calculada por normogramas elaborados por diferentes fabricantes, como mostrado na Figura 61.

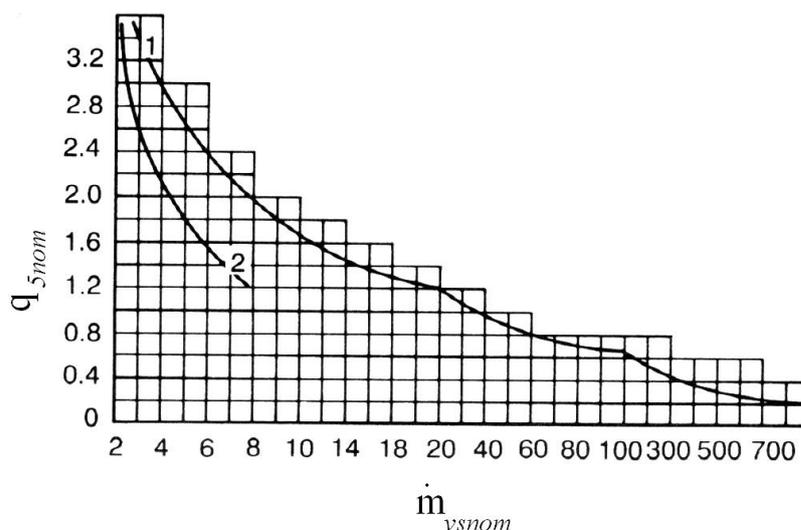


Figura 61: Normograma para determinação de perdas de calor para o meio ambiente ( $q_5$ )  
 1 – Caldeiras com superfícies recuperadoras. 2 – Caldeiras sem superfícies recuperadoras

(Lora et al., 2004).

A perda  $q_6$  pode ser calculada segundo a equação 55.

$$q_6 = A^t \cdot a_p \cdot c_p \cdot \frac{t_p}{PCI} \quad (55)$$

Onde:

$A^t$  = Teor de cinzas na composição elementar do combustível [%]

$a_p$  = Fração da quantidade total de cinzas nos resíduos extraídos pelo fundo da fornalha [%]

$c_p$  = Calor específico dos resíduos de cinzas [kJ/kgK]

A fração de cinzas nos gases de combustão ( $\mu$ ) pode ser calculada pela equação 56.

$$\mu = \frac{10 \cdot A^t \cdot a_{arr}}{V_{gs}} \left[ \frac{g}{m^3} \right] \quad (56)$$

Onde:

$\mu$  = fração de cinzas nos gases de combustão

$V_{gs}$  = Volume de gases secos [ $m^3/kg$ ]

A fração de cinzas nos resíduos extraídos pelo fundo da fornalha ( $a_p$ ) pode ser calculada pela equação 57.

$$a_p = \frac{\dot{m}_p \cdot A_p}{C \cdot A^t} \quad (57)$$

Onde:

$a_p$  = Fração de cinzas nos resíduos extraídos pelo fundo da fornalha [%]

$\dot{m}_p$  = Fluxo de resíduos extraídos pelo fundo da fornalha, referente ao total de resíduos sólidos, incluindo a cinza e o carbono não queimado [kg/s]

$A_p$  = teor de cinzas nos resíduos da fornalha [%]

A fração da quantidade total de cinzas nos gases de chaminé ( $a_{arr}$ ) pode ser calculada pela equação 58.

$$a_{arr} = 1 - a_p \quad (58)$$

No caso da caldeira do NEST a perda  $q_6$  pode ser desconsiderada, uma vez que, segundo Mitor et al., (1973) a equação 59 foi satisfeita.

$$A^t \leq \frac{PCI^t \left[ \frac{kJ}{kg} \right]}{480} [\%] \rightarrow 0,79[\%] \leq 38,73[\%] \quad (59)$$

A equação 49 pode ser reescrita conforme equação 60.

$$\eta_c = 1 - \sum_{i=2}^5 q_i \quad (60)$$

Onde:

$\eta_c$  = Eficiência da caldeira

$q_i$  = perdas

### 3.3.9 CÁLCULO DE POTÊNCIA TÉRMICA

A potência térmica pode ser calculada conforme a equação 61, levando-se em consideração a vazão mássica máxima de biomassa informada pelo fabricante de 51 [kg/h].

$$P_t = C \cdot PCI^t = 229,36 \text{ [kW]} \quad (61)$$

Onde:

$C$  = Consumo de combustível [kg/s]

$PCI^t$  = Poder calorífico inferior do combustível

### 3.3.10 CÁLCULO DA GERAÇÃO ESPECÍFICA

A geração específica é a quantidade total de vapor gerada na caldeira por kg de combustível queimado. Reescrevendo a equação 48, se obtém a equação 62 que mostra o cálculo da geração específica de vapor saturado.

$$\frac{\dot{m}_{vsat}}{C} = \frac{PCI^t - (\alpha_{ge} - h_{ge} \cdot h_{af}^0) - \sum_{i=3}^5 Q_i}{(h_{vsat} - h_{aa})} \quad (62)$$

Onde:

$h_{g,e}$  = Entalpia dos gases de escape, calculada a partir do coeficiente de excesso de ar e da temperatura dos gases [kJ/kg]

$\alpha_{ge}$  = Volume de gases de escape

$h_{a,f}^0$  = Entalpia do volume de ar teoricamente necessário para a combustão de 1 kg de combustível

$Q_d^t$  = Energia que entra no volume de controle configurado pela caldeira, no caso do equipamento avaliado é o  $PCI^t$  [kJ/kg]

$Q$  = Perdas

$\dot{m}_{vsat}$  = Vazão de vapor saturado [hg/s]

$h_{aa}$  = Entalpia da água de alimentação [kJ/kg]

$h_{vsat}$  = Entalpia do vapor saturado [kJ/kg]

## 3.4 DESCRIÇÃO DOS EQUIPAMENTOS E DA INSTRUMENTAÇÃO

### 3.4.1 EQUIPAMENTOS ANEXOS À CALDEIRA

A caldeira conta com alguns equipamentos acessórios que são essenciais para o funcionamento dos sistemas em regime permanente. Esses equipamentos são o alimentador de biomassa, o soprador de ar e a bomba de alimentação de água mostrados na Figura 62.

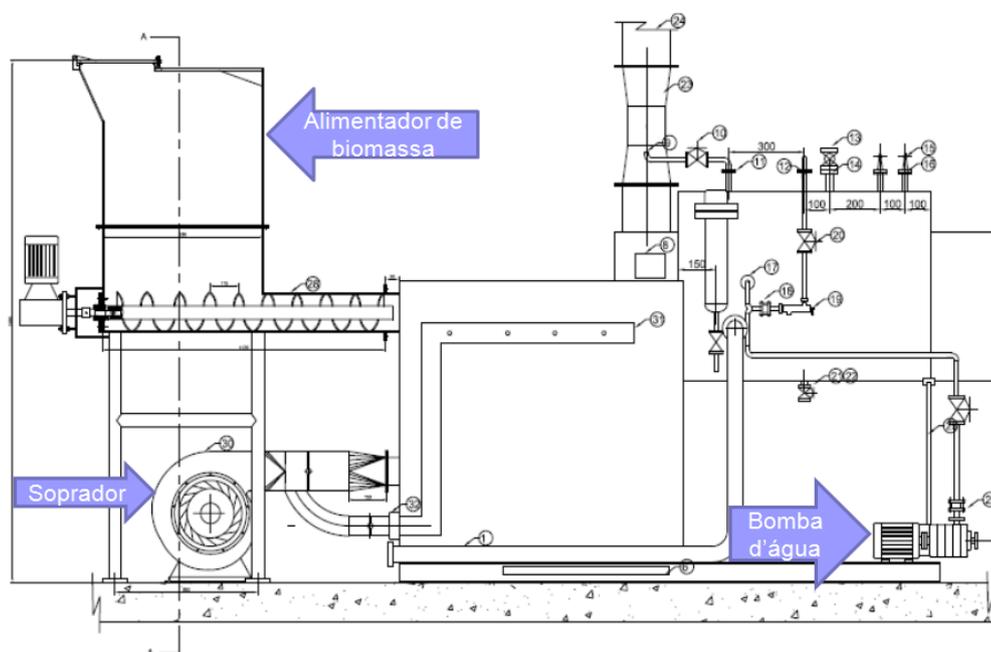


Figura 62: Equipamentos acessórios no esquema da caldeira

#### 3.4.1.1 Alimentador de biomassa para a fornalha

O alimentador de biomassa é composto por um silo para acumular biomassa, dotado de um motor acoplado a uma rosca sem fim que impulsiona a biomassa para o interior da câmara de combustão. A Figura 63 mostra o alimentador no esquema da caldeira.

As características técnicas do motor do alimentador são:

- Motor: 0,75CV, 220V, 1.680 rpm



Figura 63: Alimentador em destaque no esquema da caldeira.

### 3.4.1.2 Determinação da vazão mássica de biomassa

O teste do sistema de alimentação da caldeira foi realizado isoladamente para que possa além da verificação de suas condições de operação, determinar a vazão mássica do fornecimento de biomassa para a câmara de combustão e a granulometria dos cavacos de eucalipto a serem utilizadas durante os testes.

A vazão mássica de biomassa será determinada de acordo com os seguintes passos:

- Desconexão do alimentador da caldeira;
- Seleção de velocidade de giro do motor através do inversor no quadro elétrico (pelo menos três diferentes);
- Encher o silo do alimentador com biomassa;
- Marcar o tempo necessário para a biomassa preencher a rosca sem fim;
- Colocar um balde com o volume conhecido na saída da rosca sem fim;

- Marca o tempo gasto para encher o balde;
- Pesar a biomassa no balde;
- Para o motor do alimentador;
- Esvazia o balde e o recolocar vazio na saída da rosca sem fim;
- Repete a operação até encher novamente o balde e assim por diante até esvaziar o silo;
- Repete a operação 5 vezes para cada velocidade de giro do motor (3 frequências);
- Calcular a vazão mássica média para cada frequência [kg/h] dividindo-se a massa de biomassa transportada [kg] pelo tempo [h] gasto para o transporte total;
- Montar uma curva de vazão x frequência do motor;

### 3.4.1.3 Soprador de ar (primário e Secundário)

O soprador direciona o ar primário para o interior da câmara de combustão. O ar secundário também é fornecido pelo soprador e deriva da tubulação do ar primário. Os escoamentos do ar primário e secundário podem ser controlados através de dampers e medidores de vazão de ar instalados na linha. A Figura 64 mostra o soprador em vista frontal, enquanto que a Figura 65 mostra o soprador em vista traseira com os dutos de ar primário e secundário. As características técnicas do soprador são as seguintes:

- Motor: 2CV, 220V, 1.750 rpm



Figura 64: Vista frontal do soprador.

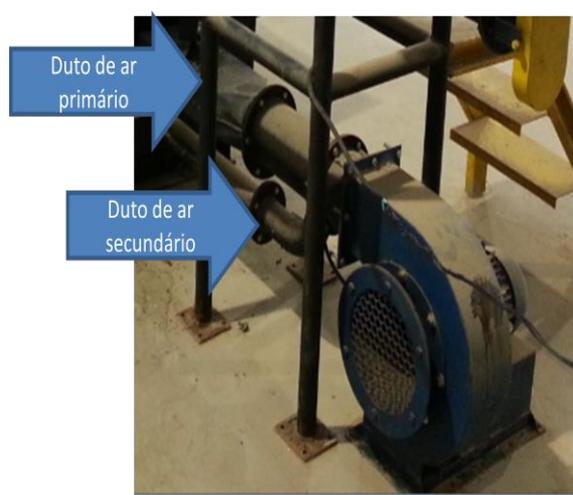


Figura 65: Vista traseira do soprador com os dutos de ar primário e secundário.

### 3.4.1.4 Bomba de injeção de água para a caldeira

A bomba impele a água de alimentação para o interior do tubulão. A bomba no esquema da caldeira pode ser vista na Figura 66 As características técnicas da bomba são as seguintes:

- Motor: 1,5CV, 220V, 1.715 rpm



Figura 66: Bomba d'água já com a conexão de água em destaque na caldeira.

### 3.4.1.5 Sistema acústico (SA)

O sistema acústico é composto de uma caixa acústica com um alto falante amplificado e um gerador de frequências.

O alto falante é um HD-SUB15-BLACK 15-Inch HD Series Front Firing Subwoofer mostrado na Figura 67. Este alto falante possui as seguintes características técnicas:

- 500 Watts Nominais RMS
- Resposta de frequência: 21Hz-200Hz



Figura 67: HD-SUB15-BLACK 15-Inch HD Series Front Firing Subwoofer.



Figura 68: Siglent SDG1025 25MHz 125 MSa/s Função sinal /Gerador de forma de onda arbitrária.

O gerador de frequências é um Siglent SDG1025 25MHz 125 MSa/s Signal Function/Arbitrary Waveform Generator que pode ser visto na Figura 68.

A conexão entre o SA e o duto de fornecimento de ar primário é mostrada na Figura 69.

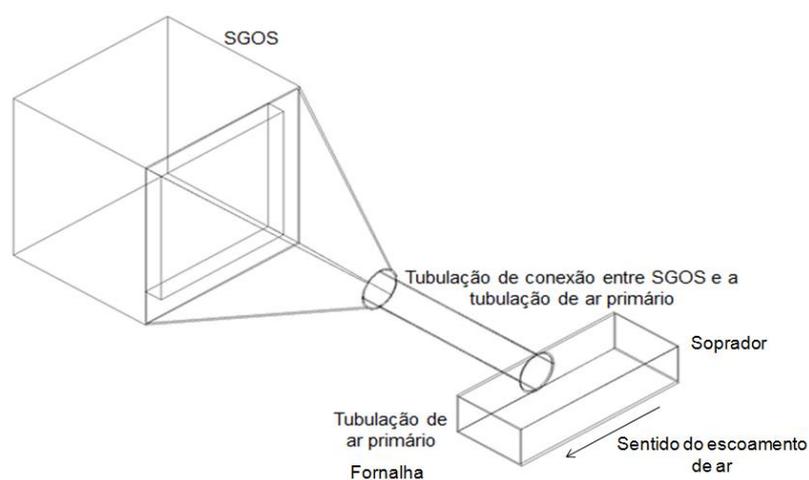


Figura 69: Esquema de conexão do SA e a tubulação de fornecimento de ar primário.

### 3.4.2 INSTRUMENTAÇÃO PARA REALIZAÇÃO DOS TESTES

São os instrumentos e sistemas necessários para as tomadas de medidas das grandezas que serão analisadas durante as experimentações práticas na caldeira.

#### 3.4.2.1 Sonda resfriada para coleta de amostras de gases e dados de temperatura

A sonda foi desenvolvida para utilização na caldeira dos laboratórios do NEST/IEMUNIFEI. Todas as informações sobre a sonda e seu desenvolvimento estão no item 3.5 deste terceiro capítulo.

### 3.4.2.2 TGA (Analisador termogravimétrico)

O laboratório do NEST encontra-se equipado com um analisador “TGA701 LECO” mostrado na Figura 70, algumas das características deste equipamento são:

- Determinar a perda de peso, como a umidade total, cinzas, teor de voláteis, ou perda por ignição em várias amostras de materiais orgânicos, inorgânicos e sintético;
- Três ambientes selecionáveis: N<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, ou ar;
- Trabalha com temperatura até 1000 ° C;
- De 0,5 até 5 gr do tamanho da amostra;

O TGA701 LECO é programável e pode seguir várias normas, entre elas a ASTM D7582.



Figura 70: Analisador termogravimétrico (TGA701 LECO).

### 3.4.2.3 Equipamento para análise elementar

Para determinar a composição química do eucalipto queimado na caldeira, foi utilizado um analisador elementar “PerkinElmer 2400 Series II CHNS/O” disponível no laboratório do Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST) da Universidade Federal de Itajubá, mostrado na Figura 71. Este analisador permite determinar a porcentagem em peso de carbono, hidrogênio, nitrogênio, enxofre e oxigênio na amostra de biomassa, e foi validado de acordo com a norma ASTM D5291—02.

A amostra a ser analisada neste equipamento deve ter massa entre 2 e 3 [mg].

O analisador é baseado nos métodos de Pregal e Dumas, amostras são queimadas em um ambiente de oxigênio puro. Além das determinações de carbono, hidrogênio e nitrogênio, pode-se adquirir um kit acessório para a determinação da concentração de  $O_2$ . Como no caso do analisador do NEST esse kit não está disponível, a concentração de  $O_2$  é feita por diferença de concentrações.



Figura 71: Analisador elementar (Perkin Elmer 2400 Series II CHNS/O).

#### 3.4.2.4 Analisador de gases portátil

A UNIFEI possui um analisador de gases portátil LANCOM III mostrado na Figura 72, que é um equipamento com sonda projetada para temperaturas de até  $1400^{\circ}C$ , capaz de medir a concentração de diferentes gases no interior da fornalha. Foi utilizado para medir a concentração de gases na chaminé. Entre os gases que este equipamento analisa tem-se:  $O_2$ ,  $CO$ ,  $NO$ ,  $NO_2$ ,  $H_2S$ ,  $CO_2$ ,  $SO_2$  e  $C_xH_y$ .



Figura 72: Analisador portátil de gases LANCOM III.

### 3.4.2.5 Analisador de gases Siemens

A composição do gás de combustão produzido no leito de combustão da câmara de combustão é obtida utilizando analisadores contínuos da marca SIEMENS modelo ULTRAMAT 23 para análise de oxigênio, monóxido de carbono e metano e CALOMAT 6 para análise de hidrogênio. A incerteza dos analisadores é de  $\pm 0,1\%$  para o Ultramat 23 e Calomat 6. Esses equipamentos são calibrados na fábrica, sendo necessária apenas uma calibração anual e podem ser vistos na Figura 73.



Figura 73: Analisadores contínuos de gases.

### 3.4.2.6 Termopares

Nos experimentos na caldeira foram utilizados dois tipos de termopares em função das faixas de temperatura a serem medidas. São eles:

- Tipo K (Cromel / Alumel) O termopar tipo K é um termopar de uso genérico. Tem um baixo custo e, devido ao fato de ser muito utilizado, está disponível acoplado à variadas sondas. Cobrem temperaturas entre  $-200$  e  $1200$  °C, tendo uma sensibilidade de aproximadamente  $41$  [ $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ]. São mais adequados para as medições de temperatura fora da região do leito da câmara de combustão. Foram utilizados para as tomadas de todas as medidas de temperatura com exceção das tomadas no leito de combustão da câmara de combustão, onde se utilizou um termopar tipo B.

- Tipo B (Platina / Ródio-Platina) Adequado para medição de temperaturas até 1800 °C. Este tipo de termopar gera a mesma tensão na saída a 0 e a 42 °C, o que impede a sua utilização abaixo dos 50 °C. São mais adequados para as medições de temperatura na região da câmara de combustão, onde segundo as modelagens matemáticas, as temperaturas podem chegar até 1.450 °C. Serão utilizados nas medições de temperatura no leito através de sonda de inox AISI 304. Foi desenhado um termopar tipo B com ponteira cerâmica envolta em INOX ISI 304 para a realização das medidas de temperatura no leito de combustão na câmara de combustão da caldeira.

### 3.4.2.7 Medidores de vazão (ar e água)

Para medir a vazão de água de abastecimento da caldeira foi usado um medidor de vazão analógico do tipo hidrômetro Actaris classe B com capacidade de medir 1,5 [m<sup>3</sup>/h] nominalmente que pode ser visto na Figura 74.



Figura 74: Medidor de vazão Actaris classe B.

A vazão máxima calculada para  $\alpha=1,3$  é de 301,47 [Nm<sup>3</sup>/h]. Para medir estas vazões de ar primário e secundário inicialmente pretendia-se utilizar medidores de vazão de ar do tipo rotâmetro da marca Blaster modelo BL 14000 com capacidade de medir até 400 [Nm<sup>3</sup>/h], que podem ser vistos na Figura 75.



Figura 75: Medidores de vazão de ar Blaster.  
(Blaster).

### 3.4.2.8 Medidor de temperatura para paredes externas da caldeira

Termômetro infravermelho para medir a temperatura em diferentes pontos da superfície externa caldeira, modelo MT-320 da Minipa, conforme mostrado na Figura 76.

Destinado às aplicações que requerem medidas de temperatura sem contato, como em locais de difícil acesso, pontos energizados, com altas temperaturas, em peças ou partes em movimento. Apresenta resposta rápida, de forma prática e conveniente, com auxílio da mira laser para identificação do local de medida. (Minipa).



Figura 76: Termômetro modelo MT-320 da Minipa.  
(Minipa).

### 3.4.2.9 Sistema de aquisição de dados

A aquisição de dados foi feita pelo Sistema Supervisório ContempView Full de 32 Canais da Contemp.

Trata-se de software para registro das variáveis de processos industriais, permitindo visualização de todos os canais ao mesmo tempo. Possui também uma tela de habilitação de equipamentos, facilitando a implementação de novos canais.

### 3.5 DESENVOLVIMENTO DA SONDA DE SUÇÃO RESFRIADA

A sonda foi desenvolvida para ter a capacidade de tomar amostras de gases no interior da câmara de combustão e principalmente no nível do leito. Ela é resfriada a água para ter a capacidade de deter as reações das amostras coletadas aumentando assim a assertividade dos resultados, uma vez que se a sonda permitir que as amostras coletadas no interior da câmara de combustão percorram seu interior ainda em um ambiente nas mesmas condições de temperatura do interior da câmara de combustão, seus componentes continuarão a reagir e ao acessarem o analisador de gases a composição será diferente da que estava no interior da câmara de combustão no momento da coleta da amostra. A Figura 77 mostra a estrutura da sonda com a entrada e saída de água do circuito de refrigeração e a saída da amostra de gás.

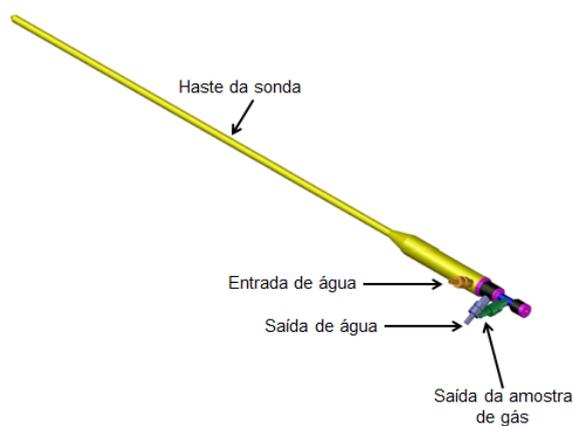


Figura 77: Esquema da sonda resfriada e seus pontos de conexão.

A Figura 78 mostra em detalhes as conexões da sonda com o circuito de resfriamento de água e com a saída para a bomba de sucção de amostragem de gás.

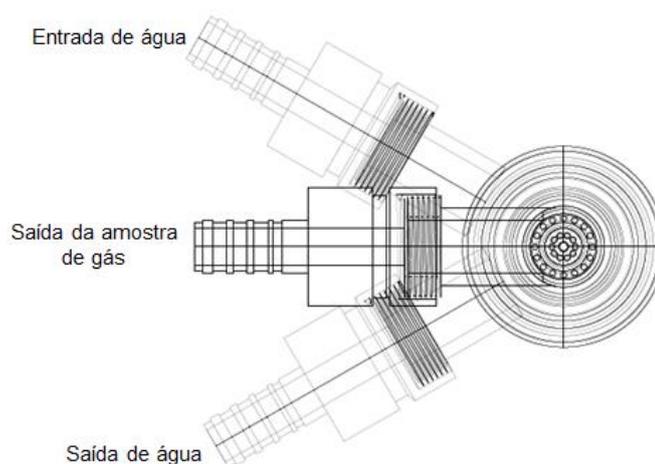


Figura 78: Detalhe das conexões dos circuitos da sonda.

A Figura 79 mostra os detalhes da base da sonda e suas conexões.

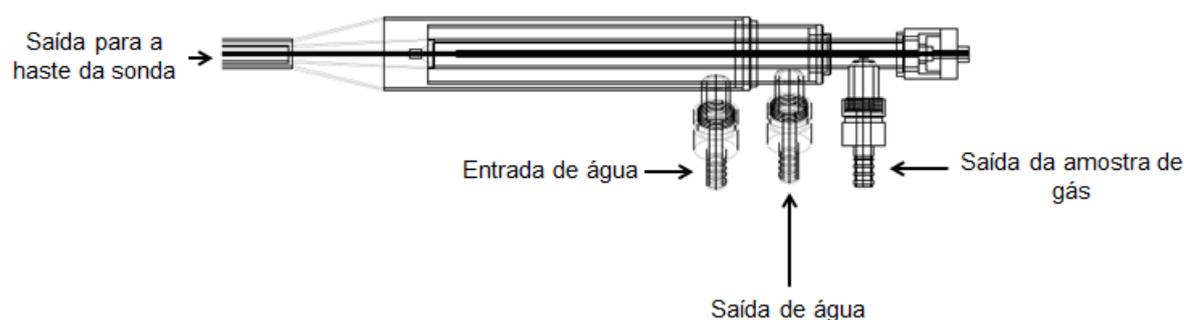


Figura 79: Detalhes da base da sonda e suas conexões.

### 3.5.1 Dimensões da haste da sonda

A grelha dista do ponto de acesso da sonda 0,105 [m] em seu arranjo original. Apesar da distância do ponto de acesso até o nível em que a grelha será utilizada para os testes ser de 0,7 [m], a sonda foi projetada para atender as necessidades de testes da caldeira em qualquer configuração. Além disso, existe um tubo no acesso superior da sonda na parte externa com 5 cm de comprimento que pode ser visto na Figura 80. Considerando este tubo, a haste da sonda deve ter 0,110 [m] de comprimento ( $L_{hs}$ ).

A Figura 81 mostra uma barra metálica introduzida no ponto de acesso superior da sonda pelo lado de dentro da câmara de combustão.

A sonda possibilitará a amostragem de gases no interior da câmara de combustão e principalmente no nível do leito e foi desenvolvida levando-se em conta o tamanho necessário da haste para acessar o leito de combustão, uma vez que o acesso é pela parte de cima da câmara de combustão, como mostrado na Figura 80.



Figura 80: Ponto de inserção da sonda na parte superior da câmara de combustão.



Figura 81: Ponto de inserção da sonda na parte interna superior da câmara de combustão.

O acesso no topo da fornalha tem um diâmetro interno ( $d_{ia}$ ) de 0,016 [m]. Este diâmetro dificulta o projeto da sonda por impor um limite muito pequeno para as áreas de seção transversal de circulação de água. Uma opção para a melhora desta situação é a expansão do acesso, porém, esta seria limitada a um diâmetro interno do acesso de 0,021 [m], que é a distância entre os tubos de água que formam internamente as paredes da fornalha.

Os tubos da parede de água da fornalha e a distância entre eles no ponto de acesso visto pelo lado de dentro da fornalha podem ser vistos na Figura 82.



Figura 82: Distância entre os tubos de água na fornalha.

A haste da sonda é formada por três tubos concêntricos cujos diâmetros são mostrados na Tabela 16. Os tubos serão chamados a partir de agora pelo número que os indica na Tabela 16.

Tabela 16: Diâmetros dos tubos concêntricos da haste da sonda.

Número do tubo	Diâmetro comercial	De [mm]	Espessura [mm]	Di [mm]
1	3/8	17,15	1,65 (10S)	13,85
2	1/8	10,29	1,24 (10S)	7,81
3	1/16	2,04	0,23	1,58

Os tubos concêntricos são separados por anéis vazados que dão sustentação à estrutura da haste e permitem o fluxo de água. Um esquema dos tubos concêntricos na ponta da haste com os anéis vazados pode ser visto na Figura 83.

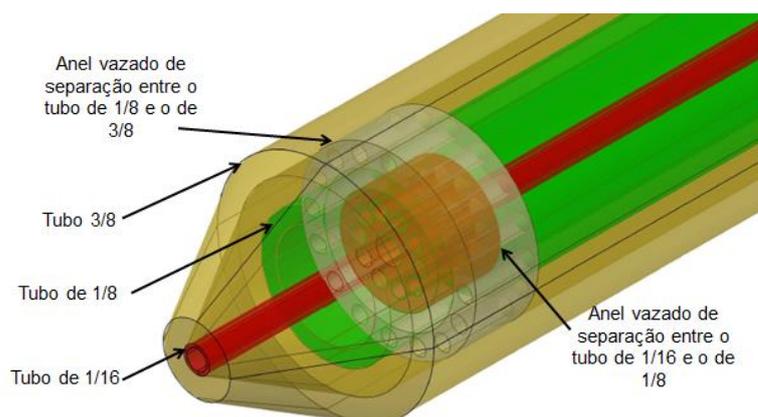


Figura 83: Esquema dos tubos concêntricos e os anéis vazados.

Como a haste da sonda é submetida a grandes variações de temperatura e esta sujeita a dilatações diferentes dos três tubos concêntricos, ela terá ao longo de sua estrutura quatro anéis de separação para a fixação dos tubos. Estes anéis ao longo da estrutura da haste da sonda podem ser vistos na Figura 84.



Figura 84: Anéis ao longo da estrutura da haste.

### 3.5.2 CÁLCULOS DA SONDA

Faz-se necessário que se considere algumas condições iniciais para a realização dos cálculos fluidodinâmicos e térmicos na haste da sonda.

Foram realizados os cálculos na haste da sonda, uma vez que para o restante do circuito somente será possível conhecer os comprimentos de mangueiras e seus diâmetros depois de montadas as bancadas de testes. Após a obtenção destas informações, poderá ser calculada a perda de carga no restante do circuito e finalmente se determinar a potência da bomba que fará circular a água no circuito de refrigeração da sonda.

Os diâmetros internos e externos dos tubos concêntricos podem ser vistos na Tabela 17.

Tabela 17: Diâmetros internos e externos dos tubos concêntricos.

Tubo	Diâmetro	[mm]	[m]
1	$D_{e1}$	17,15	0,01715
1	$D_{i1}$	13,85	0,01385
2	$D_{e2}$	10,29	0,01029
2	$D_{i2}$	7,81	0,00781
3	$D_{e3}$	2,04	0,00204
3	$D_{i3}$	1,58	0,00158

O volume entre o tubo de 3/8 e o de 1/8 de volume de haste 1 será chamado a partir de agora ( $V_{h1}$ ), o volume entre o tubo de 1/8 e o de 1/16 de volume de haste 2 ( $V_{h2}$ ) e o volume no interior do tubo de 1/16 de volume de haste 3 ( $V_{h3}$ ).

O ponto de partida para os cálculos fluidodinâmicos da haste da sonda será a escolha da velocidade de circulação da água ( $u_{ma1}$ ) em  $V_{h1}$ . Como a área da seção transversal anular de  $V_{h1}$  é menor que a seção de  $V_{h2}$ , as velocidades médias serão diferentes e  $u_{ma2}$  que é a velocidade média do escoamento em  $V_{h2}$  é menor que  $u_{ma1}$ . Então a velocidade média de escoamento da água em  $V_{h2}$  ( $u_{m2}$ ) será a velocidade média menor do circuito e, portanto limitante.

A vazão mássica de água é a mesma nos dois volumes, ou seja,  $\dot{m}_1$  (vazão mássica de água em  $V_{h1}$ ) =  $\dot{m}_2$  (vazão mássica de água em  $V_{h2}$ ).

A água entrará fria no  $V_{h1}$  no sentido da base para a ponta da haste onde retorna em  $V_{h2}$  da ponta para a base da sonda e sai quente após trocar calor durante o trajeto.

O valor de  $u_{ma1}$  será de 5 [m/s], pois segundo Blevins (1999) a amostragem apresenta tão boa acuracidade quanto velocidades maiores e esta é a velocidade recomendada pela ASME para escoamento em pirômetros de sucção.

No  $V_{h3}$  existira um escoamento de gases de combustão no sentido da ponta da haste para a base da sonda. Os gases entrarão quentes e sairão frios após a troca de calor no trajeto. A velocidade média do escoamento de gases de combustão também será de 5 [m/s].

Como a camada limite é extremamente pequena, com cerca de  $3,56 \cdot 10^{-3}$  [m], será considerado escoamento plenamente desenvolvido turbulento em toda a extensão da haste ( $Re_D = 0,18 \cdot 10^6$ ) para  $V_{h1}$ .

Cada um dos três volumes será calculado independentemente, tomando-se por referência dados de literatura sobre os coeficientes de transferência de calor convectivo e por radiação em fornalhas, além de valores do fluxo de calor convectivo e radiante em fornalhas.

As espessuras em todos os tubos são finas e, portanto podem ser consideradas desprezíveis para os cálculos de fluxo de calor condutivo.

O método de cálculo, segundo Incropera (2012) é o da temperatura de parede constante, onde existe a variação do fluxo de calor ao longo da superfície.

A temperatura do leito pode atingir 1300°C segundo modelagens realizadas anteriormente para a combustão de biomassa na caldeira como base para a dissertação de mestrado do mestrando Juan Carlos Guerreiro.

A temperatura dos gases na saída da câmara de combustão informada pelo fabricante é de 800°C, mas durante os testes realizados na caldeira durante o treinamento ministrado pela AGTherm e setembro de 2015 a temperatura medida nesta região foi de cerca de 700°C e estas serão as temperaturas consideradas nos cálculos respectivamente para temperatura da superfície radiante no leito ( $T_{sr}=1300^\circ\text{C}$ ) e nos gases de combustão na saída da câmara de combustão ( $T_{gescc}=800^\circ\text{C}$ ), conforme informação do fabricante.

A temperatura de saída em  $V_{h2}$  que deve ser a mesma temperatura de saída em  $V_{h3}$  será ( $T_{sai2} = T_{sai3} = 250^\circ$ ). Esta é temperatura de entrada da amostra de gás no sistema de resfriamento e coleta de particulados, usado por Oliveira, (2014) em sua bancada de teste para amostragem de gases.

A emissividade ( $\epsilon$ ) será considerada 0,5 por ser um valor médio de emissividade para chamas de sólidos em grelha segundo Bizzo (2003).

### 3.5.3 Cálculos fluidodinâmicos na haste da sonda

Os cálculos fluidodinâmicos na haste serão realizados inicialmente considerando a sonda fora da fornalha, ou seja, em temperatura ambiente (20°C).

O diâmetro considerado nos cálculos será o diâmetro hidráulico, que é uma relação entre os diâmetros externo e interno que cercam o volume em estudo. Esse diâmetro será  $D_{H1}$  para  $V_{h1}$  e  $D_{H2}$  para  $V_{h2}$ . O cálculo de  $D_{H1}$  é mostrado na equação 63 e de  $D_{H2}$  na equação 64.

$$D_{H1} = D_{i1} - D_{e2} = 0,00356[m] \quad (63)$$

$$D_{H2} = D_{i2} - D_{e3} = 0,00577[m] \quad (64)$$

Onde:

$D_{i1}$  = Diâmetro interno do tubo 1 [m]

$D_{e2}$  = Diâmetro externo do tubo 2 [m]

$D_{i2}$  = Diâmetro interno do tubo 2 [m]

$D_{e3}$  = Diâmetro externo do tubo 3 [m]

Cálculos para  $V_{h1}$ :

As propriedades da água a 20°C são:

$$\rho_{a1} = \rho_{a2} = 998,4 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$\mu_{a1} = \mu_{a2} = 1.007,4 \cdot 10^{-6} \text{ [N.s/m}^2\text{]}$$

Considerando a velocidade média do escoamento da água em  $V_{h1}$  ( $u_{ma1} = 5[m/s]$ ), a equação 63 mostra o cálculo da vazão mássica de água em  $V_{h1}$  que é a mesma em  $V_{h2}$ .

$$\dot{m}_{a1} = \dot{m}_{a2} = \rho \cdot u_{ma1} \frac{\pi \cdot D_{H1}^2}{4} = 0,049689 \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right] \quad (65)$$

Onde:

$\dot{m}_{a1}$  = Vazão mássica de água em  $V_{h1}$  [kg/s]

$\dot{m}_{a2}$  = Vazão mássica de água em  $V_{h2}$  [kg/s]

$u_{ma1}$  = Velocidade média do escoamento de água em  $V_{h1}$  [m/s]

$D_{H1}$  = Diâmetro hidráulico do volume  $V_{h1}$  [m]

$\rho_{a1}$  = Densidade da água em  $V_{h1}$  [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]

Pode-se então calcular o Número de Reynolds para o volume  $V_{h1}$  de acordo com a equação 64 e conhecer o tipo de escoamento.

$$R_{eD1} = \frac{\rho_{a1} \cdot u_m \cdot D_{H1}}{\mu_{a1}} = 17.640,98 \quad (66)$$

Onde:

$R_{eD1}$  = Número de Reynolds para o escoamento em  $V_{h1}$

$\mu_{a1}$  = Viscosidade da água em  $V_{h1}$  [ $\text{N}\cdot\text{s}/\text{m}^2$ ]

Para este valor do Número de Reynolds, sabe-se que o escoamento em  $V_{h1}$  é turbulento perfeitamente desenvolvido.

O fator de atrito para o escoamento em  $V_{h1}$  ( $f_1$ ) pode ser calculado conforme a equação 67.

$$f_1 = 0,184 \cdot R_{eD1}^{-\frac{1}{5}} = 0,027419 \quad (67)$$

A perda de carga em  $V_{h1}$  é calculada como mostrado na equação 68.

$$\Delta P_1 = \frac{f_1 \cdot \rho_{a1} \cdot u_{ma1}^2}{2 \cdot D_{H1}} = 105.733,80 \text{ [Pa]} \quad (68)$$

Onde:

$\Delta P_1$  = Queda de pressão em  $V_{h1}$

A potência necessária para uma bomba vencer esta perda de carga em  $V_{h1}$  pode ser calculada conforme equação 69.

$$P_{b1} = \frac{\Delta P_1 \cdot \dot{m}_{a1}}{\rho_{a1}} = 5,26 \text{ [W]} \quad (69)$$

Onde:

$P_{b1}$  = Potência necessária para a bomba em  $V_{h1}$

Cálculos para  $V_{h2}$ :

Como a vazão mássica é a mesma em  $V_{h1}$  e  $V_{h2}$ , pode-se calcular a velocidade média em  $V_{h2}$  ( $u_{am2}$ ) como mostrado na equação 70.

$$u_{am2} = \frac{\dot{m}_{a1}}{\rho_{a2} \cdot \frac{\pi \cdot D_{H2}^2}{4}} = 1,9 \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (70)$$

Pode-se então calcular o Número de Reynolds para o volume  $V_{h2}$  de acordo com a equação 71 e conhecer o tipo de escoamento.

$$R_{eD2} = \frac{\rho_{a2} \cdot u_{am2} \cdot D_{H2}}{\mu_{a2}} = 10.884,21 \quad (71)$$

Onde:

$R_{eD2}$  = Número de Reynolds para o escoamento em  $V_{h2}$

$\mu_{a1}$  = Viscosidade da água em  $V_{h2}$  [N.s/m<sup>2</sup>]

Para este valor do Número de Reynolds, sabe-se que o escoamento em  $V_{h2}$  também é turbulento e perfeitamente desenvolvido.

O fator de atrito para o escoamento em  $V_{h2}$  ( $f_2$ ) pode ser calculado conforme a equação 72.

$$f_2 = 0,184 \cdot R_{eD2}^{-\frac{1}{5}} = 0,030938 \quad (72)$$

A perda de carga em  $V_{h2}$  é calculada como mostrado na equação 73.

$$\Delta P_2 = \frac{f_2 \cdot \rho_{a2} \cdot u_{ma2}^2}{2 \cdot D_{H2}} = 10.666,36 \text{ [Pa]} \quad (73)$$

Onde:

$\Delta P_2$  = Queda de pressão em  $V_{h2}$  [Pa]

A potência necessária para uma bomba vencer esta perda de carga em  $V_{h2}$  pode ser calculada conforme equação 74.

$$P_{b2} = \frac{\Delta P_2 \cdot \dot{m}_{a2}}{\rho_{a2}} = 0,53 \text{ [W]} \quad (74)$$

Onde:

$P_{b2}$  = Potência necessária para a bomba em  $V_{h2}$

Cálculos para  $V_{h3}$ :

O fluido agora é o gás de combustão. Os cálculos para o volume  $V_{h3}$  dependem da composição do gás que será medida nos experimentos.

### 3.5.4 Cálculos de Transferência de calor na haste da sonda

A sonda trabalhará inserida na câmara de combustão. Foram considerados para cálculos que a área da sonda estará exposta ao ambiente radiante somente do leito, uma vez que ela estará no nível acima das paredes refratárias e acessará o leito verticalmente.

O fluxo de calor transferido a sonda por radiação pode ser calculado pela equação 75

$$q''_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_{\text{sr}}^4 - T_{\text{gescc}}^4) = 148,16 \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \quad (75)$$

Onde:

$q''_{\text{rad}}$  = Fluxo de calor radiante do leito

$\varepsilon$  = Emissividade

$\sigma$  = Constante de Stefan Boltzman ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ [W/m}^2\text{K}^4\text{]})$

$T_{\text{sr}}$  = Temperatura no leito

$T_{\text{gescc}}$  = Temperatura dos gases de combustão na saída da câmara de combustão

Precisa-se conhecer o fluxo de calor convectivo que depende das concentrações no gás de combustão e como no caso dos cálculos fluidodinâmicos somente poderá ser realizado após as medidas das concentrações reais de gases de combustão na saída da câmara de combustão.

O fluxo de calor por condução na saída da câmara de combustão pode ser calculado pela equação 76.

$$q''_{\text{convsc}} = h_{\text{ge}} \cdot (T_{\text{ge}} - T_{\text{s1}}) \left[ \frac{\text{kW}}{\text{m}^2} \right] \quad (76)$$

Onde:

$q''_{\text{convsc}}$  = Fluxo de calor convectivo na saída da câmara de combustão

$T_{\text{gesc}}$  = Temperatura dos gases de combustão na saída da câmara de combustão

$T_{\text{si}}$  = Temperatura da superfície do tubo 1

$h_{\text{ge}}$  = Coeficiente de convecção

Com isso pode-se calcular a temperatura de saída da água ao final de  $V_{\text{h1}}$  da haste da sonda através do cálculo da transferência de calor por convecção total em  $V_{\text{h1}}$  através da equação 77.

$$q_{\text{conv1}} = \dot{m}_{\text{a1}} \cdot c_{\text{pa1}} \cdot (T_{\text{ae1}} - T_{\text{as1}}) [\text{W}] \quad (77)$$

Onde:

$q_{\text{conv1}}$  = Transferência de calor por convecção total em  $V_{\text{h1}}$

$c_{\text{pa1}}$  = Calor específico a pressão constante da água em  $V_{\text{h1}}$

$T_{\text{ae1}}$  = Temperatura de entrada da água em  $V_{\text{h1}}$

$T_{\text{as1}}$  = Temperatura de saída da água de  $V_{\text{h1}}$

Considerando a temperatura de superfície do tubo 1 constante, pode-se ainda calcular a transferência de calor por convecção total como mostrado na equação 78.

$$q_{\text{conv1}} = \bar{h}_1 \cdot A_s \cdot \Delta T_{\text{m1}} [\text{W}] \quad (78)$$

Onde:

$q_{\text{conv1}}$  = Transferência de calor por convecção total em  $V_{\text{h1}}$

$\bar{h}_1$  = Valor médio do coeficiente de convecção da entrada até x

$\Delta T_{\text{m1}}$  = Média das diferenças de temperatura ao longo de x

Pode se calcular  $\Delta T_{ml}$  como mostrado na equação 79.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_{as1} - \Delta T_{ae1}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{as1}}{\Delta T_{ae1}} \right)} \text{ [}^\circ\text{C ou K]} \quad (79)$$

O número de Nusselt pode ser calculado como mostrado na equação 80

$$Nu_D = \frac{\frac{f_1}{8} \cdot (Re_D - 1000) \cdot Pr}{1 + 12,7 \cdot \left( \frac{f_1}{8} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left( Pr^{\frac{2}{3}} - 1 \right)} \quad (80)$$

Onde:

$Nu_D$  = Numero de Nusselt

Pr = Número de Prandtl

Para se conhecer as relações térmicas em Vh2 e Vh3 usam-se as mesmas equações descritas. Além disso, é necessária a composição do gás de combustão que será o fluido do escoamento em V<sub>h3</sub>.

### 3.6 DESCRIÇÃO DOS ARRANJOS DE TESTE

No arranjo original da caldeira a grelha fica no fundo da câmara de combustão e por isso o equipamento apresenta o problema de não ter o fornecimento de ar primário por baixo da grelha. A solução foi colocar a grelha no nível logo acima da entrada de ar primário, garantindo assim o fornecimento do mesmo por baixo da grelha. A Figura 85 mostra a câmara de combustão da caldeira em corte longitudinal vertical onde podem ser vistos os pontos de entrada de ar primário e secundário além do nível original de posicionamento da grelha.

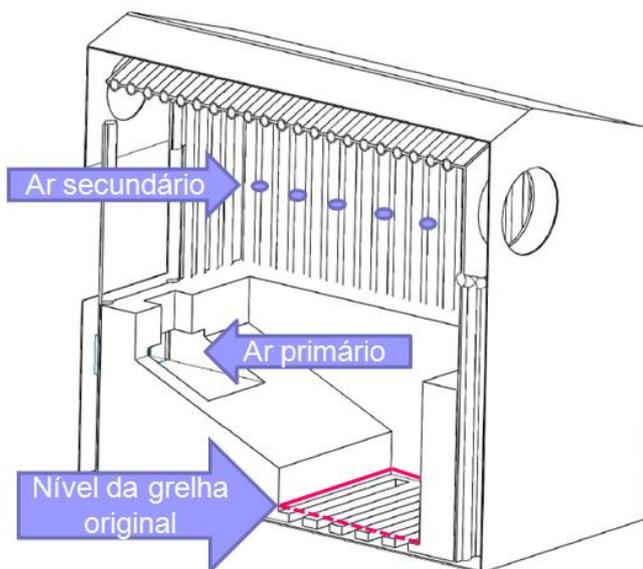


Figura 85: Esquema da câmara de combustão em corte vertical com nível original de grelha e entradas de ar.

### 3.6.1 ARRANJO 1: ETAPA 1 DE TESTES

No arranjo1, a grelha foi posicionada conforme indicado pela seta “Nível da grelha Arranjos 1 e 2” na Figura 86 Este arranjo deve permitir o fornecimento de ar primário por baixo da grelha, possibilitando a realização dos testes da etapa 1.

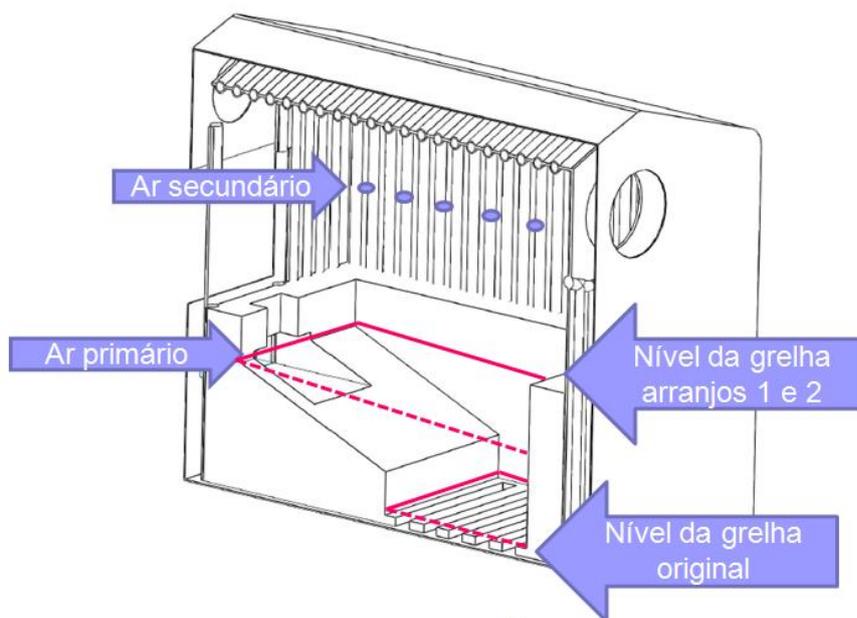


Figura 86: Esquema da câmara de combustão em corte vertical com níveis de grelha e entradas de ar usados no arranjo 1.

### 3.6.2 ARRANJO 2: ETAPA 2 DE TESTES

O arranjo 2 também deve permitir o fornecimento de ar primário por baixo da grelha, que ficará posicionada conforme indicado pela seta “Nível da grelha Arranjos 1 e 2” na Figura 87. Além disso, será instalada uma caixa acústica composta por um gerador de ondas sonoras e um gerador de frequências. Estes equipamentos estão descritos no item 3.4.1.5 deste terceiro capítulo. Os testes realizados sob este arranjo fornecerão dados que possibilitarão a comparação da utilização do equipamento com a entrada de ar primário por baixo da grelha e com auxílio acústico (Etapa 2 de testes) com o mesmo equipamento operando com a entrada de ar primário acessando a câmara de combustão por baixo da grelha, porém sem o auxílio acústico (etapa 1 de testes). A Figura 87 mostra a posição da grelha, as entradas de ar primário e secundário, além da posição da caixa acústica que gerará a intensificação acústica na entrada de ar primário na configuração da câmara de combustão da caldeira para a realização dos testes da etapa 2.

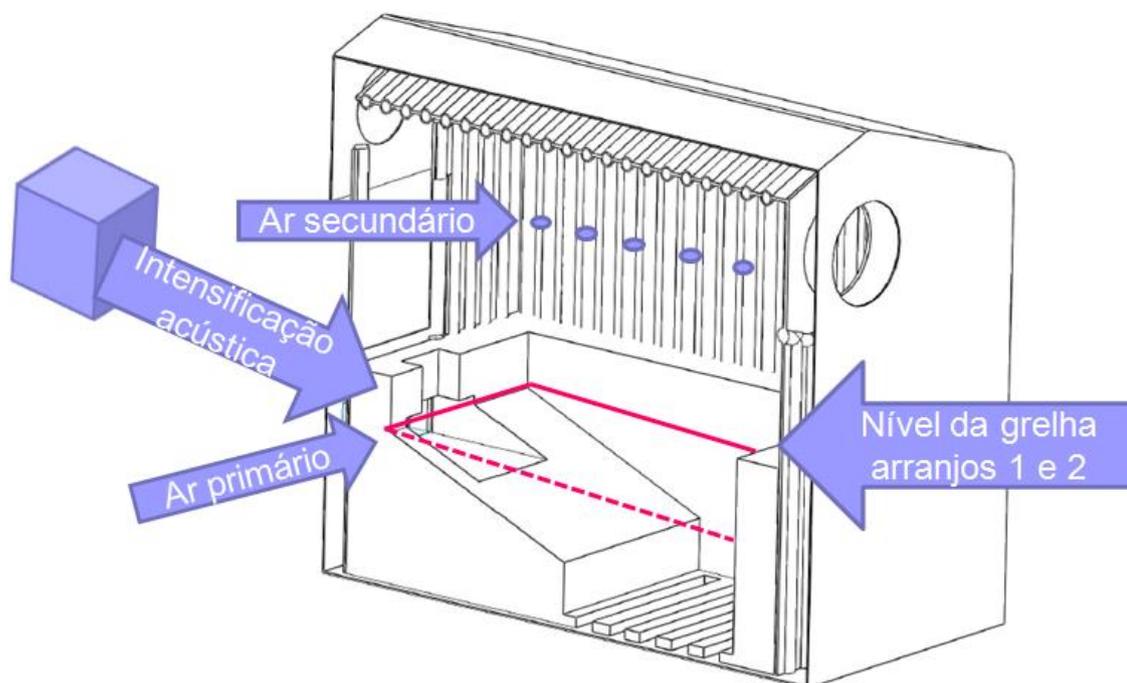


Figura 87: Esquema da câmara de combustão em corte vertical com nível da grelha para os arranjos 1 e 2, entradas de ar e sistema acústico usados na etapa 2 de testes.

## 3.7 PLANEJAMENTO DO PROCESSO EXPERIMENTAL

### 3.7.1 VARIÁVEIS DOS EXPERIMENTOS

Para a avaliação da caldeira em diversas condições de funcionamento, foi necessário equipá-la com transdutores que possibilitam a verificação de uma série de propriedades termodinâmicas. A Figura 88 mostra ao esquema da caldeira com a indicação dos pontos de tomada de medidas. Estes pontos são detalhados na Tabela 18.

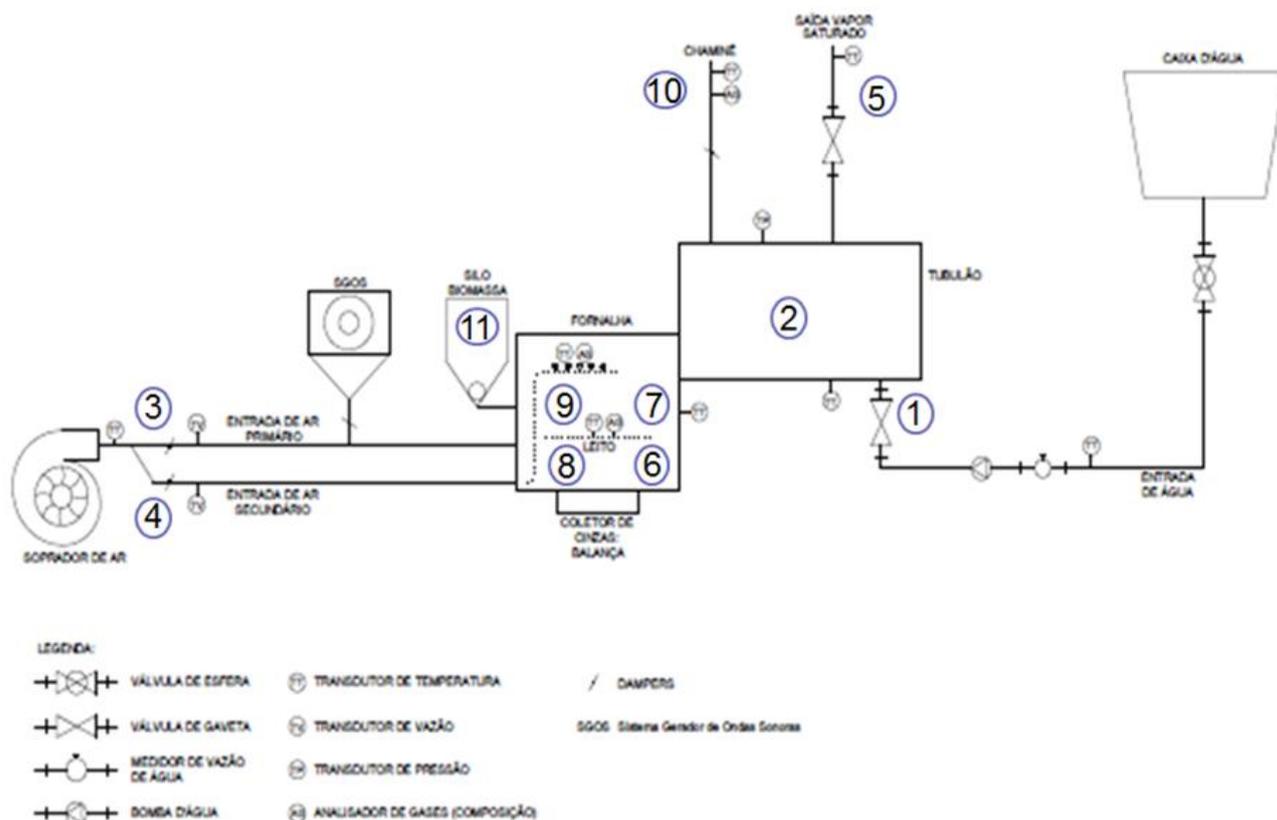


Figura 88: Esquema da caldeira com indicação dos pontos de tomada de medidas.

As magnitudes dessas propriedades são obtidas de forma direta para os fluidos (ar, água e vapor) presentes nessa instalação, sendo as mesmas: temperatura (T), pressão (P) e vazão (V). Os transdutores de temperatura são descritos na Tabela 19, os de pressão na Tabela 20 e os de vazão mássica na Tabela 21.

Tabela 18: Detalhamento dos pontos de tomada de medidas.

<b>Ponto Indicado</b>	<b>Descrição do ponto</b>
1	Entrada de água na caldeira
2	Parede do tubulão
3	Entrada de ar primário
4	Entrada de ar secundário
5	Saída de vapor (tiragem de vapor)
6	Parede da fornalha (nível do leito)
7	Parede da fornalha (nível da câmara de combustão)
8	Interior da fornalha (nível do leito)
9	Interior da fornalha (nível da câmara de combustão)
10	Chaminé
11	Alimentação da biomassa

Tabela 19: Descrição dos transdutores de temperatura.

<b>Variável/Unidade</b>	<b>Descrição/Equipamento</b>
T1 [°C]	Temperatura da água na entrada da caldeira
T2 [°C]	Temperatura da parede externa do tubulão
T3 [°C]	Temperatura do ar na entrada de ar primário e secundário
T5 [°C]	Temperatura do vapor na saída da caldeira (tiragem de vapor)
T6 [°C]	Temperatura da parede da fornalha no nível do leito
T7 [°C]	Temperatura da parede da fornalha no nível da câmara de combustão
T8 [°C]	Temperatura dos gases de combustão da caldeira no nível do leito
T9 [°C]	Temperatura dos gases de combustão no nível da câmara de combustão
T10 [°C]	Temperatura dos gases de combustão na chaminé

Tabela 20: Descrição dos transdutores de pressão.

<b>Variável/Unidade</b>	<b>Descrição/Equipamento</b>
P2 [bar]	Pressão da água no interior do tubulão

Tabela 21: Descrição dos transdutores de vazão.

Variável/Unidade	Descrição/Equipamento
M1 [kg/h]	Vazão de água fria na entrada do tubulão
M3 [m <sup>3</sup> /h]	Vazão de ar primário na entrada da fornalha
M4 [m <sup>3</sup> /h]	Vazão de ar secundário na entrada da fornalha

### 3.7.2 TRATAMENTO DAS VARIÁVEIS DO EXPERIMENTO

Para o tratamento das variáveis, as mesmas são agrupadas segundo os critérios mostrados na Tabela 22.

Tabela 22: Classificação das variáveis.

Tipo de Variável	Características
Avaliação	Permitem avaliar a qualidade do processo em estudo
Manipuladas	Sobre as quais se podem atuar
Seguimento	Sobre as quais não se pode atuar, seu valor numérico é calculado em função de outras variáveis ou medido através de transdutores.
Controle	Permitem a verificação da estabilidade operacional do experimento

Algumas das variáveis manipuladas são descritas na Tabela 23

Tabela 23: Variáveis manipuladas.

Variável/Unidade	Descrição
$\dot{m}_{\text{bio}}$ $\left[\frac{\text{kg}}{\text{h}}\right]$	Vazão mássica de biomassa na entrada da fornalha
$\dot{m}_{\text{ar } 1}$ [m <sup>3</sup> /h]	Vazão volumétrica de ar primário na entrada da fornalha
$\dot{m}_{\text{ar } 2}$ [m <sup>3</sup> /h]	Vazão volumétrica de ar secundário na entrada da fornalha

Algumas das variáveis de seguimento são descritas na Tabela 24

Tabela 24: Variáveis de seguimento.

Grandeza/Unidade	Descrição
$T_{acald}$ [°C]	Temperatura da água quente na caldeira
$T_{geleito}$ [°C]	Temperatura dos gases de combustão na da câmara de combustão – nível leito
$T_{gescc}$ [°C]	Temperatura dos gases de combustão na da câmara de combustão – nível câmara
$T_{gech}$ [°C]	Temperatura dos gases de combustão na chaminé
$T_v$ [°C]	Temperatura do vapor na saída de vapor

As variáveis de seguimento e as de controle são as que permitirão a realização das análises de desempenho e comparativas da caldeira e serão obtidas através da variação das variáveis manipuladas, que são aquelas a que se tem acesso para alterar os valores, como as citadas na Tabela 23.

### 3.7.3 PLANEJAMENTO DOS TESTES

O planejamento dos testes ocorreu de forma independente para cada etapa de teste realizada e foi descrito na sequência. Inicialmente pretendia-se realizar uma etapa anterior de teste para se definir experimentalmente os parâmetros operacionais a serem utilizados nos testes. A Figura 89 mostra um esquema da caldeira com seus circuitos de alimentação de água, ar e biomassa, além dos pontos dos transdutores que serão utilizados para as medições.

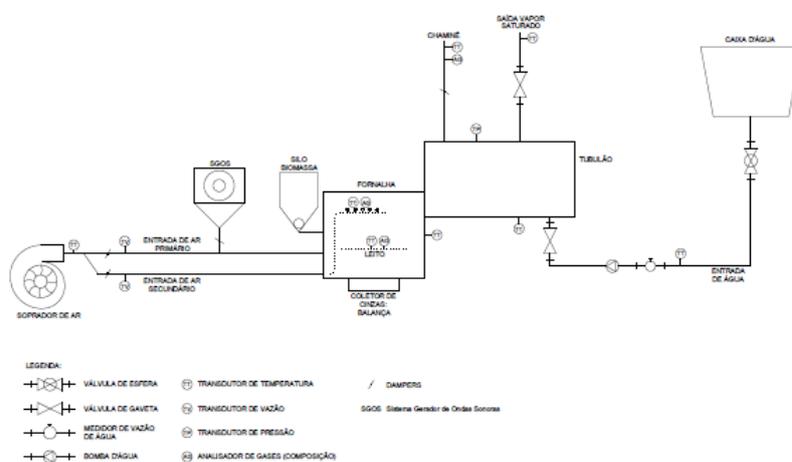


Figura 89: Esquema descritivo do funcionamento da caldeira

### **3.7.3.1 Procedimento de teste do alimentador de biomassa e determinação da vazão mássica de biomassa**

O teste do sistema de alimentação da caldeira seria realizado isoladamente para que pudesse além da verificação de suas condições de operação, determinar a vazão mássica do fornecimento de biomassa para a câmara de combustão e a granulometria dos cavacos de eucalipto a serem utilizadas durante os testes.

A vazão mássica de biomassa foi determinada de acordo com os seguintes passos:

- Desconexão do alimentador da caldeira;
- Seleção de velocidade de giro do motor através do inversor no quadro elétrico (pelo menos três diferentes);
- Enchimento do silo do alimentador com biomassa;
- Marcação do tempo necessário para a biomassa preencher a rosca sem fim;
- Colocação de um balde com o volume conhecido na saída da rosca sem fim;
- Marcação do tempo gasto para encher o balde;
- Pesagem da biomassa no balde;
- Paralisação do motor do alimentador;
- Esvaziamento do balde e o recolocar vazio na saída da rosca sem fim;
- Repetição da operação até encher novamente o balde e assim por diante até esvaziar o silo;
- Repetição da operação 5 vezes para cada velocidade de giro do motor (3 frequências);
- Cálculo da vazão mássica média para cada frequência [kg/h] dividindo-se a massa de biomassa transportada [kg] pelo tempo [h] gasto para o transporte total;
- Montar uma curva de vazão x frequência do motor;

### **3.7.4 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS NA CALDEIRA**

Para a operação da caldeira são previstas as seguintes etapas: a pré-partida, a partida, a operação propriamente dita e a parada. Serão observados os passos descritos nos Procedimentos Operacionais de Caldeiras (SENAI, 2004), além de se observar a norma NBR 13 para caldeiras e vasos de pressão. A caldeira foi operada de acordo com o treinamento para certificação de operador de caldeira descrito no item 1.4.

### 3.7.5 PROTOCOLOS INDIVIDUAIS DE TESTE PARA CADA ETAPA

#### 3.7.5.1 Protocolo de teste para a etapa 1

Pretendia-se nesta etapa determinar experimentalmente os parâmetros operacionais da caldeira. Para a realização dos testes na caldeira na etapa 1, a grelha foi posicionada conforme descrição do arranjo 1 no item 3.6.1 deste terceiro capítulo. Além disso, ocorreriam variações em variáveis manipuláveis com a subsequente análise da sua influência nos resultados dos experimentos. Seria avaliada nesta etapa a influência do excesso de ar e da relação de ar primário e secundário para a qualidade da combustão com reação às emissões de CO e NO<sub>x</sub> para a vazão mássica de biomassa máxima informada pelo fabricante da caldeira, pressão de operação, altura do leito e granulometria da biomassa. A Tabela 25 mostra as variáveis que serão alteradas nas configurações de ensaio para a etapa 1 e sua faixa de variação.

Tabela 25: Variáveis independentes e sua faixa de variação para a etapa 1.

Variável/Unidade	Descrição	Faixa de variação
$\dot{m}_{ar1} \left[ \frac{m^3}{h} \right]$	Vazão ar primário na entrada da fornalha	0 a 265,68
$\dot{m}_{ar2} \left[ \frac{m^3}{h} \right]$	Vazão mássica de ar secundário na entrada da fornalha	0 a 159,41

Seriam realizados nove experimentos para esta etapa. A Tabela 26 mostra o planejamento de testes para a etapa 1, sendo que os parâmetros variados são o excesso de ar ( $\alpha$ ) e a relação de ar primário e secundário (p/s).

Ao final dos testes desta etapa deveria-se ter avaliado os parâmetros excesso de ar e relação de ar primário e secundário para a determinação dos parâmetros de operação do equipamento tendo em vista a qualidade da combustão com relação às emissões de CO e NO<sub>x</sub>.

Tabela 26: Planejamento de testes para a etapa 1.

Número do teste	$\alpha$	Vazão total	Vazão de ar	Vazão de ar
		de ar	primário	secundário
		[Nm <sup>3</sup> /h]	[% do ar total]	[% do ar total]
1	1,1	224,81	100	0
2	1,1	224,81	60	40
3	1,1	224,81	40	60
4	1,2	245,24	100	0
5	1,2	245,24	60	40
6	1,2	245,24	40	60
7	1,3	265,68	100	0
8	1,3	265,68	60	40
9	1,3	265,68	40	60

### 3.7.5.2 Protocolo de teste para a etapa 2

Para a realização dos testes na caldeira na etapa 2, o nível da grelha deve corresponder à descrição do arranjo 2 no item 3.6.2 deste terceiro capítulo. A Tabela 27 mostra as variáveis que seriam variadas nas configurações de ensaio para o arranjo 2 e a faixa de sua variação.

Tabela 27: Variáveis independentes e sua faixa de variação para o arranjo 2.

Variável/Unidade	Descrição	Faixa de variação
f [Hz]	Frequência de oscilação do gerador de frequências	50, 100 e 200
Pr [Pa]	Pressão acústica do gerador de ondas sonoras	0 a 447,21

Seriam realizados também nove experimentos para esta etapa. A Tabela 28 mostra o planejamento de testes para esta etapa, sendo que os parâmetros variados são a frequência de oscilação do gerador de frequências (f) e a pressão acústica gerada no gerador de ondas sonoras (Pr).

Tabela 28: Planejamento de testes para a etapa 2.

<b>Número do teste</b>	<b>F [Hz]</b>	<b>Pr [Pa]</b>
1	50	256,90
2	50	363,32
3	50	447,21
4	100	256,90
5	100	363,32
6	100	447,21
7	200	256,90
8	200	363,32
9	200	447,21

Ao final dos testes desta etapa deve-se ter avaliado comparativamente a combustão com e sem a intensificação acústica com relação à geração específica de vapor ( $V_s$ ) ( $\text{kg}_{\text{vapor}} / \text{kg}_{\text{biomassa}}$ ), eficiência do equipamento ( $\eta$ ) e potência térmica ( $P_T$ ) do equipamento, calculados à partir dos dados da composição de gases na região do leito, na região da câmara de combustão acima do leito e na chaminé, além dos dados de mapas de temperatura e vazão de vapor.

## Capítulo 4

# PREPARAÇÃO DA CALDEIRA

Neste capítulo apresenta-se a preparação da caldeira, sua adaptação e instrumentação para que o equipamento estivesse apto para a realização dos testes.

## 4.1 CONEXÃO DA CALDEIRA À CAIXA D'ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA

A caldeira já foi descrita no item 3.1 e os equipamentos acessórios que a compõe foram descritos no item 3.4. Neste item será descrita a conexão da caixa d'água e do quadro elétrico, que possibilitaram a realização dos testes utilizados para a certificação como operador de caldeira do autor em setembro de 2015 conforme descrito no item 1.4.

A prefeitura do campus da UNIFEI cedeu uma caixa d'água de 2000 [L] de capacidade, a tubulação necessária para a conexão e fabricou a estrutura de sustentação da caixa. Os serviços de instalações foram realizados pelo próprio autor com auxílio de mão de obra contratada pelo autor. A caixa d'água, que pode ser vista na Figura 90, tem capacidade de armazenamento de 2000 [L] de água e está conectada com a entrada da bomba d'água na caldeira por tubulação metálica de  $\frac{3}{4}$ ".

A instalação do quadro elétrico foi realizada pela AGTherm, mesma empresa fabricante do equipamento e responsável pelo teste de certificação, também em setembro de 2015. O quadro, que pode ser visto na Figura 91, está conectado à rede de energia dos laboratórios do NEST/IEM/UNIFEI e tem circuitos de proteção e acionamento para o soprador, o motor da rosca sem fim do alimentador e a bomba d'água que alimenta a caldeira, além de alimentar o disjuntor externo que protege e aciona a bomba d'água do circuito da sonda resfriada.



Figura 90: Caldeira com a caixa d'água instalada.



Figura 91: Quadro de força instalado na caldeira.

## 4.2 ADAPTAÇÃO DA GRELHA AOS ARRANJOS DE TESTE

Conforme explicado no item 3.6, no arranjo original da caldeira a grelha se localizava abaixo do ponto de inserção de ar primário e do secundário, posicionada na base da câmara de combustão.

Assim a grelha precisou ser acomodada em suportes que foram calculados e dobrados para posicionar a grelha logo acima da entrada de ar primário na câmara de combustão. Este

posicionamento possibilitou que o ar primário fosse fornecido por baixo da grelha e que esta estivesse com a maior profundidade possível cercada pelo refratário.

O desenho referencial da grelha sem ainda a definição da chapa a ser utilizada e dos suportes da grelha para a câmara de combustão pode ser visto na Figura 92.

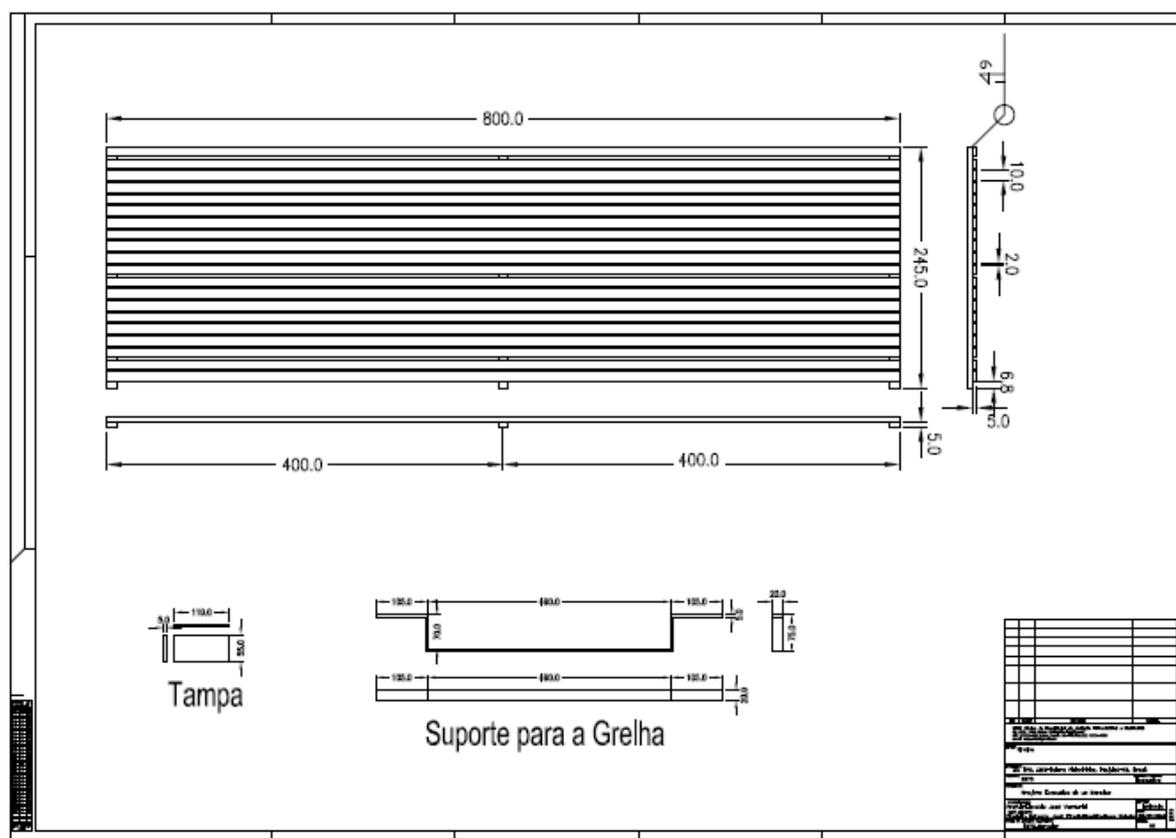


Figura 92: Desenho referencial da grelha e do suporte da grelha para a câmara de combustão.

A chapa da grelha foi pensada para poder operar com diversas biomassas, incluindo, lenha, cavacos e serragem. Para tal foi comprada uma chapa perfurada de inox AI 304 com 1 [mm] de espessura, com furos de 2 [mm] de diâmetro e distância entre furos de 3[mm], com 44% de sua área vazada, como pode ser visto na Figura 93.

Os suportes foram inicialmente dobrados em barra chata de 10 [mm] na GNS Usinagem para a realização dos primeiros testes. Porém no final do quinto teste, um dos suportes quebrou derrubando a grelha e a lenha no fundo da câmara de combustão. Então, para a realização dos testes 6 e 7 foram dobrados na usinagem da IEM/UNIFEI novos suportes em barra chata de 20 [mm]. Ambos os suportes podem ser vistos na Figura 95.



Figura 93: Chapa utilizada para a fabricação da grelha.

A chapa da grelha foi cortada e soldada na GNS Usinagem como pode ser vista na Figura 94.



Figura 94: Chapa da grelha cortada e soldada pronta para ser usada.

A grelha foi assentada 70 [mm] abaixo da linha do refratário e finalmente posicionada na câmara de combustão. A Figura 96 mostra a grelha assentada no suporte de 10 [mm] e no suporte de 20 [mm].



Figura 95: Suportes da grelha, um de 10 [mm] e quatro de 20 [mm].



Figura 96: Grelha assentada nos suportes de 10 [mm] (a) e de 20 [mm] (b).

### 4.3 CONSTRUÇÃO DA Sonda RESFRIADA

Foi apresentado no item 3.5 o projeto de construção da sonda resfriada a água para coleta de amostras de gases no leito da câmara de combustão, inclusive com os cálculos fluidodinâmicos da mesma. Neste item apresenta-se a evolução do projeto da sonda e alguns

passos da sua fabricação. Não serão mostrados detalhes de fabricação, de cálculos e de desenhos da sonda, pois a mesma está sob processo de obtenção de patente.

Da sonda que foi idealizada no capítulo três, foram utilizados os cálculos fluidodinâmicos e os conceitos de construção, porém a forma final e as dimensões das tubulações precisaram ser alteradas.

Os cálculos térmicos foram realizados para se garantir que a água em circulação não atingisse a temperatura de 90 °C tivesse a capacidade de resfriar as amostras de gás de combustão no leito até temperaturas menores de 200 °C para que pudesse ser processado e analisado pelos instrumentos de análise já descritos no item 3.4.2.5 e preservar a integridade da sonda não permitindo que esta atinja sua temperatura de fusão.

Considerou-se ainda para os cálculos térmicos a caldeira operando na capacidade máxima de queima indicada pelo fabricante, ou seja, 51 [kg/h] de biomassa com um excesso de ar de 30 % ( $\alpha=1,3$ ).

Uma vez realizados os cálculos térmicos e fluidodinâmicos, verificou-se que a sonda descrita no capítulo três atendia todas as premissas térmicas e fluidodinâmicas calculadas.

Foi então realizado o desenho técnico da sonda atendendo os cálculos do projeto e buscaram-se empresas de usinagem com capacidade para construí-la.

Descobriu-se neste momento que não seria possível realizar uma das soldas internas com as dimensões dos tubos calculadas. Todos os cálculos fluidodinâmicos foram refeitos, mantendo-se os requisitos térmicos para a construção da sonda com novas dimensões das tubulações que possibilitassem a realização de todas as soldas necessárias e ainda assim permitisse a entrada da sonda no acesso no teto da câmara de combustão mostrado no item 4.5.

Com todos os cálculos refeitos e desenhos corrigidos, optou-se pela GNS Usinagem para a construção do protótipo da sonda que ficou pronta no início de agosto de 2016.

Os tubos utilizados na fabricação da sonda, bem como o esquema de montagem para sua fabricação podem ser vistos na Figura 97.

A Figura 98 mostra a usinagem e a soldagem dos tubos usados para a fabricação da sonda.



Figura 97: Tubulação e montagem da sonda.



Figura 98: Usinagem e soldagem dos tubos da sonda.

A sonda pronta sem as estruturas de apoio (manoplas) pode ser vista na Figura 99.



Figura 99: Sonda pronta sem as estruturas de suporte (manoplas).

A Figura 100 mostra a sonda sendo preparada para a realização do teste de estanqueidade na GNS Usinagem. Este teste foi realizado com a água da caixa d'água situada a 12 [m] de altura e pode ser visto na Figura 101. O teste de estanqueidade com a pressão de operação do circuito de água da sonda foi realizado posteriormente nos laboratórios do NEST/IEM/UNIFEI e está descrito no item 4.4.



Figura 100: Sonda sendo preparada para o teste de estanqueidade na GNS Usinagem.



Figura 101: Teste de estanqueidade da sonda realizado na GNS Usinagem.

A extremidade superior da sonda com a entrada de água, saída de água, saída de amostra de gases já com os espigões específicos para as mangueiras de conexão com os circuitos de água e gás da sonda, além da estrutura de suporte (manoplas) podem ser vista na Figura 102.

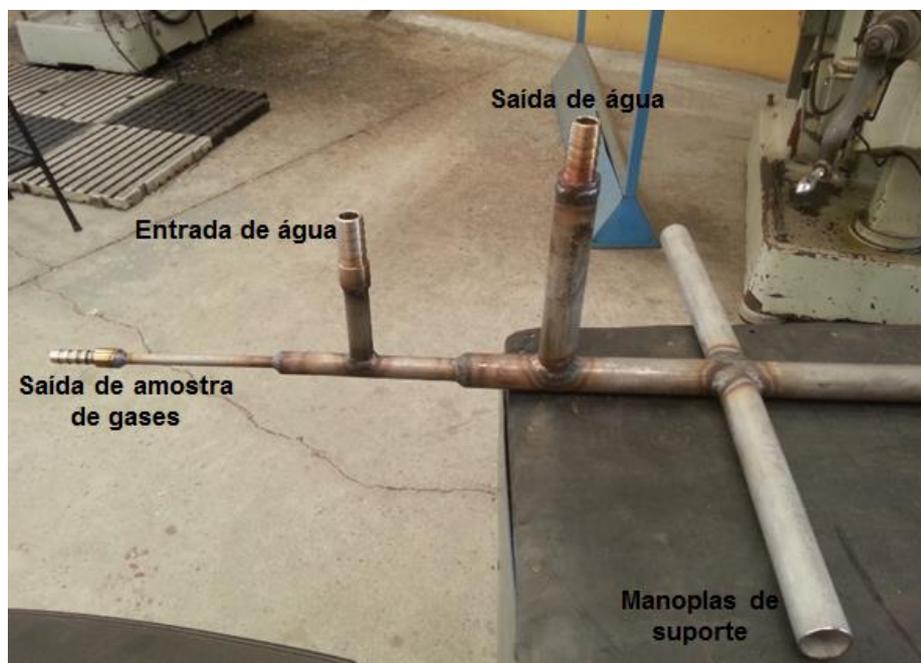


Figura 102: Extremidade superior da sonda.

A extremidade inferior da sonda com os acessos para a aspiração das amostras de gases pode ser vista na Figura 103.



Figura 103: Extremidade inferior da sonda: acessos para amostra de gases.

## 4.4 CIRCUITOS DA SONDA.

A sonda foi utilizada para a coleta de amostras de gases no interior da câmara de combustão, no nível do leito. Este instrumento possui dois circuitos que operam paralelamente. Existe um circuito de gases, por onde os gases de combustão são aspirados e passam através do tubo mais interno da sonda. Existe também um circuito de água, que envolve o circuito de gases e por onde circula a água em determinadas vazão e pressão para o resfriamento da amostra de gases e da sonda em si.

Neste item serão mostrados os equipamentos presentes nos dois circuitos e descrever sua montagem e operação.

### 4.4.1 CIRCUITO DE ÁGUA DA SONDA

O circuito de água da sonda foi projetado a partir dos cálculos fluidodinâmicos da sonda, que por sua vez foram executados em atendimento aos parâmetros térmicos de operação da sonda. Segundo os cálculos realizados já para os novos diâmetros dos tubos, a sonda deveria operar com 0,3 [m<sup>3</sup>/h] de água a uma pressão de 400 [kPa]. Para o acionamento deste circuito foi usada uma bomba cujos dados são mostrados na Figura 104.



Figura 104: Dados da bomba usada no circuito de água da sonda.

Como a bomba disponível acionaria o circuito com mais vazão e mais pressão que o demandado pela sonda, foi necessário prever um circuito de sangria para proteger a bomba em

caso de excesso de perda de carga contra um possível sobreaquecimento. O circuito de água da sonda foi planejado conforme mostrado na Figura 105.

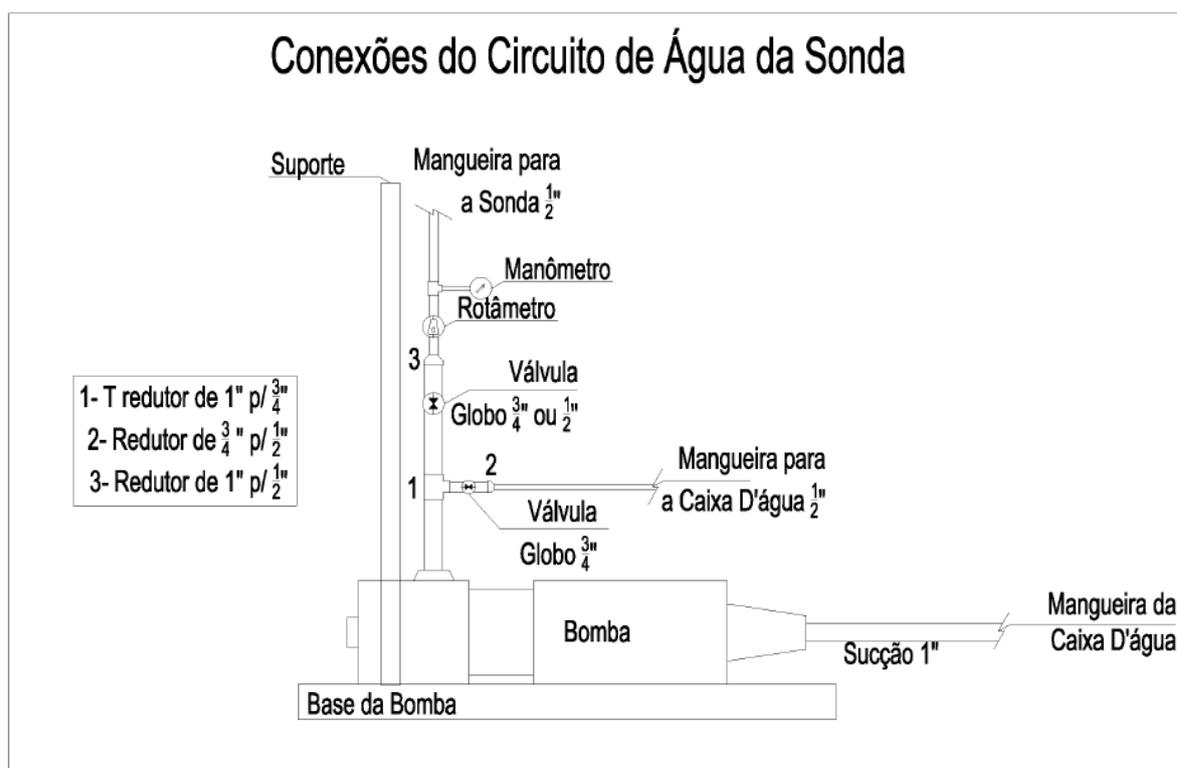


Figura 105: Planejamento do circuito de água da sonda.

Na montagem do circuito de água da sonda foi utilizado um rotâmetro vertical com capacidade de até 4,2 [m<sup>3</sup>/h] (70 [l/MIN]) para medir a vazão de água que circula pela sonda, além de dois manômetros, um com capacidade para medir até 10 [kgf/cm<sup>2</sup>], usado para medir a pressão da água que circula pela sonda e outro com capacidade para medir até 25 [kgf/cm<sup>2</sup>], usado para medir a pressão na água que circula pelo circuito de sangria de volta para a caixa d'água. O circuito foi instalado em uma estrutura planejada para suportar o circuito da sonda e eliminar as vibrações oriundas da operação do circuito. A Figura 106 mostra o circuito de água completo da sonda montado no suporte que foi preso ao suporte da caldeira.



Figura 106: Circuito de água da sonda.

#### 4.4.2 CIRCUITO DE GÁS DA SONDA

O circuito de gás da sonda foi montado para atender as demandas dos analisadores de gás Siemens Ultramat 23 e Calomat 6 quanto a vazão, limpeza e temperatura dos gases a serem analisados.

O gás de combustão do leito passa pela sonda e através de uma mangueira chega ao sistema de tratamento de gases, onde passa inicialmente por um condensador primário e na sequência por um condensador secundário onde é resfriado e separado dos condensados, depois segue

para filtragem, passa pelo rotâmetro, pela bomba de vácuo e vai para os analisadores, onde é analisado e em seguida descartado no meio ambiente. A Figura 107 mostra um esquema do encaminhamento do gás de combustão do leito para a análise e a Figura 108 mostra o sistema de tratamento de gás instalado.

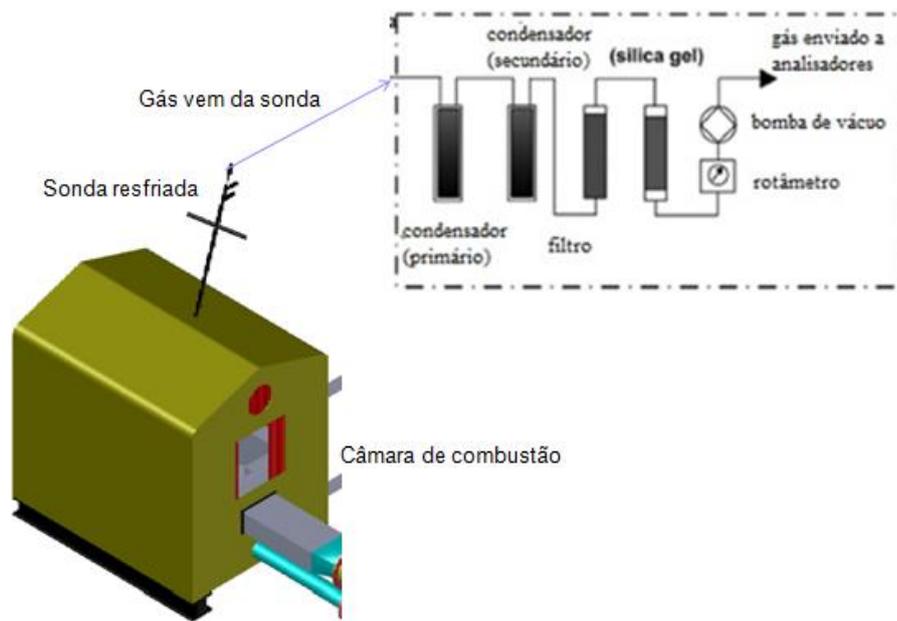


Figura 107: Esquema do tratamento dos gases de combustão do leito para análise.



Figura 108: Sistema de amostragem dos gases de combustão do leito para a análise.

O sistema completo de análise de gases, incluindo a sonda, as mangueiras de conexão, o sistema de tratamento de gases e os analisadores Siemens Ultramat 23 e Calomat 6 podem ser vistos já montados e prontos para operação na Figura 109.



Figura 109: Sistema completo de análise de gases de combustão do leito.

## 4.5 SA – SISTEMA ACÚSTICO

O SA projetado para os experimentos e descrito no item 3.4.1.5 seria montado com um speaker de 500 [W] de potência, porém o equipamento, que foi cedido pela University of Iowa, chegou ao Brasil com um speaker de 400 [W].

Na realização do primeiro teste com intensificação acústica, em 23/12/2016, a caixa amplificadora de 400 [W] queimou aos 20 minutos de operação.

Duas teorias sobre as causas da queima foram aventadas, na primeira e mais provável, o ar primário gerou uma pressão sobre o autofalante impedindo-o de realizar a movimentação completa e assim impedindo o resfriamento pleno da bobina elétrica em seu interior, acarretando sobreaquecimento na bobina, rompimento de seu isolamento e a colocando em curto circuito. Isso gerou uma corrente de curto circuito que queimou a bobina e outros componentes do circuito de amplificação, inclusive o transformador. Na segunda, a vibração gerada pelo autofalante fez com que algum componente se soltasse e entrasse em contato

indevidamente com alguma outra parte do circuito, gerando uma corrente de curto circuito que queimou os componentes do circuito de amplificação, inclusive o transformador e a bobina do autofalante.

A bobina do autofalante foi trocada, o autofalante foi recondicionado e ficou a disposição para os testes em 03/01/2017. A bobina que substituiu a queimada e o autofalante em recondicionamento podem ser vistos na Figura 110.



Figura 110: Autofalante queimado em recondicionamento e bobina substituta.

Para a realização do teste final com a intensificação acústica em 06/01/2017 foi necessário planejar e executar um novo sistema de amplificação. Para evitar que o novo SA também não resistisse à operação e queimasse, foram pensadas soluções para as duas teorias que foram aventadas sobre a queima do SA original.

Em resposta à primeira teoria sobre a causa da queima do SA, para evitar a pressão do ar primário sobre o autofalante, foi instalada entre a tubulação de ar primário e o SA uma película de borracha para que o ar fornecido pelo soprador e em trânsito na tubulação de ar primário não acessasse o autofalante. Essa película de borracha permite a passagem da pressão acústica do volume de ar em reverberação pela movimentação do autofalante e pode ser vista na Figura 111.

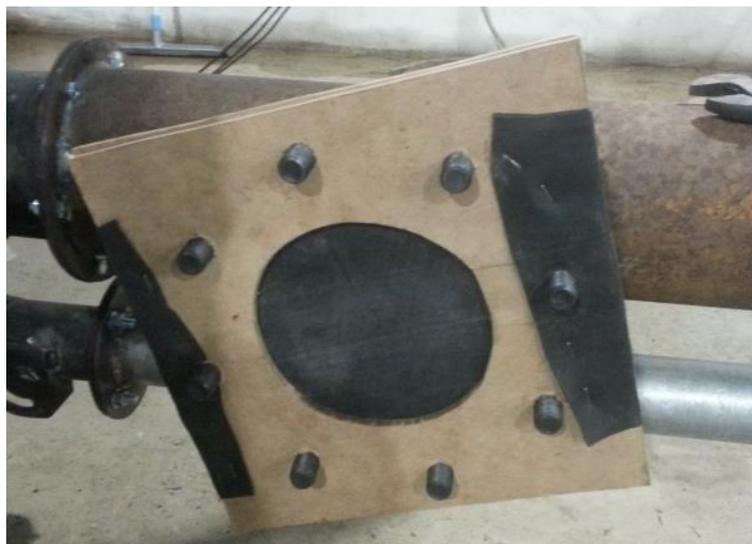


Figura 111: Película de borracha para isolamento do volume de ar do autofalante.

Em resposta à segunda teoria sobre a causa da queima do SA, para evitar a vibração do circuito amplificador, foi planejado um SA com o circuito de amplificação separado do autofalante, ou seja, fora da caixa de som que acomoda o autofalante.

Como o circuito de amplificação original não mais estaria disponível e o novo não poderia ficar dentro da caixa que acomoda o autofalante, a opção de outra caixa amplificada estava descartada.

Foi decidido então montar o SA como um sistema de som automotivo, com caixa de som separada da potência de amplificação. Porém, em sistemas de som automotivos a alimentação para o autofalante vem da bateria em 12 [V] contínuos e nesse caso seria necessária uma fonte de 12 [V] alimentada em corrente alternada, além da potência de amplificação.

Nos dias 04 e 05/01/2017 na Sonauto, empresa de som automotivo, foram testadas configurações de SA que pudessem ser utilizadas para a realização dos testes. A Figura 112 mostra algumas destas configurações testadas.

Definiu-se finalmente em 05/01/2017 pela utilização do mesmo autofalante original reconicionado, instalado na mesma caixa JBL original de 64 [l] de volume, porém com uma potência de amplificação Taramps de 200 [W] a 4 [ $\Omega$ ] e uma fonte retificadora Taramps de 50 [A] e 12 [V] gentilmente cedidos pela Sonauto para a realização dos testes também nos laboratórios do NEST/IEM/UNIFEI. A configuração final do SA definida para a realização dos testes com intensificação acústica já conectada na tubulação de ar primário no laboratório do NEST/IEM/UNIFEI incluindo o gerador de frequências pode ser vista na Figura 113.



Figura 112: Algumas configurações testadas para o SA



Figura 113: Configuração final do SA utilizada no teste com intensificação acústica

A potência final gerada no SA é 200 [W], pois apesar de o aut falante suportar os 400 [W] do amplificador original, a nova potência amplificadora utilizada só produz 200 [W]. Além disso, a película de borracha instalada entre o SA e a tubulação de ar primário atenua parte da intensificação acústica transferida para o fornecimento de ar primário.

## 4.6 CONEXÕES DO SA E DAS TUBULAÇÕES DE AR

O Este item mostra a conexão do Sistema acústico SA com a tubulação de ar primário, as placas de orifício nas tubulações de ar primário e secundário, além do damper corta fogo na tubulação de ar primário.

O SA é formado pela caixa de som que comporta o aut falante JBL reconicionado de 400[W], a potência de amplificação Taramps de 200 [W] a 4 [ $\Omega$ ] e uma fonte retificadora Taramps de 50 [A] e 12 [V]

O desenho da caixa de som utilizada nos testes e suas dimensões podem ser vistas na Figura 114, enquanto a Figura 115 mostra a caixa de som original, antes de ser trabalhada e adaptada para o novo SA.

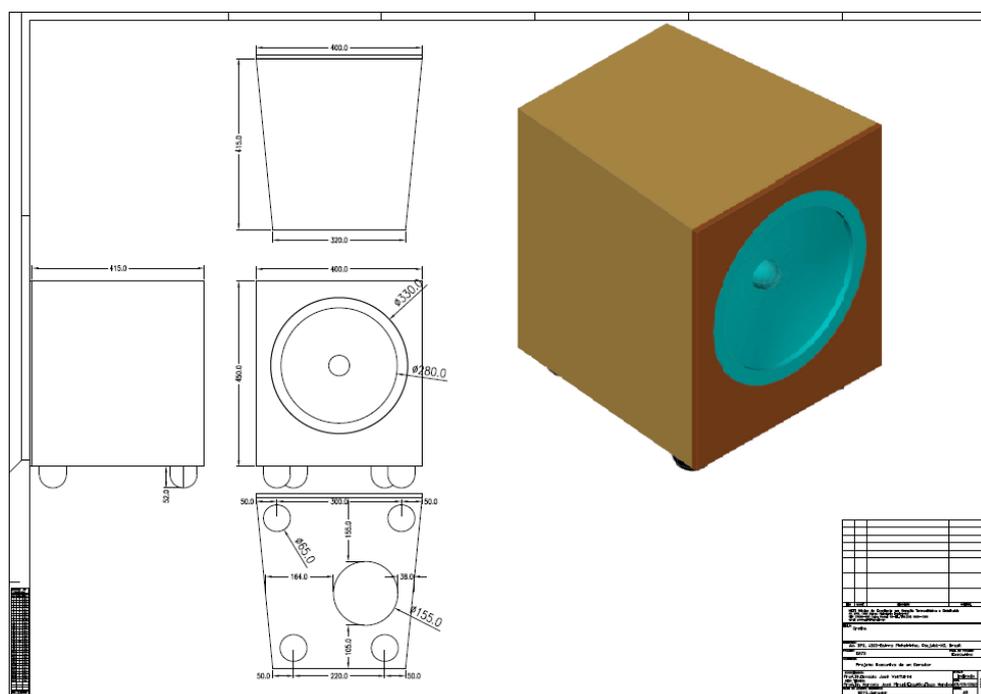


Figura 114: Desenho da caixa de som utilizada no SA



Figura 115: Caixa de som original cedida pela University of Iowa para os testes

O material para a fabricação da tubulação de conexão do SA com a tubulação de ar primário, da tubulação que comporta placa de orifício do ar primário e do damper corta fogo no fornecimento de ar primário foi fornecido do descarte da UNIFEI. Os tubos de aço utilizados para a fabricação da tubulação que comporta placa de orifício do ar secundário e o complemento da tubulação de ar primário foi fornecida pela prefeitura da UNIFEI. Esse material foi cortado no laboratório NUSEC/IEMUNIFEI antes de ser usinado pela GNS Usinagens e pode ser visto na Figura 116.



Figura 116: Material utilizado para a fabricação das tubulações e conexões

#### 4.6.1 CONEXÃO ENTRE SA E TUBULAÇÃO DE AR PRIMÁRIO

As ondas sonoras geradas no SA devem intensificar acusticamente o escoamento do fornecimento de ar através da tubulação de ar primário como mostrado no item 3.4.1.5. Para tal foi preciso realizar a conexão do SA com a tubulação de ar primário. Conforme calculado no item 3.3.6, o comprimento do tubo de conexão entre o SA e a tubulação de ar primário, para a frequência de 50 Hz, deveria ser de 6,88 [m] por se tratar de um múltiplo do comprimento de onda, mas devido a pouca disponibilidade de tubulação e de espaço reduzido no laboratório para realizar tal conexão, a tubulação foi desenhada com 734,7 [mm] de comprimento da distância entre o autofalante e a parede externa da tubulação de ar primário.

A conexão entre o SA e a tubulação de ar primário é composta por um tubo de 170 [mm] de diâmetro externo e 150 [mm] de diâmetro interno usinado em forma de T que se conecta longitudinalmente na tubulação de ar primário, à montante do soprador e à jusante da tubulação que comporta a placa de orifício e perpendicularmente a um funil com 580 [mm] de comprimento, com 187 [mm] de diâmetro interno menor e de 315 [mm] de diâmetro interno em seu lado maior, que se conecta a um adaptador de diâmetros formado por duas chapas de madeira com 30 [mm] de espessura cada, com diâmetros internos concêntricos de 315 [mm]







Figura 120: Funil de conexão.

O desenho do tubo usinado em T pode ser visto na Figura 121, enquanto o próprio tubo durante a sua usinagem na GNS Usinagem pode ser visto na Figura 122.

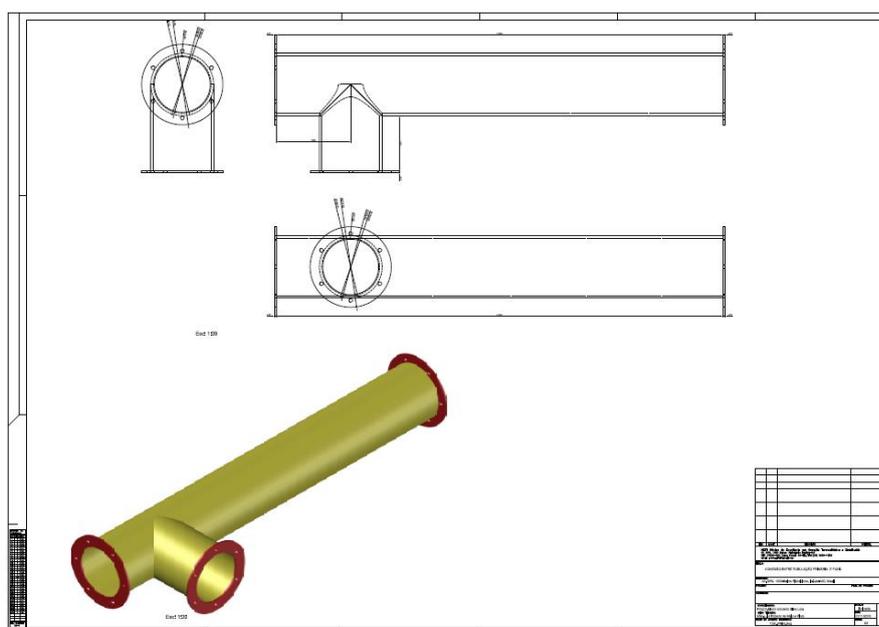


Figura 121: Desenho do tubo usinado em T para conectar o funil à tubulação de ar primário.



Figura 122: Tubo Usinado em T durante usinagem na GNS Usinagem.

A conexão entre o SA e a tubulação de ar primário pode ser vista na Figura 113 já montada no laboratório do NEST/IEM/UNIFEI pronta para a realização dos testes com intensificação acústica.

#### 4.6.2 PLACAS DE ORIFÍCIO

Foram calculadas, projetadas, desenhadas e fabricadas duas placas de orifício tipo flange, uma para a tubulação de fornecimento de ar primário e outra para a tubulação de fornecimento de ar secundário. Ambas foram concebidas segundo a NBR ISO5167-1 e usinadas na GNS Usinagem.

Todas as dimensões da placa de orifício bem como das tubulações à jusante para a tubulação de ar primário estão no seu desenho que pode ser visto na Figura 123. Lembrando que a tubulação à montante da placa de orifício para a tubulação de ar primário já está considerada no tubo usinado em T descrito no item 4.6.1.

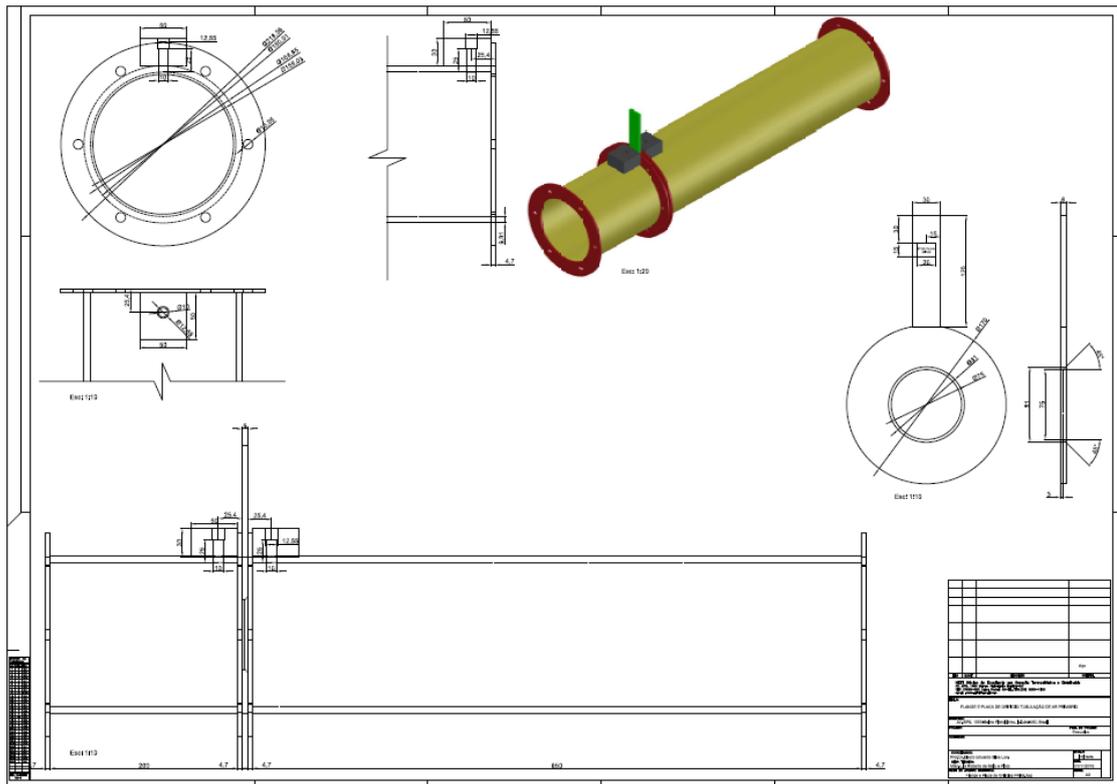


Figura 123: Desenho da placa de orifício e da tubulação de ar primário que a comporta.

As dimensões da placa de orifício bem como da tubulação à jusante para a tubulação de ar secundário estão no desenho que pode ser visto na Figura 124.

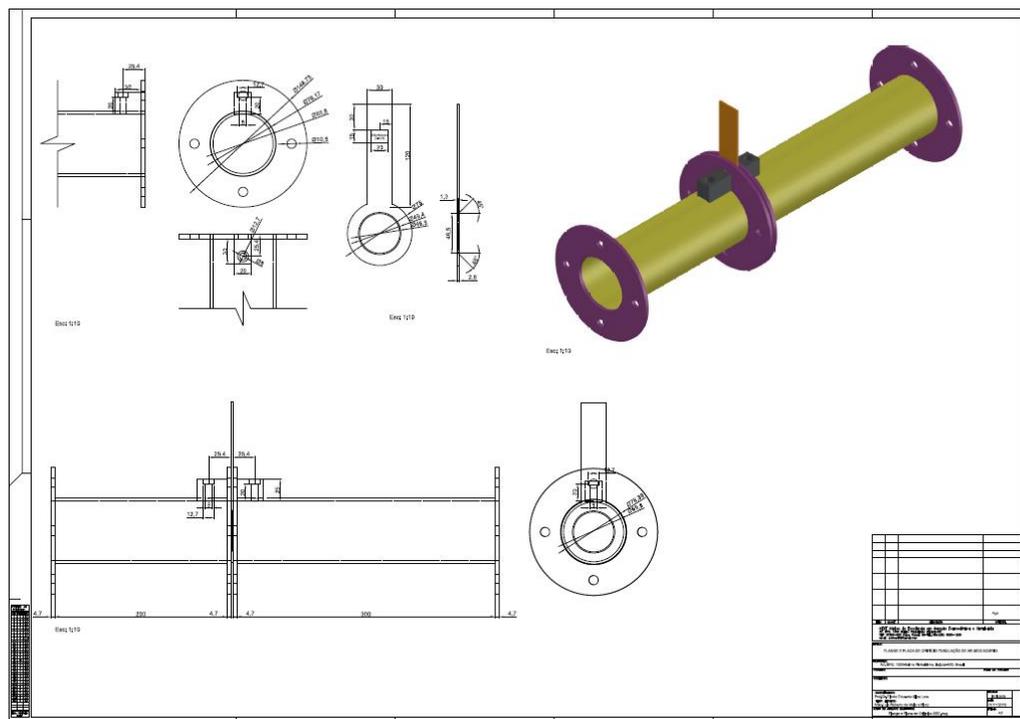


Figura 124: Desenho da placa de orifício e da tubulação de ar secundário que a comporta.

O desenho com a tubulação à jusante da placa de orifício comportada na tubulação de ar secundário pode ser vista na Figura 125.

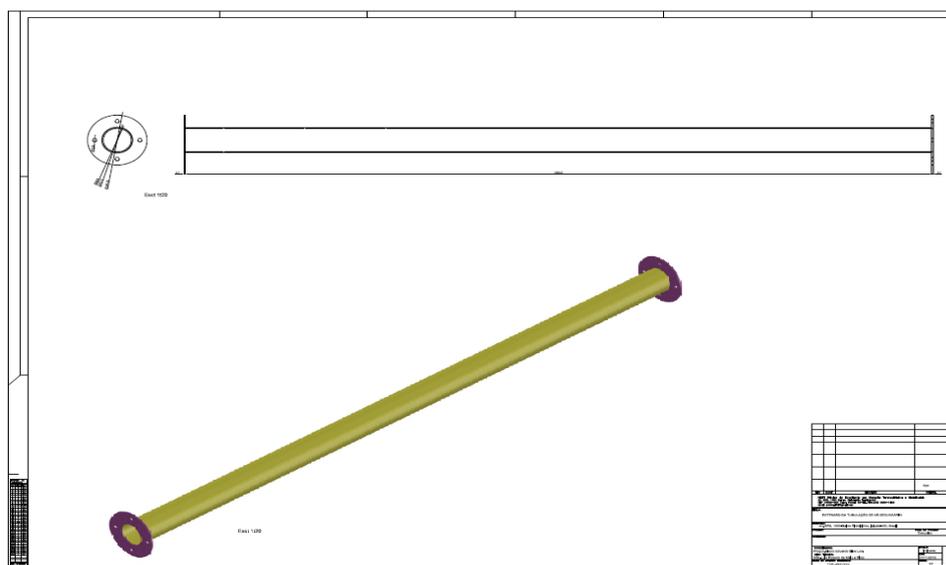


Figura 125: Desenho da tubulação complementar à montante da placa de orifício comportada na tubulação de ar secundário.

Ambas as placas de orifício, tanto a instalada na tubulação de ar primário quanto a placa instalada na tubulação de ar secundário podem ser vistas na Figura 126.



Figura 126: Placas de orifício para as tubulações de ar secundário e primário respectivamente.

A Figura 127 mostra as tomadas de pressão, tanto a montante quanto à jusante na tubulação que comporta a placa de orifício do ar primário em processo de usinagem ainda sem acabamento e a Figura 128 mostra a placa de orifício dentro da tubulação de ar primário que a comporta vista à montante e à jusante.



Figura 127: Tomadas de pressão da placa de orifício para a tubulação de ar primário.



Figura 128: Vista da placa de orifício à montante e à jusante na tubulação de ar primário.

As tubulações com as placas de orifício no laboratório do NEST/IEM UNIFEI podem ser vistas na Figura 129.



Figura 129: Placas de orifício instaladas nas tubulações de ar primário e secundário.

Foram fabricados e instalados manômetros em U com tomadas de pressão à montante e à jusante das placas de orifício instaladas nas tubulações de ar primário e secundário. Os manômetros em U com água vermelha instalado nas tomadas de pressão da tubulação de ar primário e com água azul instalado nas tomadas de pressão da tubulação de ar secundário podem ser vistos na Figura 130.



Figura 130: Manômetros em U nas tomadas de pressão das placas de orifício.

### 4.6.3 DAMPER CORTA FOGO

Em caso de desligamento planejado ou não do soprador, poderia ocorrer retorno de chamas pela tubulação de ar primário causando assim danos ao SA e em especial no autofalante. Para proteger o SA nessa situação foi desenhado e fabricado pela GNS Usinagem um damper corta fogo, cujo desenho pode ser visto na Figura 131.

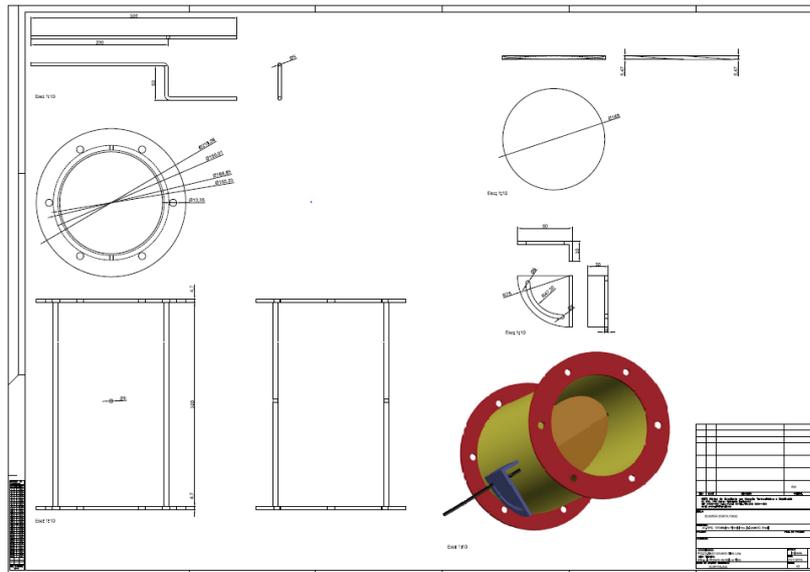


Figura 131: Desenho do damper corta fogo.

A Figura 132 mostra o processo de usinagem do damper corta fogo na GNS Usinagem.



Figura 132: Processo de usinagem do damper corta fogo na GNS Usinagem.

Os itens descritos formam a nova tubulação de ar primário e secundário da caldeira e fazem a conexão entre o soprador e a câmara de combustão e podem ser vistos em teste de montagem na GNS Usinagem antes de ser definitivamente instalada no laboratório do NEST/IEM/UNIFEI para a realização dos testes na Figura 133.



Figura 133: Teste de montagem da tubulação completa na GNS Usinagem.

## 4.7 TERMOPAR B

Um termopar do tipo B foi projetado para a medição de temperaturas no leito, pois o mesmo tem capacidade para operar entre 250 [°C] e 1.800 [°C]. Ele foi especificado a partir dos resultados da modelagem desta caldeira realizada pelo Aluno de mestrado Juan Carlos Guerreiro. Apesar de a configuração de grelha da modelagem ser diferente da utilizada nos testes desta tese, a modelagem alcançou temperaturas da ordem de 1.450 [°C] na região do leito da câmara de combustão, o que justificou a utilização de um termopar tipo B, pois os termopares tipo K existentes nos laboratórios do NEST/IEM UNIFEI operam apenas até 1.200 [°].

O acesso do termopar B é similar ao da sonda, assim como sua demanda de alcance até o leito da câmara de combustão, logo, a dimensão da haste do termopar deveria ser semelhante à da sonda e em seu diâmetro externo exatamente o mesmo.

Foi dimensionado então um termopar B de fios de platina, com 400 [mm] de inox 304 protegendo a ponteira de 300 [mm] de cerâmica. O termopar foi montado pela Alutal Controles Industriais LTDA. Um esquema semelhante ao do termopar montado para o NEST/IEM/UNIFEI, porém com dimensões diferentes pode ser visto na Figura 134 e o termopar B montado para o NEST/IEM/UNIFEI pode ser visto na Figura 135.

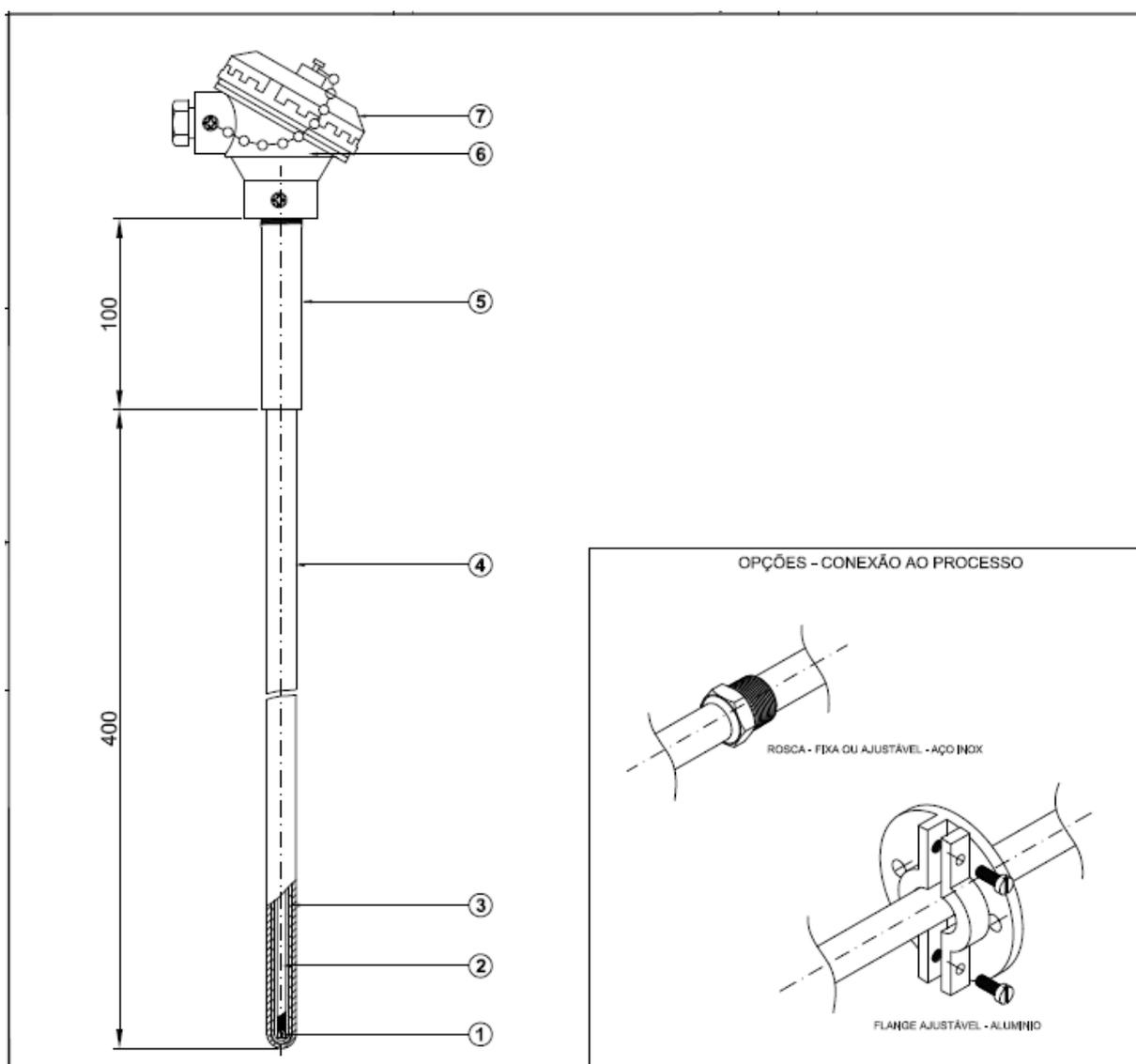


Figura 134: Esquema de um termopar tipo B semelhante ao montado para o NEST/IEM/UNIFEI.



Figura 135: Termopar tipo B montado pela Alutal Controles Industriais LTDA para o NEST/IEM/UNIFEI.

## 4.8 ACESSOS PARA SONDA E TERMOPAR B

Conforme explicado no item 3.5.1 o acesso da sonda e também do termopar B ao leito da câmara de combustão deve ocorrer pelo teto da mesma. O teto da câmara possuía originalmente um acesso circular de 15 [mm] de diâmetro interno, que pode ser visto na Figura 136 e não seria suficiente para permitir o acesso dos instrumentos. Tanto a sonda quanto o termopar B tem 19,05 [mm] de diâmetro externo. Fez-se então necessário abrir mais dois acessos de no mínimo 20 [mm] de diâmetro no teto da câmara de combustão para permitir que os dois instrumentos operassem ao mesmo tempo.

Tanto os instrumentos foram concebidos quanto os novos acessos foram abertos a partir da informação do fabricante de que a distância entre tubos d'água no teto da câmara é de 21 [mm]. A sequência de furação e preparação dos acessos, inclusive a instalação de tubos guia nos acessos pode ser vista na Figura 137. A Figura 138 mostra os acessos prontos.



Figura 136: Acesso original no teto da câmara de combustão.



Figura 137: Sequência de construção dos acessos no teto da câmara de combustão.



Figura 138: Acessos com guias prontos no teto da câmara de combustão.

## 4.9 MONTAGEM COMPLETA DA CALDEIRA

A montagem completa da caldeira levou mais de um ano em cálculos, desenhos, cotações, usinagens e fabricação dos itens descritos neste capítulo 4. Todo esse processo teve início logo após a qualificação do doutorando em 17/11/2015 e culminou com a finalização da montagem da caldeira e sua liberação para o início dos testes no início de dezembro de 2016. O desenho da montagem pode ser visto na Figura 139 e a caldeira completa montada no laboratório do NEST/IEM/UNIFEI pode ser vista na Figura 140.



## Capítulo 5

# TESTES REALIZADOS E SEUS RESULTADOS

No início do mês de dezembro de 2016 o laboratório e os equipamentos estavam prontos para o início dos testes. Foram realizados sete testes com operação da caldeira de 14/12/2016 a 06/01/2017, cada um deles com seus objetivos específicos e resultados. Neste capítulo apresenta-se cada um dos testes realizados e sua evolução até a realização dos testes cujos resultados foram analisados para a avaliação da intensificação acústica no processo de combustão de eucalipto.

### 5.1 TESTE 1: 14/12/2016

Segundo os cálculos apresentados no capítulo 3, a vazão volumétrica de ar (primário mais secundário) seria de  $4,0073 \text{ [Nm}^3/\text{kg}_{\text{biomassa}}]$  de acordo com a equação 14, considerando a temperatura de  $20 \text{ [}^\circ\text{C]}$ ,  $4,3 \text{ [m}^3/\text{kg}_{\text{biomassa}}]$ . Ao se considerar a máxima vazão mássica de biomassa,  $51 \text{ [kg/h]}$ , segundo informação do fabricante da caldeira, a vazão volumétrica de ar total seria de  $219,3 \text{ [m}^3/\text{h}]$  para a queima estequiométrica. Considerando um excesso de ar  $\alpha$  de 1,3 se obtém a vazão total de ar de  $285,09 \text{ [m}^3/\text{h}]$ .

Os testes seriam realizados com alimentação de cavacos de eucalipto de forma contínua através de um alimentador com rosca sem fim.

Antes do início dos testes com operação da caldeira, foram realizados testes no alimentador com o cavaco de eucalipto, que mostrou dificuldade de escoamento, enroscando e travando o motor por várias vezes nas diversas frequências testadas.

Foram realizados também testes de escoamento de serragem de eucalipto no alimentador, com mais sucesso que o cavaco. A serragem escoou mais estavelmente e, apesar de também apresentar travamentos no escoamento, isso ocorreu somente em algumas frequências e apenas ocasionalmente.

Definiu-se com base nestes testes do alimentador que se usaria serragem e não mais o cavaco de eucalipto como combustível da caldeira.

Também segundo o planejamento apresentado no capítulo 3, deveria se controlar as vazões de ar primário e secundário, para a realização dos testes.

Este teste 1 foi então realizado com o objetivo de testar a operação da caldeira com a alimentação de serragem e definir a vazão mássica de biomassa a ser alimentada, além das vazões volumétricas de ar primário e secundário.

Este teste foi realizado com a grelha plana posicionada conforme descrito no item 4.2 e mostrada na Figura 96.

O ar fornecido pelo soprador foi dividido entre primário e secundário por uma bifurcação com um damper do tipo abre e fecha no sentido do ar primário e outro no sentido do ar secundário, conforme mostrado na Figura 141.



Figura 141: Soprador e bifurcação de ar em primário e secundário com dampers tipo “abre e fecha”.

Percebeu-se durante o teste 1 que não seria possível controlar a vazão do ar através desses dampers em função do tipo dos mesmos.

Optou-se então, por usar determinadas posições físicas dos dampers em 0%, 50% e 100% aberto e se medir as vazões nos manômetros U das placas de orifício.

A vazão nos escoamentos de ar primário e secundário foi calculada conforme equação 81.

$$Q_{ar} = V_{ar} \cdot C_d \cdot A \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (81)$$

Onde:

$Q_{ar}$  = Vazão volumétrica do ar na tubulação [ $m^3_{ar}/h$ ]

$V_{ar}$  = Velocidade média do escoamento de ar na tubulação [m/s]

$C_d$  = Coeficiente de descarga

$A$  = Área da seção transversal do orifício [ $m^2$ ]

E:

$$V_{ar} = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^4}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot h \cdot \rho_{h_2o}}{\rho_{ar}}} \left[ \frac{m}{s} \right] \quad (82)$$

Onde:

$\beta$  = Relação do diâmetro interno da tubulação pelo diâmetro do orifício

$g$  = Velocidade média do escoamento de ar na tubulação [m/s]

$h$  = Coeficiente de descarga

$\rho_{h_2o}$  = Massa específica da água [ $kg/m^3$ ]

$\rho_{ar}$  = Massa específica do ar [ $kg/m^3$ ]

Montou-se uma relação das posições dos dampers e das respectivas vazões nos escoamentos de ar primário e secundário, com e sem a grelha conforme mostra a Tabela 29. Além disso, se estimou a vazão mássica de biomassa para cada vazão considerando o cálculo da equação 14, considerando a conversão de [ $Nm^3$ ] para [ $m^3$ ] para uma temperatura de 20 [°C] e  $\alpha=1,3$ .

Tabela 29: Relação entre h, Q e  $\dot{m}$ .

EM VAZIO							
Relação ar primário/secundário % de abertura no Damper		$\Delta h$ [mmH <sub>2</sub> O]		$Q_{ar}$ [m <sup>3</sup> /h]			$\dot{m}_{bio}$ [kg/h]
Primário	Secundário	Primário	Secundário	Primário	Secundário	Total	
100	100	30	23	220,82	86,06	306,88	54,90
100	0	38	0	248,52	0	248,52	44,46
0	100	0	32	0	101,51	101,51	18,16
50	50	25	8	201,58	50,75	252,33	45,14
50	100	23	26	193,35	91,5	284,85	50,96
100	50						
SOMENTE C A GRELHA							
Relação ar primário/secundário % de abertura no Damper		$\Delta h$ [mmH <sub>2</sub> O]		$Q_{ar}$ [m <sup>3</sup> /h]			$\dot{m}_{bio}$ [kg/h]
Primário	Secundário	Primário	Secundário	Primário	Secundário	Total	
100	100	29	21	217,11	96,63	313,74	56,13
100	0	33	0	231,59	0	231,59	41,43
0	100	0	31	0	99,91	99,91	17,87
50	50	19	10	175,73	56,74	232,47	41,59
50	100	21	25	184,75	89,72	274,47	49,10
100	50	27	10	116,12	47,31	163,43	29,24

Como a avaliação da intensificação acústica ocorre no escoamento de ar primário, optou-se por posições de dampers que resultassem em vazões totais aproximadas e que privilegiassem o escoamento no ar primário, como nas configurações em destaque na Tabela 29.

Montou-se também a Tabela 30, que relaciona as frequências de acionamento do motor que impulsiona a rosca sem fim do alimentador com as vazões mássicas fornecidas pelo alimentador à câmara de combustão. Os valores em destaque nesta tabela foram obtidos por interpolação.

Tabela 30: Curva de alimentação para a serragem considerando os dois minutos do teste.

Frequência [Hz]	Vazão [kg/h]
7,5	18,16
10	24
18,9	44,45
19,15	45,13
20	47,1
22,17	50,95
30	68,3
40	103,35
50	123,45
60	142,65

Justifica-se assim a configuração determinada para a operação da caldeira na realização do teste 1, que pode ser vista na Tabela 31.

Tabela 31: Parâmetros operacionais do Teste 1.

Frequência do alimentador	18,9	[Hz]
Vazão mássica de biomassa	44,45	[kg]
Vazão volumétrica de ar	248,52	[m <sup>3</sup> /h]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

Um resumo da operação realizada no teste 1 pode ser visto na Tabela 32.

Tabela 32: Operação do Teste 1.

OPERAÇÃO DO TESTE 1		
Hr	Minuto do teste	Item
12:40	0	ignição da caldeira
12:46	6	Abertura de 100 % do damper do ar secundário
13:01	21	Acionado o alimentador (18,9 Hz)
13:31	51	Desligado o alimentador

A Figura 142 mostra a serragem no silo, enquanto a Figura 143 mostra a sequência de ignição da caldeira. Enquanto a caldeira se aquecia, percebeu-se na meia hora seguinte ao acionamento do alimentador que as temperaturas não apresentavam acréscimo como seria de se esperar dentro da câmara de combustão.

Abriu-se então a porta da câmara de combustão para verificação das condições da combustão e verificou-se que não se conseguiu promover a combustão.

Não foi possível operar a caldeira com a serragem em alimentação contínua através do alimentador de rosca sem fim. A serragem se acumulou na entrada da câmara de combustão na parte anterior da grelha. O escoamento de ar aconteceu pela parte posterior da grelha e não ocorreu a mistura do ar com a biomassa, não acontecendo assim a combustão. Criou-se um ambiente de pirólise na câmara de combustão, que pôde ser verificado com o alcatrão que escorreu do sistema de exaustão sobre a câmara de combustão e pode ser visto na Figura 144.

A Figura 145 mostra a distribuição das cinzas na grelha dentro da câmara de combustão após o teste 1 e a Figura 146 mostra a distribuição das cinzas na grelha já fora da câmara de combustão também após o teste 1.



Figura 142: Serragem de eucalipto no silo do alimentador.



Figura 143: Sequência de ignição na câmara de combustão.



Figura 144: Alcatrão escorrido na câmara de combustão.



Figura 145: Distribuição das cinzas na grelha dentro da câmara de combustão após teste 1.

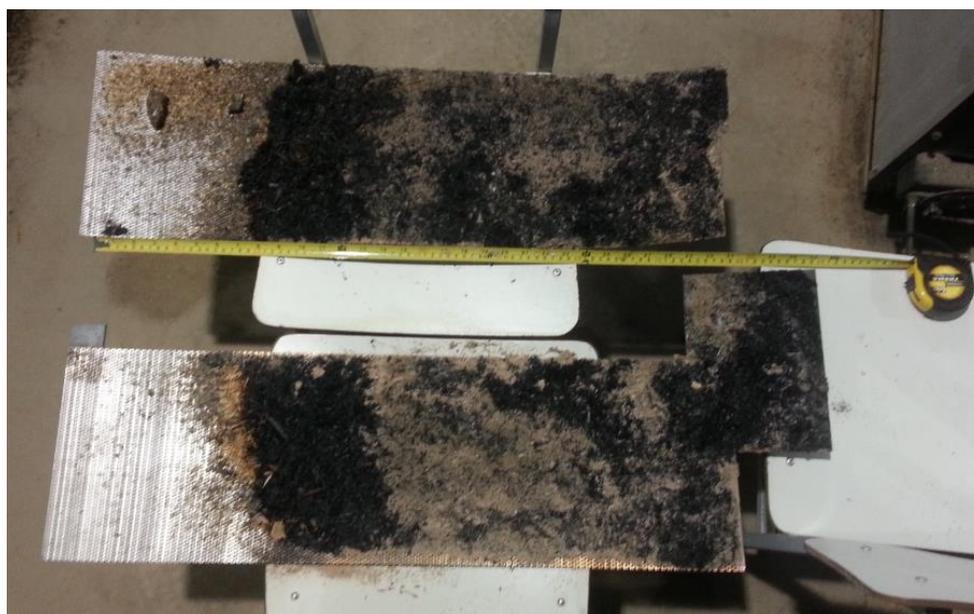


Figura 146: Distribuição das cinzas na grelha fora da câmara de combustão após teste 1.

Uma ideia para aumentar a chance de sucesso com a alimentação contínua de serragem foi utilizar uma grelha inclinada ao invés da plana que foi utilizada neste teste 1. Essa ideia foi testada no teste 3. Enquanto a grelha inclinada foi calculada, seus suportes dobrados e a chapa furada foi cortada na nova medida, foi realizado o teste 2, descrito a seguir.

## 5.2 TESTE 2: 15/12/2016

O teste 2 e todos os outros daqui para frente foram realizados utilizando-se os mesmos raciocínios do teste 1 para escolha dos parâmetros operacionais da caldeira, mas com o objetivo de se verificar a possibilidade de se atingir a pressão de operação de 6 [kgf/cm<sup>2</sup>] e depois reduzir e alcançar a estabilidade operacional a 4 [kgf/cm<sup>2</sup>]. Além disso, verificar aos intervalos de estabilidade entre as instabilidades causadas pela alimentação de combustível e a reposição de água. Isso, pois se pretendia utilizar esses intervalos de estabilidade para avaliar a intensificação acústica. O combustível utilizado neste teste 2 foi a lenha de eucalipto.

Como neste caso a alimentação foi com a lenha pela porta da câmara de combustão, a biomassa foi colocada na porção final da grelha, por onde o escoamento do ar primário acessou a biomassa e houve a combustão. Ainda não houve preocupação com o excesso de ar. Isso será importante nos testes 5, 6 e 7 e será analisado oportunamente. A operação da caldeira segue a NBR13 e, para o teste 2, pode ser vista na Tabela 33.

Tabela 33: Operação completa no Teste 2.

Hr	Minuto do teste	Item
08:30	0	Ignição da caldeira
08:35	5	Acionado o Soprador, cerca de 30% ar primário (1º) e 100% ar secundário (2º)
08:40	10	Fechada a porta da câmara de combustão
08:54	24	Alimentação de 1,860 kg Lenha
09:08	38	Alimentação de 2,840 kg Lenha
09:23	53	Alimentação de 4,035 kg Lenha
09:42	72	Alimentação de 4,115 kg Lenha
09:42	72	Ar: 50% (1º) e 50% (2º)
09:45	75	Primeiro som de vapor no tubo de saída de vapor
09:45	75	Fechada a válvula de vapor (V8)
09:57	87	Alimentação de 4,410 kg Lenha
10:02	92	Desloca-se do zero o ponteiro do manômetro
10:05	95	P = 1 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:10	100	Alimentação de 4,030 kg Lenha
10:13	103	P = 2 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:18	108	P = 3 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:23	113	P = 4 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:29	119	P = 5 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:32	122	Alimentação de 4,025 kg Lenha
10:36	126	P = 6 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:36	126	Abre Válvula da pressão (V8)
10:40	130	P = 4 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:41	131	Reposição de 25,53 [L] de água
10:43	133	P = 3,5 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:43	133	Fecha V8
10:43	133	P = 4 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
10:47	137	Abre Válvula da pressão (V8)
10:52	142	Última alimentação de 4,300 kg Lenha
11:06	156	Reposição de 3,57 [L] de água
11:06	156	P = 3,8 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
11:06	156	P = 4 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
11:40	190	Pressão continua em 4 [kgf/cm <sup>2</sup> ]
11:40	190	Início do desligamento da caldeira, abre mais V8
11:48	198	Reposição de 40,52 [L] de água
12:00	210	Reposição de 32,08 [L] de água
12:02	212	fechadas V8, V4 e V1
12:12	212	TESTE 2 ENCERRADO

Este teste foi bem sucedido em todos os seus objetivos, atingiu-se a pressão de 6 [kgf/cm<sup>2</sup>] e a estabilidade em 4 [kgf/cm<sup>2</sup>].

A Tabela 34 mostra os dados do Teste 2.

Tabela 34 Alguns dados da operação do teste 2.

DADOS DO TESTE 2:		
Massa da biomassa queimada no teste	32,63	[kg]
Tempo total do teste	212	[min]
Volume total de água reposto	101,7	[L]
Massa de cinzas	0,288	[kg]
Vazão mássica de biomassa	9,23	[kg/h]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

A vazão mássica de biomassa é calculada conforme a equação 83.

$$m_{bio} = \frac{m_{bio}}{t_{op}} \cdot 60 \left[ \frac{kg}{h} \right] \quad (83)$$

Onde:

$m_{bio}$  = Vazão mássica de biomassa [kg/h]

$m_{bio}$  = Massa de biomassa [kg]

$t_{op}$  = Período de operação [min]

Após o encerramento do teste 2, se dobrou o conjunto de suportes e cortou realizou as soldas necessárias para a fabricação do conjunto de grelha inclinada a ser utilizada no teste 3, descrito a seguir.

### 5.3 TESTE 3: 16/12/2016

Já se sabia que a estabilidade poderia ser alcançada e mantida para a operação em 4 [kgf/cm<sup>2</sup>], como foi planejado, porém isso somente tinha sido conseguido utilizando-se lenha como combustível.

Como o planejamento original considerava a alimentação contínua, foi preparado um conjunto de grelha inclinada para a operação do teste 3.

O objetivo do teste 3 foi realizar a operação repetindo-se os parâmetros operacionais do teste 2, porém utilizando uma grelha inclinada, na expectativa que com essa configuração, a serragem não mais ficasse acumulada na parte da frente da grelha e permitisse assim a mistura do ar com a biomassa para a realização da combustão.

Os suportes foram dobrados, a chapa de inox 304 furada foi cortada e soldada na GNS Usinagem. Esse processo pode ser visto na Figura 147.

O posicionamento dos suportes e a grelha inclinada instalados na câmara de combustão podem ser vistos na Figura 148.



Figura 147: Processo de fabricação da grelha inclinada na GNS Usinagem.



Figura 148: Posicionamento dos suportes e da grelha inclinada.

O aquecimento da caldeira foi realizado com lenha como combustível e só se iniciou a alimentação com a serragem quando a pressão já estava próxima à de operação.

Mais uma vez não se obteve sucesso na operação com serragem, pois mesmo com a grelha inclinada, a serragem continuou a se acumular na entrada da câmara de combustão não permitindo que acontecesse a mistura com o ar que escoou pela parte traseira da grelha reagindo com o resto da lenha nessa região posicionada. O acúmulo da serragem na parte frontal da grelha pode ser visto na Figura 149.



Figura 149: Serragem acumulada na entrada da câmara de combustão.

A solução para este problema seria fornecer a serragem para a câmara de combustão do meio da grelha para sua parte posterior, mas isso demandaria uma alteração construtiva no interior da câmara de combustão, que não foi possível realizar para este conjunto de testes. Esta modificação pode ser objeto de estudos futuros.

Assim decidiu-se que se realizariam os próximos testes com lenha de eucalipto. O próximo teste foi aproveitado para a verificação do funcionamento da instrumentação para coleta de dados, como apresentado a seguir.

#### **5.4 TESTE 4: 20/12/2016**

O teste 4 foi realizado novamente com o objetivo de se estabilizar a operação com lenha em 4 [kgf/cm<sup>2</sup>] e verificar o funcionamento de toda a instrumentação. A principal expectativa estava focada no funcionamento da sonda resfriada e nos seus circuitos de água para o

resfriamento da própria sonda e da amostra de gás de combustão, além do circuito de gás desde a coleta, até o tratamento e análise.

Tanto o teste 4 como os subsequentes foram realizados com a configuração de grelha plana.

Os números que resumem este teste 4 podem ser vistos na Tabela 35.

Tabela 35: Dados do teste 4.

DADOS DO TESTE 4:		
Massa da biomssa queimada no teste	41,88	[kg]
Tempo total do teste	199	[min]
Volume total de água reposto	107,64	[L]
Massa de cinzas	0,52	[kg]
Vazão mássica de biomassa	12,63	[kg/h]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

Desde o início do teste 4, as informações de temperatura dos termopares tipo K, com capacidade de operação até 1.200 [°] já foram aquisitadas e arquivadas pelo sistema de aquisição de dados Contempview descrito no item 3.4.2.9.

Foram alocados 7 termopares tipo K na caldeira, três na câmara de combustão, um na saída de vapor, um na chaminé, um no circuito de entrada de água e um na saída de água da sonda, além de um termopar tipo B com capacidade de operação entre 250 e 1.800 [°C] que operou através do acesso no teto da câmara de combustão. A Tabela 36 mostra os pontos de alocação dos termopares.

Tabela 36: Alocação dos termopares.

Variável/Unidade	Temperatura medida/Ponto de alocação
T1 (Tipo K) [°C]	Temperatura dos gases de combustão no interior da Câmara de combustão acima da parte anterior da grelha
T2 (Tipo K) [°C]	Temperatura dos gases de combustão no interior da Câmara de combustão acima da parte posterior da grelha
T3 (Tipo K) [°C]	Temperatura dos gases de combustão no interior da Câmara de combustão abaixo da parte anterior da grelha
T4 (Tipo K) [°C]	Temperatura dos gases de combustão na chaminé
T5 (Tipo K) [°C]	Temperatura da água na saída da sonda resfriada
T6 (Tipo K) [°C]	Temperatura do vapor na saída de vapor (tiragem de vapor)
T7 (Tipo K) [°C]	Temperatura da água na entrada da bomba que alimenta a caldeira
T8 (Tipo B) [°C]	Temperatura dos gases de combustão no leito na câmara de combustão

Os pontos de alocação dos termopares também podem ser vistos no esquema mostrado na Figura 150.

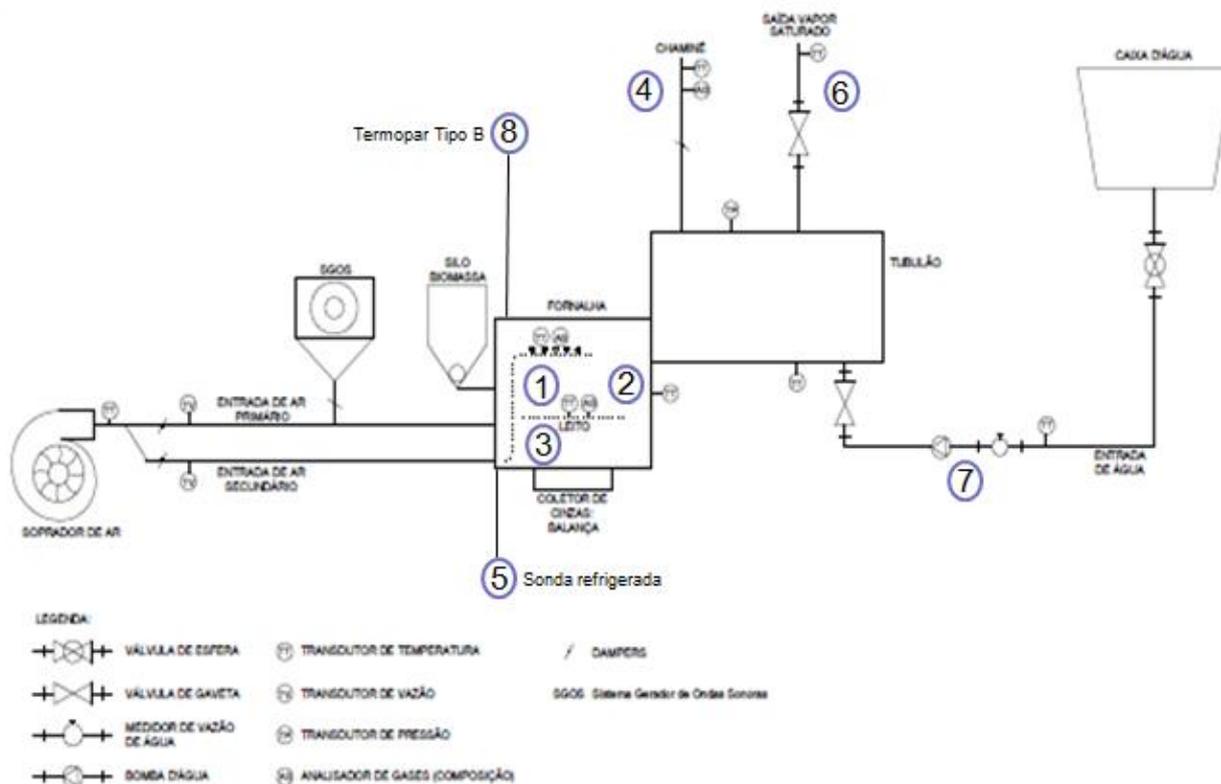


Figura 150: Esquema de alocação dos termopares.

No teste 4 também foi verificada a operação da sonda. Iniciou-se a operação da sonda com o acionamento da bomba do circuito da água seguido pelo ajuste da vazão e da pressão na sonda. Após o início da circulação da água foi-se direcionando a vazão para a sonda até que toda a vazão impulsionada pela bomba circulou pela sonda. Isso gerou uma pressão próxima a 7 [kgf/cm<sup>2</sup>], como pode ser verificado na Figura 151 que mostra o teste de vazão da sonda.



Figura 151: Teste de vazão na sonda.

Uma vez estabilizado o circuito de água, a sonda foi inserida na câmara de combustão até o nível do leito, como pode ser visto na Figura 152, para a verificação de sua capacidade de resfriamento.



Figura 152: Primeira inserção da sonda na câmara de combustão.

Os resultados são mostrados na Tabela 37, onde se pode verificar as temperaturas no momento da inserção da sonda no leito, inclusive a temperatura da água na saída da sonda (T5).

Tabela 37: Temperaturas no momento da inserção da sonda.

Variável/Unidade	Temperatura medida no momento da inserção da sonda
T1 (Tipo K) [°C]	378,7 [°C]
T2 (Tipo K) [°C]	226,1 [°C]
T3 (Tipo K) [°C]	60,5 [°C]
T4 (Tipo K) [°C]	248,2 [°C]
T5 (Tipo K) [°C]	27,6 [°C]
T6 (Tipo K) [°C]	34,6 [°C]
T7 (Tipo K) [°C]	32,5 [°C]
T8 (Tipo B) [°C]	Não operante

Com relação ao circuito de gases, também tudo funcionou de acordo com o planejado. As amostras de gases circularam pelo circuito de gases e acessaram os analisadores, conforme descrito no item 4.4.2.

Os analisadores não registraram os teores de CO e CH<sub>4</sub> e somente registraram os teores de H<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. Então as análises de gases no leito foram realizadas baseadas nos teores de O<sub>2</sub>. Além disso, não foi possível conectar os analisadores Siemens nem o portátil ao PLC do sistema de aquisição de dados Contempview, assim, as composições de gases foram registradas a mão com periodicidade de 5 minutos tanto para o leito quanto para a chaminé.

A análise dos gases na chaminé ocorreu conforme planejado. A Figura 153 mostra os acessos na chaminé para realização de medidas de temperatura e outro para a coleta de amostra de gases com o analisador de gases portátil descrito no item 3.4.2.4.

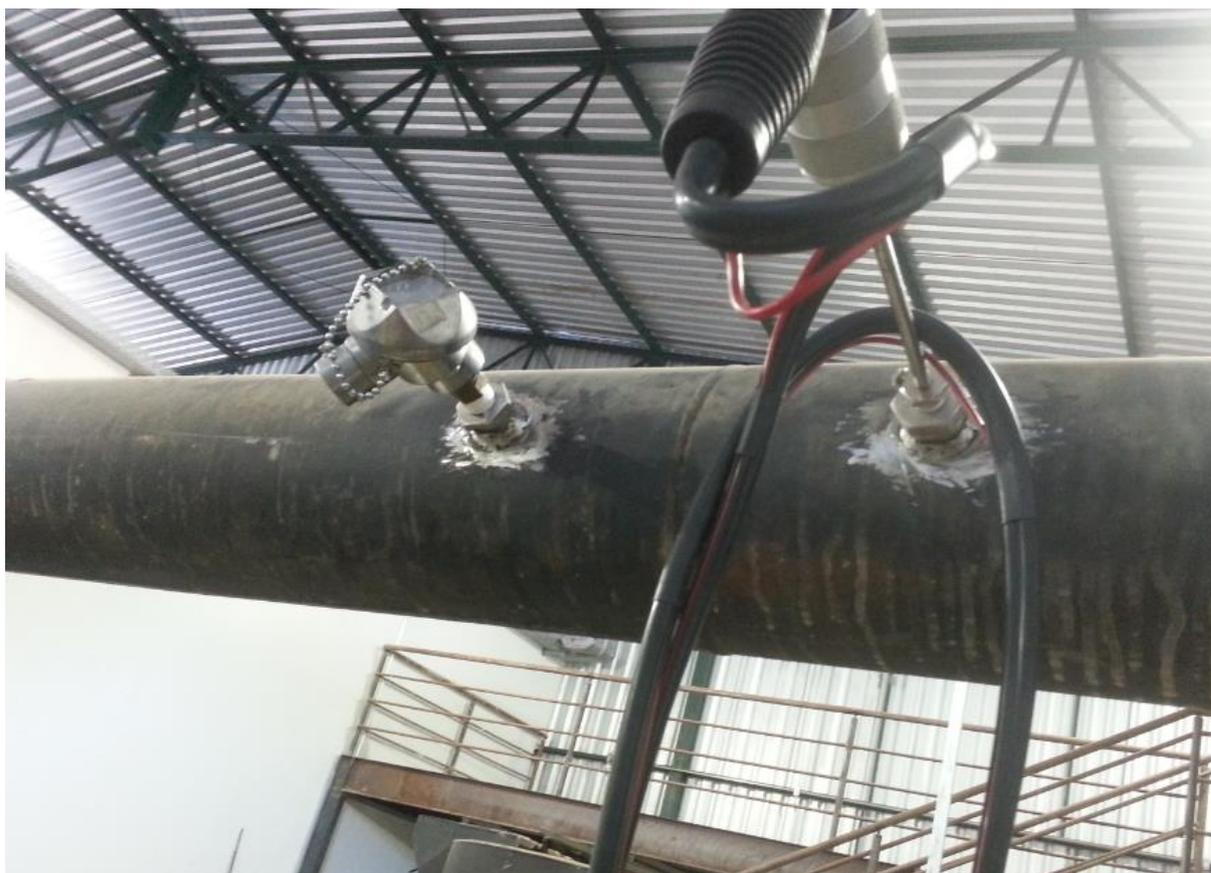


Figura 153: Acessos na chaminé.

Ao final do teste 4, a instrumentação da caldeira estava testada, já se sabia os parâmetros operacionais, combustível a ser utilizado e configuração de grelha a serem utilizados nos próximos testes. Seriam necessários ainda dois testes, um quinto, para realização da operação sem intensificação acústica e um sexto, para a realização da operação com intensificação acústica.

## **5.5 TESTE 5: 21/12/2016-SEM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA**

Após todos os testes anteriores, o teste 5 é o teste de operação da caldeira sem intensificação acústica que foi a referência de comparação com os testes com intensificação acústicas realizados na sequência. Este teste foi realizado com a grelha na posição horizontal, não inclinada.

Complementando a Tabela 29 com dados da vazão volumétrica de ar levando-se em consideração a grelha e uma carga de 4,2 [kg] de lenha em combustão no leito, se obtém a Tabela 38.

Tabela 38: Relação entre  $h$ ,  $Q$  e  $\dot{m}$  considerando a grelha e 4,2 [kg] de lenha.

Relação ar primário/secundário % de abertura no Damper		$\Delta h$ [mmH <sub>2</sub> O]		$Q_{ar}$ [m <sup>3</sup> /h]			$\dot{m}_{bio}$ [kg/h]
Primário	Secundário	Primário	Secundário	Primário	Secundário	Total	
100	100	26	18	205,57	76,13	281,7	50,39
100	0	26	0	205,57	0	205,57	36,77
0	100	0	31	0	99,91	99,91	17,87
50	50	19	8	175,73	50,75	226,48	40,52
50	100	18	22	171,04	84,16	255,2	45,65
100	50	25	9	201,58	53,83	255,41	45,69

A configuração de ar utilizada neste teste e nos próximos foi de 100% do damper do ar primário aberto e do o damper do ar secundário fechado.

Os números de operação do equipamento para o teste 5 podem ser vistos na Tabela 39 e os números relativos ao período de teste 5 são mostrados na Tabela 40.

Tabela 39: Dados da operação do teste 5.

Hora de início da operação	14:36	
Hora de término da operação	19:26	
Período total de operação	299	[min]
Massa de biomassa queimada na operação	70,14	[kg]
Volume total de água reposta no período da operação	217,38	[L]
Vazão mássica de biomassa no período da operação	14,07	[kg/h]
Massa de cinzas	0,52	[kg]
Massa de vapor (água reposta)	217,38	[kg]
Vazão mássica de vapor	53,67	[kg/h]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

A massa de vapor é considerada a mesma massa de água reposta na caldeira, uma vez que as purgas são desprezíveis.

A vazão mássica de vapor é calculada de acordo com a equação 84.

$$m_{vapor} = \frac{m_{vapor}}{t_{op}} \cdot 60 \left[ \frac{kg}{h} \right] \quad (84)$$

Onde:

$\dot{m}_{bio}$  = Vazão mássica de biomassa [kg/h]

$m_{bio}$  = Massa de biomassa [kg]

$t_{op}$  = Período de operação [min]

Tabela 40: Dados relativos ao período de teste 5.

NÚMEROS DO TESTE 5:		
Hora de início do período de teste	16:45	
Hora de término do período de teste	18:35	
Período total de teste	110	[min]
Massa de biomassa queimada no teste	36,61	[kg]
Volume total de água reposto no período do teste	131,5	[L]
Vazão mássica de biomassa no período do teste	19,97	[kg/h]
Vazão estequiométrica de ar no período do teste	85,86	[m <sup>3</sup> /h]
Vazão volumétrica de ar real no período do teste	205,57	[m <sup>3</sup> /h]
Excesso de ar real ( $\alpha$ )	139,44	[%]
Massa de vapor no período do teste	131,50	[kg]
Vazão mássica de vapor no período do teste	71,73	[kg/h]
Massa total de cinzas da operação	0,52	[kg]
Massa de cinzas do teste	0,27	[kg]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

Os números relativos ao período de teste são os números obtidos durante o período considerado válido para o teste dentro da operação.

A vazão estequiométrica de ar no período do teste pode ser calculada segundo a equação 85 para o período do teste.

$$Q_{est} = V'_{ar} \cdot \dot{m}_{bio} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (85)$$

Sendo

$Q_{est}$  = Vazão estequiométrica de ar [m<sup>3</sup>/h]

$V'_{ar}$  = Vazão específica de ar em [m<sup>3</sup>/kg<sub>bio</sub>]

E:

$V'_{ar}$  é  $V_{ar}$  calculado na equação 14, porém convertido de  $[Nm^3/kg_{bio}]$  para  $[m^3/kg_{bio}]$  corrigido para a temperatura de 20 [°C], conforme equação 86.

$$V'_{ar} = V_{ar} \cdot \frac{273 + 20}{273} \left[ \frac{m^3}{h} \right] \quad (86)$$

A vazão volumétrica de ar real no período do teste é a medida nos manômetros U das placas de orifício nos escoamentos de ar primário e secundário. Foi considerada a da Tabela 38.

O excesso de ar pode então ser calculado conforme equação 87.

$$\alpha = \frac{Q_{real}}{Q_{est}} \quad (87)$$

Sendo

$Q_{real}$  = Vazão volumétrica de ar real  $[m^3/h]$

A massa de cinzas da operação é determinada pela coleta e pesagem das cinzas no cinzeiro após a realização da operação completa e a massa de cinzas do teste é calculada proporcionalmente à massa de biomassa consumida no período do teste pela massa total de biomassa consumida na operação completa, como pode ser visto na equação 88.

$$m_{A\ test} = m_{A\ op} \cdot \frac{m_{bio\ test}}{m_{bio\ op}} [kg] \quad (88)$$

Sendo

$m_{A\ test}$  = Massa de cinzas do teste [kg]

$m_{A\ op}$  = Massa de cinzas da operação [kg]

$m_{bio\ test}$  = Massa de biomassa consumida nos testes [kg]

$m_{bio\ op}$  = Massa de biomassa consumida na operação completa [kg]

Considerando-se a ignição da caldeira como o minuto zero da operação do teste 5, o período de análises considerado para o teste 5 foi do minuto 128 (16:45 h) ao 238 (18:35 h).

A Tabela 41 mostra a operação completa do teste 5.

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos durante a operação do teste 5.

Tabela 41: Operação completa do teste 5.

Hora	Minuto	Ação	Obs	Biomassa [kg]	Água [L]
14:30		Preparação para a ignição	lenha (2,935 kg) + pedaços maiores (0,6 kg) + cavaco (0,195kg) = 3,73kg de biomassa	3,73	
14:36	0	IGNIÇÃO			
14:56	20	Alimentação da fornalha	Coloquei 1,925 kg de pedaços de madeira + 1,98 kg de cavaco (aquecimento)	3,905	
15:18	42	Alimentação da fornalha	1,715 kg de pedaços	1,715	
15:20	44	Alimentação da fornalha	1,96 kg de pedaços	1,96	
15:28	52	Alimentação da fornalha	1,875 kg de pedaços	1,875	
15:33	57	Fechamento de V8	Vapor se inicia em V8 com consequente fechamento da válvula do vapor		
15:44	68	Alimentação da fornalha	1,735 kg + 1,925 kg de pedaços	3,66	
15:52	76	Instalação do termopar B	O cabo foi entregue no dia do teste. Funcionou ok		
15:53	77	Deslocou P	Ponteiro do manômetro se descolou do zero		
15:57	81	Alimentação da fornalha	Início da alimentação só com lenha (3,605+1,5)	5,105	
16:03	87	P=1 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )			
16:11	94	Alimentação da fornalha	lenha: 5,42 kg	5,42	
			INÍCIO 1ª ETAPA DO TESTE		
		Ajuste do ar	100% primário e 0% secundário		
			h=26 mmH <sub>2</sub> O, 205,57 m <sup>3</sup> /h de ar e 36,7 kg/h de biomassa para α=30%		
16:27	110	Alimentação da fornalha	lenha: 6,165 kg	6,165	
16:30	113	Ajuste do ar	50% primário e 50% secundário		
			1° (h=19 mmH <sub>2</sub> O, 175,73 m <sup>3</sup> /h de ar) e 2° (h=8 mmH <sub>2</sub> O, 50,75 m <sup>3</sup> /h de ar)		
			ar total=226,48 m <sup>3</sup> /h de ar, biomassa=40,52 kg/h		
		P=3 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )			
16:37	120	Ajuste do ar	100% primário e 0% secundário		
			h=26 mmH <sub>2</sub> O, 205,57 m <sup>3</sup> /h de ar e 36,7 kg/h de biomassa para α=30%		
		P=4 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )	Atingida a pressão de operação		
16:40	123	Alimentação da fornalha	lenha: 6,12 kg	6,12	
16:45	128	Análise dos gases	Início da tomada de composição de gases no armário Siemens (leito) e no Portátil (chaminé)		
16:56	139	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1207,72 para 1214,47 [L]		6,75
17:00	143	TESTE	1º período de teste válido		
16:58	141	Alimentação da fornalha	lenha: 6,05 kg	6,05	
17:12	155	Alimentação da fornalha	lenha: 5,96 kg	5,96	
17:16	159	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1214,47 para 1230,75 [L]		16,28
		TESTE	2º período de teste válido		
17:29	172	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1230,75 para 1255,59 [L]		24,84
		TESTE	3º período de teste válido		

17:33	176	Alimentação da fornalha	lenha: 6,17 kg	6,17	
17:36	179	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1255,59 para 1260,45 [L]		4,8 6
		TESTE	4º período de teste válido		
17:48	191	Alimentação da fornalha	lenha: 6,135 kg	6,135	
17:53	196	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1260,45 para 1287,69 [L]		27, 24
		TESTE	4º período de teste válido		
18:05	208	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1287,69 para 1295,55 [L]		7,8 6
18:13	216	Alimentação da fornalha	lenha: 6,17 kg (ÚLTIMA ALIMENTAÇÃO DO TESTE)(Caiu a grelha)	6,17	
18:20	223	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1295,55 para 1311,71 [L]		16, 16
18:27	230	P=3 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )	Foi esquecida a V8 aberta após a injeção de água e caiu a pressão a 3 bar (Fechei V8)		
18:28	231	P=4 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )			
18:29	232	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1311,71 para 1339,22 [L]		27, 51
18:34	237	Ajuste do ar	50% primário e 50% secundário		
			1° (h=19 mmH <sub>2</sub> O, 175,73 m <sup>3</sup> /h de ar) e 2° (h=19 mmH <sub>2</sub> O, 50,75 m <sup>3</sup> /h de ar)		
			ar total=226,48 m <sup>3</sup> /h de ar, biomassa=40,52 kg/h		
18:35	238	Fim da análise dos gases	Fim do registro da composição de gases		
18:47	250	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1339,22 para 1342,46 [L]		3,2 4
18:48	251	Início do fim do teste	Abertura de V8 (saída de vapor) para baixar a pressão		
18:50	253	P=3 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )			
18:53	256	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1342,46 para 1368,8 [L]		26, 34
			Abertura maior de V8		
18:55	258	P=1 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )	Abertura total de V8 e desligamento do soprador		
18:59	262	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1368,8 para 1375,98 [L]		7,1 8
		P=0 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ainda sai vapor		
19:05	268	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1375,98 para 1399,75 [L]		23, 77
19:14	277	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1399,75 para 1406,08 [L]		6,3 3
19,26	299	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1406,08 para 1423,34 [L]		17, 26
			FIM DO TESTE		
		24 HORAS DEPOIS	24 HORAS DEPOIS - 22/12/2016		
		Coleta das cinzas:	0,65 kg de cinzas		
		Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1423,34 para 1425,1 [L]		1,7 6

Apresentam-se a seguir os resultados obtidos durante a operação do teste 5.

### 5.5.1 RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 5

Apresentam-se a seguir as temperaturas e composições de gases obtidas durante a realização do teste 5. Apesar do sistema de aquisição manter um registro de temperatura a cada 2 segundos, o que gera uma grande quantidade de dados, foi amostrado um registro de temperatura a cada 5 minutos de teste. Isso, para que se pudesse fazer coincidir com a frequência de amostragem das composições de gases, tanto no leito, quanto na chaminé.

A Tabela 42 mostra as temperaturas amostradas durante o período de teste. Destaca-se que o minuto zero se refere ao início do período de amostragem.

A Tabela 43 mostra a composição de gases obtida no leito da câmara de combustão e a Tabela 44 mostra a composição de gases obtida na chaminé durante o teste 5.

Tabela 42: Temperaturas obtidas no teste 5.

Hora (real)	Tempo [min]	Temperaturas obtidas no teste 5 - Sem intensificação acústica							
	Tempo [min]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	T4 [°C]	T5 [°C]	T6 [°C]	T7 [°C]	T8 [°C]
16:50	0	416,00	763,20	73,30	238,90	31,10	128,20	36,50	473,00
16:55	5	448,90	781,60	73,30	245,90	25,20	130,20	36,50	569,00
17:00	10	466,80	713,90	71,20	237,70	25,30	128,60	36,50	579,00
17:05	15	500,70	671,70	70,70	229,00	25,40	104,40	41,10	626,00
17:10	20	578,30	724,50	76,00	242,00	25,60	129,20	40,20	536,00
17:15	25	577,60	711,20	74,60	245,60	25,90	130,30	39,30	613,00
17:20	30	553,60	686,40	79,30	240,20	25,70	121,40	38,60	593,00
17:25	35	626,30	721,70	77,20	268,60	26,00	122,70	39,50	512,00
17:30	40	680,20	651,60	70,80	256,60	26,10	127,20	38,40	522,00
17:35	45	705,50	509,80	68,30	247,80	26,30	130,50	38,80	594,00
17:40	50	701,50	461,30	69,10	231,00	26,10	118,60	37,90	647,00
17:45	55	490,30	556,60	73,90	254,50	26,20	85,80	37,70	477,00
17:50	60	470,20	501,30	72,10	255,20	26,20	132,60	36,90	535,00
17:55	65	461,50	481,10	72,90	245,30	26,30	129,90	36,10	581,00
18:00	70	600,80	537,70	90,50	249,70	26,30	128,50	36,80	580,00
18:05	75	648,20	502,20	84,40	256,40	26,70	131,80	36,10	659,00
18:10	80	640,10	453,00	82,90	244,90	26,70	127,50	35,50	678,00
18:15	85	491,50	466,40	85,70	236,70	26,70	119,50	35,80	688,00
18:20	90	496,70	557,80	81,00	232,60	26,60	124,50	35,30	600,00
18:25	95	531,50	762,50	91,90	292,70	26,80	133,40	34,80	547,00
18:30	100	467,10	757,40	90,90	279,70	26,80	116,40	35,40	507,00
18:35	105	439,70	616,10	84,40	262,50	26,80	132,70	34,80	442,00

Tabela 43: Composição de gases no leito da câmara de combustão durante o teste 5.

hora	tempo [min]	H <sub>2</sub> [vol%]	CO [%]	CH <sub>4</sub> [vol%]	O <sub>2</sub> [%]
16:50	0	1,298	0,38	0	14,19
16:55	5	1,303	0,21	0	14,35
16:55	10	1,35	0	0	15,52
17:00	15	1,331	0	0	15,34
17:05	20	1,308	0,03	0	15,02
17:10	25	1,291	0,02	0	14,84
17:15	30	1,3	0,05	0	14,81
17:20	35	1,292	0,06	0	14,75
17:25	40	1,262	0,13	0	14,35
17:30	45	1,259	0,12	0	14,38
17:35	50	1,212	0,1	0	14,48
17:40	55	1,223	0	0	14,86
17:45	60	1,247	0	0	14,95
17:50	65	1,277	0	0	15,2
17:55	70	1,251	0	0	14,95
18:00	75	1,254	0	0	14,87
18:05	80	1,236	0	0	14,72
18:10	85	1,245	0	0	14,78
18:15	90	1,239	0	0	14,81
18:20	95	1,243	0	0	14,75
18:25	100	1,254	0	0	14,96
18:30	105	1,248	0	0	14,85

Tabela 44: Composição de gases na chaminé durante o teste 5.

hora	tempo [min]	O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>2</sub> [ppm]	NO [ppm]	H <sub>2</sub> S [ppm]	CO <sub>2</sub> [%]	CO [ppm]
16:50	0	10,1	0	81	0	9,98	513,70
16:55	5	14,1	0	74,4	0	10,91	2.063,70
17:00	10	10,8	0	71,4	0	10,62	1.877,80
17:05	15	9,7	0	109,6	0	17,75	2.906,80
17:10	20	8,3	0	96,7	0	17	1.270,70
17:15	25	9,9	0	82,7	0	13,03	1.504,30
17:20	30	12,1	0	77,3	0	12,09	1.525,70
17:25	35	12,8	0	74,3	0	11,92	1.531,10
17:30	40	15,1	0	62,5	0	10,27	1.700,10
17:35	45	16,4	0	59,1	0	9,52	1.808,20
17:40	50	16,4	0	60	0	9,41	1.914,50
17:45	55	18,9	0	6,4	2,1	9,94	1.655,40
17:50	60	19,4	0	9,6	5,6	9,71	1.608,60
17:55	65	20,1	0	9	1,7	9,33	1.650,40
18:00	70	20,1	0	10	3,2	9,07	1.649,00
18:05	75	21	2,6	2,9	9,6	9,17	1.854,20
18:10	80	20,9	1,6	6,6	7,2	9,18	2.100,10
18:15	85	21,7	2,6	0,8	5,7	8,38	1.891,10
18:20	90	21,4	2,9	2,8	11	8,27	1.985,70
18:25	95	20,8	3,8	2,9	14,3	12,32	3.650,00
18:30	100	21,7	2,8	4,1	17,4	10,03	4.100,40
18:35	105	21,5	0,8	2,7	12,6	9,3	4.230,40

No capítulo 6 foram apresentadas as análises destes resultados, além da análise dos resultados dos testes 6 e 7 que são apresentados a seguir.

## 5.6 TESTE 6: 23/12/2016-COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA E FALHA DO SPEAKER

Ao final do teste 5, já se possuía dados sobre a operação sem intensificação acústica. Precisava-se agora realizar a operação com intensificação acústica. O teste 6 foi a operação com intensificação acústica planejada no capítulo 3. Foi usada a mesma configuração da grelha, mesmos parâmetros operacionais na caldeira, porém com a utilização da caixa de som e do gerador de frequências detalhados no item 3.4.1.5. A única diferença foi que o speaker

tinha 400 [W] de potência e não 500 [w] como informado pela University of Iowa, que gentilmente cedeu o equipamento.

Usaram-se as equações 37 e 41 para ajustar os valores calculados de potência sonora e pressão acústica à nova potência fornecida do equipamento de 400 [W]. Os valores ajustados podem ser vistos na Tabela 45.

Tabela 45: Valores de potência sonora e pressão acústica para a potência real de 400 [W].

Cálculo de Potência Sonora			
$W_r =$	400	[W]	Potência real do equipamento
$W_{ref} =$	1,00E-12	[W]	Potência de referência
$PWL =$	146,02	[dB]	Nível de potência sonora
Cálculo de Pressão Acústica			
$SPL = PWL =$	146,02	[dB]	Nível de potência sonora
$P_{ref} =$	2,00E-05	[Pa]	Pressão de referência
$P_r =$	<b>400,00</b>	<b>[Pa]</b>	Pressão acústica real

O teste 6 seria realizado com a variação de 6 valores de frequências entre 0 e 200 [Hz] , que é a faixa de resposta do speaker em questão. O teste se iniciou e no final do período de aquecimento da caldeira, quando já se tinha pressão registrada no manômetro foi acionado o SA em 40 [Hz], 10 [Vpp] de amplitude, 50 [ $\Omega$ ] de impedância e 90 [%] do volume do speaker.

Como já foi detalhado no item 4.5, o speaker operou durante 20 minutos, do minuto 155 (10:31) até o minuto 166 (10:52) e parou.

Os números da operação do teste 6 podem ser vistos na Tabela 46, e os números referentes ao período de teste com a intensificação acústica podem ser vistos na Tabela 47.

Tabela 46: Números da operação do teste 6.

Hora de início da operação	08:02	
Hora de término da operação	12:27	
Minuto de início da operação	0	
Minuto de término da operação	265	
Período total de operação	265	[min]
Massa de biomassa queimada na operação	33,46	[kg]
Volume total de água reposta no período da operação	74,20	[L]
Vazão mássica de biomassa no período da operação	7,57	[kg/h]
Massa de cinzas	0,41	[kg]
Massa de vapor (água reposta)	74,20	[kg]
Vazão mássica de vapor	16,80	[kg/h]
Pressão de operação da caldeira	4 (não atingida)	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

Tabela 47: Números relativos ao período de teste 6.

NÚMEROS DO TESTE 6:		
Hora de início do período de teste	10:31	
Hora de término do período de teste	10:52	
Minuto de início do período de teste	149	
Minuto de término do período de teste	170	
Período total de teste	21	[min]
Massa de biomassa queimada no teste	4,31	[kg]
Volume total de água reposta no período do teste	0	[L]
Vazão mássica de biomassa no período do teste	12,30	[kg/h]
Vazão estequiométrica de ar no período do teste	52,89	[m <sup>3</sup> /h]
Vazão volumétrica de ar real no período do teste	205,57	[m <sup>3</sup> /h]
Excesso de ar real ( $\alpha$ )	288,67	[%]
Massa de vapor no período do teste	0,00	[kg]
Vazão mássica de vapor no período do teste	0,00	[kg/h]
Massa de cinzas da operação	0,41	[kg]
Pressão de operação da caldeira	4 (não atingida)	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

A operação completa do teste 6 pode ser vista na Tabela 48.

Tabela 48: Operação completa do teste 6.

Hora	Minuto	Ação	Obs	Biomassa [kg]	Água [L]
07:54		Preparação para a ignição	lenha (2,905 kg) + pedaços maiores (0,85 kg) + cavaco (0,225kg) = 3,965kg de biomassa	3,97	
08:02	0	IGNIÇÃO			
08:10	8	Ajuste do ar	50% primário e 50% secundário (Aquecimento da caldeira)		

			1° (h=19 mmH <sub>2</sub> O, 175,73 m <sup>3</sup> /h de ar) e 2° ( h=8 mmH <sub>2</sub> O, 50,75 m <sup>3</sup> /h de ar)		
			ar total=226,48 m <sup>3</sup> /h de ar, biomassa=40,52 kg/h		
08:20	18	Alimentação da fornalha	1,625 kg de pedaços	1,63	
08:38	36	Alimentação da fornalha	1,835 kg de pedaços	1,84	
08:50	48	Alimentação da fornalha	0,7 kg de pedaços +2,105 kg de lenha	2,81	
			Acabaram os pedaços grandes. Continua o aquecimento com lenha		
09:02	60	Alimentação da fornalha	lenha: 3,005 kg	3,01	
09:12	70	Ajuste do ar	100% primário e 0% secundário (Configuração do teste)		
			h=26 mmH <sub>2</sub> O, 205,57 m <sup>3</sup> /h de ar e 36,7 kg/h de biomassa para $\alpha=30\%$		
09:22	80	Alimentação da fornalha	lenha: 3,54 kg	3,54	
09:32	90	Purga de água	Purga de 15 mm de água		
09:35	93	Alimentação da fornalha	lenha: 3,7 kg	3,70	
		Introdução do Termopar B			
09:42	100	Fechamento de V8	Vapor se inicia em V8 com consequente fechamento da válvula do vapor		
10:01	119	Alimentação da fornalha	lenha: 4,39 kg	4,39	
10:12	130	Deslocou P	Ponteiro do manômetro se descolou do zero		
10:24	142	Alimentação da fornalha	lenha: 4,285 kg	4,29	
		Acionamento do circ da sonda	Acionamento do circuito da sonda e introdução da mesma na câmara de combustão		
10:31	149	Acionamento do SA	SA acionado (f=40Hz, Amplitude= 10 Vpp, Impedância = 50 ohm, Vol do speaker=90%)		
10:36	154	Purga de água	Purga de 15 mm de água		
10:37	155	P=2 bar (kgf/cm <sup>2</sup> )			
10:41	159	Alimentação da fornalha	lenha: 4,305 kg	4,31	
10:52	170	Parada do do SA	Queima da bobina do auto falante, do circuito de amplificação e do transformador		
			TESTE ENCERRADO PARA VERIFICAÇÃO		
11:30	208	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1425,1 para 1456,88 [L]		31,78
12:00	238	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1456,88 para 1461,5 [L]		4,62
12:27	265	Fim do teste	FINAL DO TESTE (FRUSTRADO)		
		Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1461,5 para 1475,88 [L]		14,38
		Dados Posteriores	Dados coletados antes do teste 7 em 06/01/2017		
		Coleta das cinzas:	0,41 kg de cinzas		
		Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1475,88 para 1499,30[L]		23,42

Mesmo com pouco tempo de operação, os resultados são interessantes e estão mostrados a seguir.

### 5.6.1 RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 6

Apresentam-se a seguir as temperaturas e composições de gases obtidas durante o período de teste 6. A frequência de amostragem é a mesma definida para o teste 5.

A Tabela 49 mostra as temperaturas amostradas durante o período de teste. Destaca-se que o minuto zero se refere se refere a 24 minutos antes do acionamento do SA, para que se tenha um espectro amostral suficiente para destacar o período de teste com a intensificação acústica operante. Após a falha do speaker, continuou-se amostrando as temperaturas e as composições de gases até o final da operação.

Tabela 49: Temperaturas obtidas no teste 6 com intensificação acústica.

Hora (real)	Tempo [min]	Temperaturas obtidas no teste 6 com intensificação acústica							
	Tempo [min]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
10:07	0	409,10	576,90	48,10	175,50	25,10	37,90	31,60	320,00
10:12	5	457,70	544,00	47,40	199,60	25,20	36,40	31,80	612,00
10:17	10	355,40	410,70	44,20	186,70	25,30	35,40	32,00	612,00
10:22	15	302,60	374,10	41,20	173,30	25,50	34,80	32,30	490,00
10:27	20	251,80	397,30	41,00	162,10	25,80	34,40	32,60	372,00
10:31	24	299,30	467,40	40,70	181,30	25,70	34,20	32,80	411,00
10:32	25	332,70	476,70	40,50	184,70	25,70	34,00	32,90	526,00
10:37	30	354,90	453,20	38,70	183,70	25,70	33,60	33,20	609,00
10:42	35	292,50	372,40	38,60	174,20	25,80	33,20	33,20	633,00
10:47	40	410,10	557,10	41,60	198,00	26,00	33,20	33,30	692,00
10:52	45	358,60	523,80	42,50	198,60	26,00	33,40	33,30	696,00
10:57	50	314,80	489,40	41,70	191,30	26,10	33,50	33,30	602,00
11:02	55	291,40	419,40	41,30	181,00	26,20	33,50	33,30	536,00
11:07	60	285,60	350,70	41,20	173,10	26,20	33,50	33,60	475,00
11:12	65	281,80	324,90	41,50	167,20	26,20	33,50	33,90	465,00
11:17	70	266,70	299,80	41,50	161,10	26,30	33,50	34,10	413,00
11:22	75	257,30	292,30	41,80	156,50	26,40	128,80	34,30	363,00
11:27	80	239,60	243,40	54,10	145,10	26,40	124,50	34,60	305,00
11:32	85	222,10	210,60	80,90	136,40	26,50	116,70	36,10	277,00
11:37	90	203,90	195,10	89,40	125,30	26,70	112,30	35,90	250,00
11:42	95	192,00	182,60	90,60	118,50	27,10	108,80	35,60	250,00
11:47	100	188,80	175,60	89,60	114,00	27,40	105,60	35,60	250,00
11:52	105	186,20	180,30	87,00	110,70	27,70	102,80	36,40	250,00
11:57	110	181,10	178,60	85,20	106,90	27,90	100,90	36,40	250,00
12:02	115	174,10	173,50	82,90	104,00	28,10	99,00	36,20	250,00
12:07	120	167,40	173,80	81,50	101,60	28,30	98,30	36,10	250,00
12:12	125	161,50	167,70	80,50	99,00	28,40	98,70	36,90	250,00
12:17	130	154,70	159,30	79,10	96,00	28,50	98,10	36,70	250,00

A Tabela 50 mostra a composição de gases no leito da câmara de combustão e a Tabela 51 mostra a composição dos gases na chaminé para o período do teste considerado.

Tabela 50: Composição de gases no leito da câmara de combustão obtida no teste 6.

hora	tempo [min]	H <sub>2</sub> [vol%]	CO [%]	CH <sub>4</sub> [vol%]	O <sub>2</sub> [%]
10:32	0	1,385	0	0	16,52
10:37	5	1,321	0	0	16,31
10:42	10	1,401	0	0	16,42
10:47	15	1,37	0,19	0	15,65
10:52	20	1,326	0,21	0	15,38
10:57	25	1,348	0,06	0	15,7
11:02	30	1,397	0	0	16,21
11:07	35	1,413	0	0	16,31
11:12	40	1,415	0	0	16,24
11:17	45	1,402	0	0	16,16
11:22	50	1,415	0	0	16,26
11:27	55	1,426	0	0	16,38
11:32	60	1,436	0	0	16,45
11:37	65	1,443	0	0	16,51
11:42	70	1,454	0	0	16,63
11:47	75	1,459	0	0	16,63
11:52	80	1,461	0	0	16,63
11:57	85	1,462	0	0	16,6
12:02	90	1,461	0	0	16,59
12:07	95	1,463	0	0	16,57

Tabela 51: Composição de gases na chaminé obtida no teste 6.

hora	tempo [min]	O <sub>2</sub> [%]	NO <sub>2</sub> [ppm]	NO [ppm]	CO <sub>2</sub> [%]	H <sub>2</sub> S [ppm]	CO [ppm]	CxHy [%]
10:07	0	21,2	0	3,4	3,89	0	3.182,50	0,09
10:12	5	20,3	0	8,3	6,56	0	3.547,50	0,07
10:17	10	20,9	0	2,3	6,75	2,7	2.172,40	0,04
10:22	15	19,7	0	1,3	6,08	1	2.349,30	0,04
10:27	20	18,1	0	8,4	4,48	0	2.120,00	0,04
10:32	25	20	0	9,8	4,96	0	1.879,50	0,04
10:37	30	16,5	0,8	26,1	5,52	1	356,70	0,01
10:42	35	18	0	20,6	4,97	0	873,60	0,02
10:47	40	18	0	34,6	5,77	0	1.065,00	0,03
10:52	45	16,9	0	34,5	6,92	0	792,10	0,03
10:57	50	17,4	0	30	6,14	0	753,30	0,03
11:02	55	18,5	0	23,2	5,42	0	945,30	0,04
11:07	60	19,4	0	17,6	4,76	0	1.200,50	0,05
11:12	65	19,9	0	15,9	4,34	0	1.474,00	0,06
11:17	70	20,6	0	12,4	3,94	0	1.658,50	0,07
11:22	75	21,1	0	9,7	3,53	0	1.930,40	0,07
11:27	80	24,1	0	0	3,27	1,7	1.885,40	0,08
11:32	85	22,7	0	0	3,06	0	2.023,00	0,09
11:37	90	23,5	0	0	2,98	1,8	2.005,60	0,08
11:42	95	20,08	0	0	2,8	0	2.548,20	0,1
11:47	100	21,4	0	0	2,64	0	2.825,20	0,08
11:52	105	21,4	0	0	2,54	0	2.662,40	0,07
11:57	110	21,1	0	0	2,42	0	2.510,80	0,07
12:02	115	21,6	0	0	2,37	0	2.153,10	0,06
12:07	120	21	0	0	2,39	0	1.927,00	0,04

No capítulo 6 foram apresentadas as análises destes resultados, além da análise dos resultados do teste 7 que é apresentado a seguir.

## 5.7 TESTE 7: 06/01/2017-COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA

O teste 7 foi o último realizado com os mesmos parâmetro operacionais do teste 5. O SA foi alterado com relação ao utilizado no teste 6, pois, como já foi detalhado no item 4.5, apesar de operar com a mesma caixa de som e com o mesmo speaker reconicionado, a amplificação passou para 200 [W].

Novamente foram usadas as equações 37 e 41 para ajustar os valores calculados de potência sonora e pressão acústica à potência fornecida do equipamento amplificador de 200 [W]. Os valores ajustados podem ser vistos na Tabela 52

Tabela 52: Valores de potência sonora e pressão acústica para a potência real de 200 [W].

Cálculo de Potência Sonora			
$W_r =$	200	[W]	Potência real do equipamento
$W_{ref} =$	1,00E-12	[W]	Potência de referência
PWL =	143,01	[dB]	Nível de potência sonora
Cálculo de Pressão Acústica			
SPL= PWL=	143,01	[dB]	Nível de potência sonora
$P_{ref} =$	2,00E-05	[Pa]	Pressão de referência
$P_r =$	<b>282,84</b>	<b>[Pa]</b>	Pressão acústica real

Foram testadas três frequências, 60, 75 e 90 Hz, pois a faixa de resposta do amplificador Taramps de 200 [W] utilizado era de 50 a 100 Hz. O SA foi acionado em intervalos de 10 minutos com dois minutos de intervalo em média, para evitar o superaquecimento da bobina. Houve três períodos de operação a 60 [Hz], quatro a 75 [Hz] e cinco a 90 [Hz]. O SA foi operado em todas as frequências em 15 [Vpp] de amplitude, e 0 [ $\Omega$ ] de impedância. O teste 7 foi o mais longo realizado, sendo iniciada sua operação às 12:47 e encerrada às 20:00. A Tabela 53 mostra os números da operação do teste 7.

Tabela 53: Números da operação do teste 7.

NÚMEROS DA OPERAÇÃO DO TESTE 7		
Hora de início da operação	12:47	
Hora de término da operação	20:00	
Minuto de início da operação	0	
Minuto de término da operação	432	
Período total de operação	432	[min]
Massa de biomassa queimada na operação	92,17	[kg]
Volume total de água reposta no período da operação	304,28	[L]
Vazão mássica de biomassa no período da operação	12,80	[kg/h]
Massa de cinzas	0,85	[kg]
Massa de vapor (água repostada)	304,28	[kg]
Vazão mássica de vapor	42,26	[kg/h]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

A Tabela 54 mostra os números relativos ao período de testes em 60 Hz.

Tabela 54: Números do período de teste em 60 Hz.

NÚMEROS DO TESTE 7: 60 Hz		
Minuto de início do período de teste	164	
Minuto de término do período de teste	203	
Período total de teste	39	[min]
Massa de biomassa queimada no teste	13,61	[kg]
Vazão mássica de biomassa no período do teste	20,93	[kg/h]
Vazão estequiométrica de ar no período do teste	90,00	[m <sup>3</sup> /h]
Vazão volumétrica de ar real no período do teste	90,00	[m <sup>3</sup> /h]
Excesso de ar real ( $\alpha$ )	128,41	[%]
Massa de vapor no período do teste	15,72	[kg]
Vazão mássica de vapor no período do teste	24,18	[kg/h]
Massa de cinzas total da operação	0,85	[kg]
Fração de cinzas do período em análise	0,13	[kg]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

A Tabela 55 mostra os números relativos ao período de testes em 75 Hz.

Tabela 55: Número do período de teste em 75 Hz.

NÚMEROS DO TESTE 7: 75 Hz		
Minuto de início do período de teste	209	
Minuto de término do período de teste	262	
Período total de teste	53	[min]
Massa de biomassa queimada no teste	18,25	[kg]
Vazão mássica de biomassa no período do teste	20,65	[kg/h]
Vazão estequiométrica de ar no período do teste	88,82	[m <sup>3</sup> /h]
Vazão volumétrica de ar real no período do teste	205,57	[m <sup>3</sup> /h]
Excesso de ar real ( $\alpha$ )	128,41	[%]
Massa de vapor no período do teste	73,92	[kg]
Vazão mássica de vapor no período do teste	83,68	[kg/h]
Massa de cinzas total da operação	0,85	[kg]
Fração de cinzas do período em análise	0,17	[kg]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

A Tabela 56 mostra os números relativos ao período de testes em 90 Hz.

Tabela 56: Número do período de teste em 90 Hz.

NÚMEROS DO TESTE 7: 90 Hz		
Minuto de início do período de teste	268	
Minuto de término do período de teste	339	
Período total de teste	71	[min]
Massa de biomassa queimada no teste	22,78	[kg]
Vazão mássica de biomassa no período do teste	19,25	[kg/h]
Vazão estequiométrica de ar no período do teste	82,78	[m <sup>3</sup> /h]
Vazão volumétrica de ar real no período do teste	205,57	[m <sup>3</sup> /h]
Excesso de ar real ( $\alpha$ )	148,34	[%]
Massa de vapor no período do teste	76,19	[kg]
Vazão mássica de vapor no período do teste	64,39	[kg/h]
Massa de cinzas total da operação	0,85	[kg]
Fração de cinzas do período em análise	0,21	[kg]
Pressão de operação da caldeira	4	[kgf/cm <sup>2</sup> ]

A operação completa do teste 7 pode ser vista na Tabela 57.

Tabela 57: Operação completa do teste 7.

Hora	Minuto	Ação	Obs	Biomassa [kg]	Água [L]
07:54		Preparação para a ignição	lenha (1,265kg) + pedaços maiores (1,735kg) + cascas (0,135kg) = 3,135kg de biomassa	3,965	
12:47	0	IGNIÇÃO			
12:54	7	Ajuste do ar	50% primário e 50% secundário (Aquecimento da caldeira) 1° (h=19 mmH <sub>2</sub> O, 175,73 m <sup>3</sup> /h de ar) e 2° (h=8 mmH <sub>2</sub> O, 50,75 m <sup>3</sup> /h de ar)		
			ar total=226,48 m <sup>3</sup> /h de ar, biomassa=40,52 kg/h		
13:00	13	Alimentação da fornalha	1,59 kg de pedaços +1,365 kg de lenha	2,955	
13:12	25	Alimentação da fornalha	1,69 kg de pedaços +1,465 kg de lenha	3,155	
13:31	44	Alimentação da fornalha	lenha: 3,765 kg	3,765	
13:50	63	Alimentação da fornalha	lenha: 3,91 kg	3,91	
14:00	73	Purga de água	Purga de 9 mm de água (Temp do vapor = 51,2°C)		
14:03	76	Alimentação da fornalha	lenha: 3,66 kg	3,66	
14:17	90	Fechamento de V8	Vapor se inicia em V8 com conseqüente fechamento da válvula do vapor (T6=98,7°C)		
14:24	97	Alimentação da fornalha	lenha: 3,44 kg	3,44	
14:37	110	Alimentação da fornalha	lenha: 3,2 kg	3,2	
14:43	116	Purga de água	Purga de 6 mm de água (T6= 100°C)		
14:51	123	Deslocamento de P	Ponteiro da Pressão de desloca do zero		
14:56	128	Temperaturas externas	Em cima da fornalha (saída da chaminé)=96°C		
			Parede da fornalha=39° C		

			Trazeira do tubulão (onde se acessam os tubos)=68°C		
14:59	131	P=1 bar (kgf/cm2)			
15:00	132	Ajuste do ar	100% primário e 0% secundário (Configuração do teste) h=26 mmH <sub>2</sub> O, 205,57 m <sup>3</sup> /h de ar e 36,7 kg/h de biomassa para α=30%		
15:05	137	Alimentação da fornalha	lenha: 4,735 kg	4,735	
15:12	144	P=2 bar (kgf/cm2)			
15:16	148	Início das análises de gases	OBS: Relógio Joarês= meu. Relógio Dna Ester 1 min adiantado (corrigido nas tabelas)		
15:21	153	P=3 bar (kgf/cm2)			
15:23	155	Purga de água	Purga de 10 mm de água (Temp do vapor = ?C)		
15:26	158	Alimentação da fornalha	lenha: 4,75 kg	4,75	
15:32	164	P=4 bar (kgf/cm2)	Início do regime de operação		
15:32	164	Acionamento SA	1º período de teste (60Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
15:43	175	Desligamento SA			
15:45	177	Alimentação da fornalha	lenha: 4,415 kg	4,415	
15:45	177	Acionamento SA	2º período de teste (60Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
15:55	187	Alimentação da fornalha	lenha: 4,50 kg	4,5	
15:57	189	Desligamento SA			
15:58	190	Alimentação da fornalha	lenha: 4,69 kg	4,69	
15:59	191	Acionamento SA	3º período de teste (60Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
16:02	194	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1499,3 para 1507,72 [L] (31 mm a T6=125,8°C)		8,42
16:11	203	Desligamento SA	OBS: água 4mm acima do máximo p tentar suportar 3 alimentações de lenha e		
16:11	203	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1507,72 para 1515,02 [L]		7,3
16:15	207	Alimentação da fornalha	lenha: 4,575 kg	4,575	
16:17	209	Acionamento SA	1º período de teste (75Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
16:26	218	Desligamento SA			
16:28	220	Alimentação da fornalha	lenha: 4,51 kg	4,51	
16:30	222	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1515,02 para 1535,88 [L] (35 mm a T6=130°C)		20,86
16:34	226	Acionamento SA	2º período de teste (75Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
16:43	235	Desligamento SA			
16:44	236	Alimentação da fornalha	lenha: 4,605 kg	4,605	
16:45	237	Acionamento SA	3º período de teste (75Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
16:51	243	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1535,88 para 1566,42 [L] (33 mm a T6=136°C)		30,54
16:56	248	Desligamento SA			
16:57	249	Alimentação da fornalha	lenha: 4,555 kg	4,555	
16:58	250	Acionamento SA	4º período de teste (75Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
17:10	262	Desligamento SA			
17:10	262	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1566,42 para 1588,94 [L] (33 mm a T6=128,2°C)		22,52
17:13	265	Alimentação da fornalha	lenha: 4,545 kg	4,545	
17:16	268	Acionamento SA	1º período de teste (90Hz, 15 Vpp, 0Ω)		

17:27	279	Medida a vazão no 1°	Vazão volumétrica de ar no primário: h=29 mm		
17:28	280	Desligamento SA			
17:28	280	Alimentação da fornalha	lenha: 4,385 kg	4,385	
17:32	284	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1588,94 para 1600,89 [L] (37 mm a T6=129°C)		11,95
17:36	288	Acionamento SA	2° período de teste (90Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
17:45	297	Desligamento SA			
17:47	299	Alimentação da fornalha	lenha: 4,73 kg	4,73	
17:48	300	Acionamento SA	3° período de teste (90Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
17:50	302	Temperaturas externas	Em cima da fornalha (saída da chaminé)=117°C		
			Parede da fornalha=43° C		
			Trazeira do tubulão (onde se acessam os tubos)=116°C		
17:58	310	Desligamento SA			
17:59	311	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1600,89 para 1633,26 [L] (33 mm a T6=129,2°C)		32,37
18:01	313	Alimentação da fornalha	lenha: 4,59 kg	4,59	
18:02	314	Acionamento SA	4° período de teste (90Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
18:13	325	Desligamento SA			
18:16	328	Alimentação da fornalha	lenha: 4,53 kg (ÚLTIMA ALIMENTAÇÃO DO TESTE)	4,53	
18:16	328	Acionamento SA	5° período de teste (90Hz, 15 Vpp, 0Ω)		
18:21	333	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1633,26 para 1665,13 [L] (31 mm a T6=129°C)		31,87
18:27	339	Desligamento SA			
			INICIADO O PROCESSO DE DESLIGAMENTO DA CALDEIRA		32
18:45	357	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1665,13 para 1695,91 [L] (32 mm a T6=125°C)		30,78
19:07	379	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1695,91 para 1728,88 [L] (33 mm a T6=125°C)		32,97
19:35	407	Reposição de água	Injeção de água na caldeira pela bomba de 1728,88 para 1748,16 [L]		19,28
20:00	432	Fim do teste	FINAL DO TESTE (SUCESSO)		
		Dados Posteriores	Dados coletados antes do teste 7 em 06/01/2017		
		Coleta das cinzas:	0,85 kg de cinzas		
			Água 5 mm acima do nível mínimo (15 mm entre mínimo e máximo na garrafa)		
			Água 5 mm acima do nível mínimo		23,42

## 5.7.1 RESULTADOS OBTIDOS NO TESTE 7

Apresentam-se a seguir as temperaturas e composições de gases obtidas durante o período de teste 7. A Tabela 58 mostra as temperaturas obtidas durante o período de teste total, ou seja, para as três frequências.

Tabela 58: Temperaturas obtidas no teste 7 com intensificação acústica.

Hora (real)	Tempo [min]				Temperaturas obtidas no teste 7 com intensificação acústica							
	Tempo [min]	Intensif. acústica (lig /desl) 60 [Hz]	Intensif. acústica (lig /desl) 75 [Hz]	Intensif. acústica (lig /desl) 90 [Hz]	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
15:16	0	0	0	0	337,40	664,70	47,40	214,80	25,90	98,20	37,90	250,00
15:21	5	0	0	0	296,50	634,90	47,20	202,80	26,00	99,20	38,20	406,00
15:26	10	0	0	0	287,20	536,90	47,60	188,60	26,10	111,00	38,20	396,00
15:31	15	0	0	0	299,70	688,70	48,60	211,40	26,30	99,10	37,90	311,00
15:32	16	1	0	0	308,80	676,70	48,60	215,10	26,30	98,80	37,80	318,00
15:36	20	1	0	0	333,00	551,40	44,40	215,10	26,50	123,30	37,40	389,00
15:41	25	1	0	0	317,70	675,40	44,70	214,30	26,50	125,80	37,00	376,00
15:43	27	0	0	0	309,70	621,20	44,40	208,20	26,50	125,70	36,90	399,00
15:45	29	1	0	0	304,20	535,20	42,30	204,00	26,50	125,50	36,90	386,00
15:46	30	1	0	0	295,80	431,30	42,60	203,60	26,50	125,40	36,90	355,00
15:51	35	1	0	0	357,00	371,50	44,50	211,50	26,60	123,80	36,60	405,00
15:56	40	1	0	0	373,90	412,30	43,70	210,80	26,70	126,50	36,30	585,00
15:57	41	0	0	0	368,70	459,20	43,90	211,60	26,70	126,90	36,20	603,00
15:59	43	1	0	0	354,20	560,60	44,60	223,80	26,70	127,30	36,10	480,00
16:01	45	1	0	0	356,90	599,20	46,10	239,00	26,70	127,10	35,90	424,00
16:06	50	1	0	0	394,20	743,60	44,90	248,80	26,90	102,00	38,60	531,00
16:11	55	0	0	0	349,50	698,00	44,20	245,70	27,00	129,10	37,40	550,00
16:16	60	0	0	0	331,80	635,60	42,80	232,10	26,90	123,50	37,80	451,00
16:17	61	0	1	0	320,60	501,50	43,10	238,00	26,90	121,10	37,60	427,00
16:21	65	0	1	0	314,60	563,60	43,10	249,70	27,10	118,40	37,00	496,00
16:26	70	0	0	0	323,00	561,30	43,00	251,10	27,20	132,40	36,00	516,00
16:31	75	0	0	0	345,70	661,10	48,20	270,30	27,40	128,00	35,20	389,00
19:34	78	0	1	0	353,50	637,10	47,20	282,40	27,40	131,00	36,30	341,00
16:36	80	0	1	0	351,50	636,80	47,20	281,80	27,50	128,30	35,80	337,00
16:41	85	0	1	0	342,10	539,50	46,50	265,90	27,50	132,60	34,60	341,00
16:43	87	0	0	0	333,50	509,20	45,80	257,10	27,50	132,10	34,30	320,00
16:45	89	0	1	0	316,90	476,70	45,70	251,50	27,60	131,90	33,90	304,00
16:46	90	0	1	0	306,30	481,50	45,70	253,80	27,60	132,40	33,70	294,00
16:51	95	0	1	0	317,90	553,20	45,20	266,40	27,70	134,60	33,90	370,00
16:56	100	0	0	0	325,50	544,60	42,50	257,80	27,80	117,90	33,10	377,00

16:58	102	0	1	0	359,60	553,00	41,50	256,40	27,70	115,60	32,60	438,00
17:01	105	0	1	0	330,00	504,60	46,00	259,80	27,80	131,60	32,20	415,00
17:06	110	0	1	0	339,30	635,10	46,00	270,20	27,80	127,00	31,60	659,00
17:10	114	0	0	0	342,60	632,60	44,70	261,10	27,80	132,10	31,20	648,00
17:11	115	0	0	0	341,40	632,50	44,60	256,70	27,80	132,30	31,10	644,00
17:16	120	0	0	1	331,80	552,20	43,20	232,40	27,90	113,80	31,20	523,00
17:21	125	0	0	1	381,90	611,40	48,10	266,10	27,90	123,20	30,80	451,00
17:26	130	0	0	1	351,70	516,20	46,10	257,70	28,10	130,40	30,70	445,00
17:28	132	0	0	0	334,70	477,30	45,30	251,40	28,00	130,70	30,80	489,00
17:31	135	0	0	0	318,00	529,80	45,00	250,80	28,10	130,00	30,80	403,00
17:36	140	0	0	1	420,80	538,90	44,30	253,40	28,20	99,30	31,40	474,00
17:41	145	0	0	1	393,50	497,60	43,30	248,70	28,20	128,60	31,50	423,00
17:45	149	0	0	0	376,10	459,70	42,90	240,70	28,20	129,20	31,40	422,00
17:46	150	0	0	0	369,80	443,10	42,60	238,30	28,30	128,90	31,40	420,00
17:48	152	0	0	1	360,90	483,30	43,50	232,10	28,10	129,70	31,40	401,00
17:51	155	0	0	1	333,50	640,60	43,80	246,90	28,30	129,10	31,30	356,00
17:56	160	0	0	1	321,50	713,30	42,90	250,30	28,40	129,00	31,10	377,00
17:58	162	0	0	0	316,50	696,70	42,60	248,00	28,40	129,10	31,10	384,00
18:01	165	0	0	0	304,50	648,90	42,90	240,40	28,40	110,10	31,50	356,00
18:02	166	0	0	1	330,20	620,90	45,40	234,20	28,40	103,40	31,50	352,00
18:06	170	0	0	1	314,50	623,00	44,70	248,70	28,60	97,90	31,40	344,00
18:11	175	0	0	1	337,10	648,40	43,70	255,20	28,70	131,70	31,10	468,00
18:13	177	0	0	0	334,40	631,20	43,60	250,70	28,60	120,70	31,10	455,00
18:16	180	0	0	1	353,60	608,40	45,90	253,40	28,60	121,60	31,10	410,00
18:21	185	0	0	1	439,40	717,40	48,50	275,60	28,80	132,40	30,90	680,00
18:26	190	0	0	1	375,80	666,10	47,60	263,00	28,80	125,10	31,10	704,00
18:27	191	0	0	0	367,80	672,20	47,60	260,60	28,80	125,30	31,00	700,00
18:31	195	0	0	0	350,20	664,70	45,50	250,70	28,80	130,70	30,80	659,00

As colunas de intensificação acústica alternam 0 (sem intensificação acústica) e 1 (com intensificação acústica) para facilitar a análise da tabela.

A Tabela 59 mostra a composição de gases no leito da câmara de combustão e a Tabela 60 mostra a composição dos gases na chaminé obtidas no teste 7.

Tabela 59: Composição de gases no leito da câmara de combustão obtida no teste 7.

hora	tempo [min]	H <sub>2</sub> [vol%]	CO [%]	CH <sub>4</sub> [vol%]	O <sub>2</sub> [%]
15:16	0	1,682	0	0	16,07
15:21	5	1,596	0	0	15,32
15:26	10	1,544	0	0	15,47
15:31	15	1,497	0	0	15,84
15:34	18	1,477	0	0	15,96
15:36	20	1,471	0	0	16
15:41	25	1,453	0	0	15,99

15:46	30	1,445	0	0	16,02
15:51	35	1,439	0	0	15,99
15:56	40	1,439	0	0	16,01
16:00	44	1,439	0	0	16,03
16:01	45	1,442	0	0	16,07
16:06	50	1,447	0	0	16,13
16:11	55	1,446	0	0	16,14
16:16	60	1,449	0	0	16,16
16:18	62	1,448	0	0	16,14
16:21	65	1,446	0	0	16,13
16:26	70	1,45	0	0	16,13
16:31	75	1,455	0	0	16,17
16:35	79	1,452	0	0	16,18
16:36	80	1,452	0	0	16,03
16:41	85	1,436	0	0	15,69
16:46	90	1,413	0	0	15,26
16:51	95	1,448	0	0	15,72
16:56	100	1,438	0	0	15,68
17:01	105	1,408	0	0	15,13
17:06	110	1,418	0	0	15,54
17:11	115	1,421	0	0	15,64
17:16	120	1,415	0	0	15,66
17:21	125	1,412	0	0	15,81
17:26	130	1,413	0	0	15,88
17:31	135	1,422	0	0	15,97
17:36	140	1,441	0	0	16,13
17:39	143	1,443	0	0	16
17:41	145	1,439	0	0	15,97
17:46	150	1,432	0	0	15,88
17:49	153	1,425	0	0	15,83
17:51	155	1,416	0	0	15,75
17:56	160	1,419	0	0	15,83
18:01	165	1,413	0	0	15,88
18:03	167	1,404	0	0	15,79
18:06	170	1,403	0	0	15,79
18:11	175	1,398	0	0	15,69
18:16	180	1,383	0	0	15,61
18:21	185	1,396	0	0	15,745
18:26	190	1,409	0	0	15,88
18:31	195	1,412	0	0	15,95

Tabela 60: Composição de gases na chaminé obtida no teste 7.

hora	tempo [min]	O2 [%]	NO2 [ppm]	NO [ppm]	CO2 [%]	H2S [ppm]	CO [ppm]	CxHy [%]
15:16	0	9,88	2,5	47,8	8,15	6,9	1.340,00	0,02
15:21	5	14,7	0,8	36,3	7,09	3,2	1.656,80	0,03
15:26	10	19	0,5	20,4	6,12	3,2	1.994,50	0,06
15:31	15	20,6	0,2	15,7	5,53	3,7	2.271,30	0,06
15:35	19	18,5	1,4	23,1	7,08	6,4	2.096,00	0,04
15:36	20	18,8	2,1	21,6	7,48	7,9	1.896,10	0,03
15:41	25	21,7	3,6	9	7,64	11,4	1.759,60	0,03
15:46	30	20,7	2,8	10,1	7,18	10,1	1.997,60	0,04
15:51	35	19,3	1,2	16,5	6,85	6,3	2.392,60	0,05
15:56	40	19,7	0,9	14,9	7,15	6,1	2.453,70	0,05
16:00	44	22,4	2	5,5	6,88	8,9	2.101,40	0,04
16:01	45	23	2,2	3,6	6,76	9,3	2.011,80	0,04
16:06	50	20,7	3,1	9,2	7,38	10,6	1.832,50	0,04
16:11	55	23,7	4,5	0	7,95	14,1	1.519,10	0,03
16:16	60	13	1,5	37,3	7,86	3,6	790,00	0,03
16:19	63	14,3	0	39,8	7,69	0,7	1.193,80	0,03
16:21	65	14,9	0	38,8	7,53	0	1.286,30	0,03
16:26	70	15,6	0	45	7,81	0	1.468,60	0,04
16:31	75	15,3	0	48,9	8,36	0	1.464,60	0,04
16:34	78	15,9	0	44,3	8,28	0	1.477,40	0,04
16:36	80	16,3	0	48,6	8,59	0	1.560,60	0,04
16:41	85	15	0	57,9	9,75	0	1.666,00	0,04
16:46	90	23,5	4,3	11,2	10,39	14,3	1.915,80	0,05
16:51	95	24,6	4,3	2	9,3	14,9	1.878,40	0,05
16:56	100	23,7	4,2	2,8	9,41	14,8	1.960,20	0,05
17:00	104	22,5	4	2,5	9,34	14,1	1.898,30	0,05
17:01	105	22,5	3,8	2,6	9,21	13,6	1.872,90	0,05
17:06	110	21,9	3,4	4,3	8,91	12,4	1.843,60	0,05
17:11	115	22,6	4	1,1	9,1	13,9	1.807,90	0,05
17:16	120	22	3,7	0,9	9,15	13	1.726,90	0,05
17:21	125	22,8	3,5	0	8,75	12,8	1.600,00	0,05
17:26	130	22,6	4,2	0	8,15	14,6	1.702,40	0,05
17:31	135	20,5	3,5	2	8,51	12,8	1.838,80	0,05
17:36	140	22,2	3,7	0	8,15	13,5	1.723,00	0,05
17:39	143	21,8	3,7	0	7,94	13,4	1.690,50	0,05
17:41	145	21	3,3	0	7,96	12,5	1.718,20	0,05
17:46	150	21,7	2,9	0	7,99	11,1	1.564,30	0,05
17:49	153	21,2	2,9	0	7,93	10,71	1.474,70	0,05
17:51	155	21,6	2,7	0	7,81	10,1	1.421,50	0,05
17:56	160	9,31	0	32,6	7,46	0	1.031,00	0,05
18:01	165	11,5	0	40,4	7,35	0	1.310,50	0,05
18:04	168	12,9	0	40,8	7,5	0	1.251,00	0,05

18:06	170	13	0	42,1	7,53	0	1.195,20	0,05
18:11	175	14,5	0	39,4	7,39	0	1.128,00	0,05
18:16	180	14,3	0	40,7	7,49	0	1.141,20	0,05
18:21	185	14,9	0	41,2	7,79	0	1.183,10	0,05
18:26	190	15,1	0	43,2	7,83	0	1.259,40	0,06
18:31	195	13,4	0	49,7	8,76	0	1.420,90	0,06

Todos os dados obtidos durante a realização das sete operações e mostrados neste capítulo 5 tem sua análise apresentada no capítulo 6.

## 5.8 APRESENTAÇÃO DOS DADOS MEDIDOS E CALCULADOS DOS TESTES 5,6 E 7 EM RESUMO

Apresenta-se neste item o resumo dos dados dos períodos de amostragem dos testes 5, 6 e 7. Estes dados são os resultados amostrados nas operações, com os cálculos do excesso de ar, geração de vapor específica, potência térmica e eficiência da caldeira para os períodos em análise dos testes 5,6 e 7.

Destaca-se que a eficiência da caldeira foi calculada pelo método direto, não pelo indireto como proposto no capítulo 3, pois, em função de não se ter obtido todos os dados da composição de gases no leito nem na chaminé necessários para o cálculo pelo método indireto, seria necessário fazer uma composição dos dados, o que ensejaria em um erro. A equação 89 mostra como foi calculada a eficiência da caldeira.

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{total}}} = \frac{m_{\text{vapor}} \cdot h_{\text{vapor}}}{m_{\text{bio}} \cdot PCI} [\%] \quad (89)$$

A Tabela 61 mostra os dados resultantes dos períodos de amostragem dentro das operações dos testes 5, 6 e 7. Destaca-se que para o teste 6 o período de amostragem corresponde ao mesmo período da operação do teste.

Tabela 61: Dados dos períodos de operações dos testes 5, 6 e 7.

DADOS DO PERÍODO TOTAL DE OPERAÇÕES DO TESTES 5, 6 E 7						
Parâmetro	Unidade	Teste 5	Teste 6	Teste 7		
				60 Hz	75 Hz	90 Hz
Hora de início da amostragem		16:45	08:02	15:32	16:17	17:16
Hora de término da amostragem		18:35	10:52	16:11	17:10	18:27
Período total de amostragem	[min]	110	170	39	53	71
Massa de biomassa queimada no período da amostragem	[kg]	36,61	33,46	13,61	18,25	22,78
Massa total de água reposta no período da amostragem	[kg]	131,50	74,20	15,72	73,92	76,19
Vazão mássica de biomassa no período da amostragem	[kg/h]	19,97	11,81	20,93	20,65	19,25
Massa de cinzas do período da operação	[kg]	0,52	0,52	0,85	0,85	0,85
Massa de cinzas do período da amostragem	[kg]	0,27	0,52	0,13	0,17	0,21
Massa de vapor (água reposta)	[kg]	131,50	74,20	15,72	73,92	76,19
Vazão mássica de vapor	[kg/h]	71,73	26,19	24,18	83,68	64,39
Excesso de ar	[%]	139,44	304,88	128,41	128,41	148,34
Geração específica de vapor	[kg <sub>vapor</sub> /kg <sub>bio</sub> ]	3,59	2,22	1,16	4,05	3,34
Potência Térmica	[kW]	592,63	541,64	220,26	295,39	368,81
Eficiência da caldeira	[%]	60,76	37,08	19,54	68,52	56,57
Pressão de operação da caldeira	[kgf/cm <sup>2</sup> ]	4	2	4	4	4

Todos os dados obtidos durante a realização das sete operações e mostrados neste capítulo 5 tem sua análise apresentada no capítulo 6.

## Capítulo 6

# ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo os resultados dos experimentos que foram tabelados e organizados no capítulo 5 são analisados. Foram montados gráficos que facilitam e possibilitam a visualização dos resultados.

Os testes 1 a 4 foram muito importantes na evolução das operações e no desenvolvimento da metodologia usada nos testes, mas não forneceram resultados para as análises.

Os resultados significantes e avaliados vieram dos testes 5, 6 e 7 e foram apresentados no capítulo 5.

São apresentadas a seguir as análises em separado dos resultados do teste 5, realizado sem intensificação acústica e dos testes 6 e 7, realizados com intensificação acústica. Na sequência as análises serão comparativas entre o teste 5 e o teste 7 e ainda entre o teste 5 e o teste 6.

## 6.1 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS T1, T2, T4, T6 E T8 - TESTE 5

Apresenta-se a análise das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 durante a realização do teste 5 e sua resposta à alimentação de biomassa, como pode ser visto na Figura 155.

Salienta-se que a cada alimentação no teste 5 foram fornecidas 6,6 kg em média de lenha de eucalipto, com duração de 20 segundos em média. As alimentações ocorreram nos minutos 8, 22, 43, 58, 83 e estão representadas no gráfico da Figura 155 pelas linhas pontilhadas em azul. Percebe-se neste gráfico, que as temperaturas T1, T2 e T8, que são tomadas na câmara de combustão acima da grelha são mais susceptíveis às variações geradas pelo processo de combustão de biomassa no leito do que as temperaturas T4 e T6. Assim para análise da resposta das temperaturas à alimentação de biomassa no leito será focada nas temperaturas T1, T2 e T8.

Lembrando-se que as temperaturas T1 e T2 são tomadas acima do leito de combustão nas porções médias e finais da câmara de combustão respectivamente, enquanto T8 é tomada com o auxílio da sonda com o termopar B através do acesso no teto da câmara de combustão no próprio leito de combustão. Apresenta-se a figura xx para com o posicionamento das tomadas de temperatura na câmara de combustão e com a região do leito facilitar o entendimento.

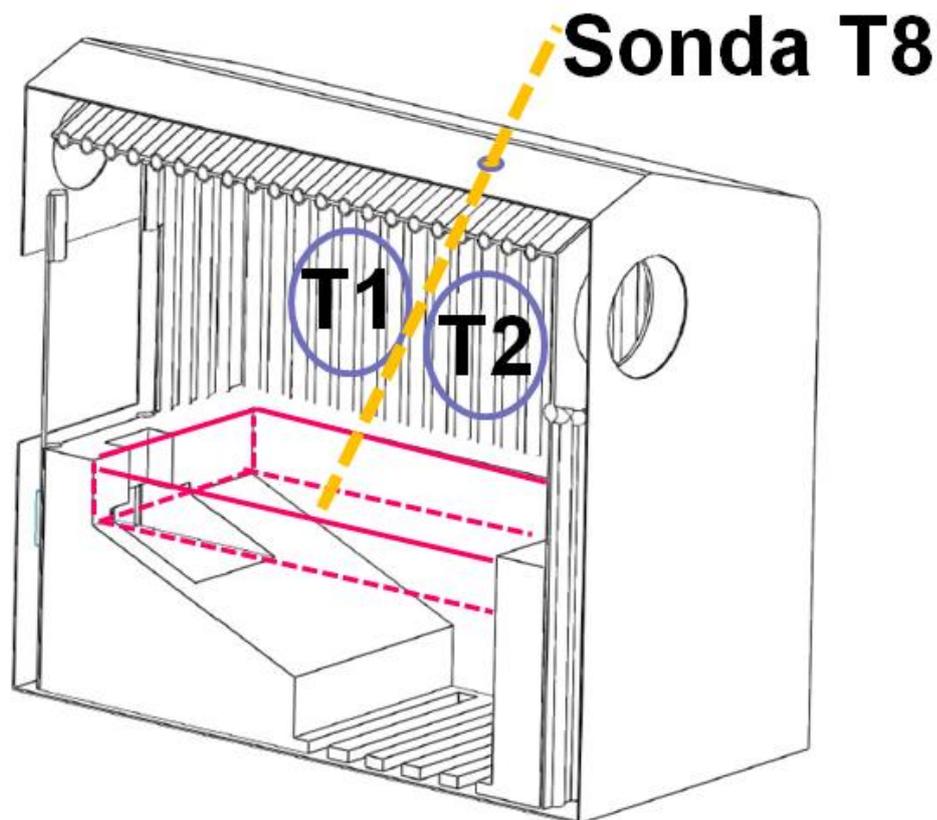


Figura 154: Esquema de tomada das temperaturas T1, T2 e T8 na câmara de combustão.

Com o intuito de se estudar em detalhes a resposta das temperaturas T1, T2, e T8 à alimentação de biomassa, adotou-se o período logo após a alimentação do minuto 22 para se avaliar em detalhes e montou-se a partir do período marcado pelo retângulo verde no gráfico da Figura 155 o gráfico da Figura 156, que é dividido em zonas de combustão nas quais são analisados os comportamentos das temperaturas após a alimentação do minuto 22.

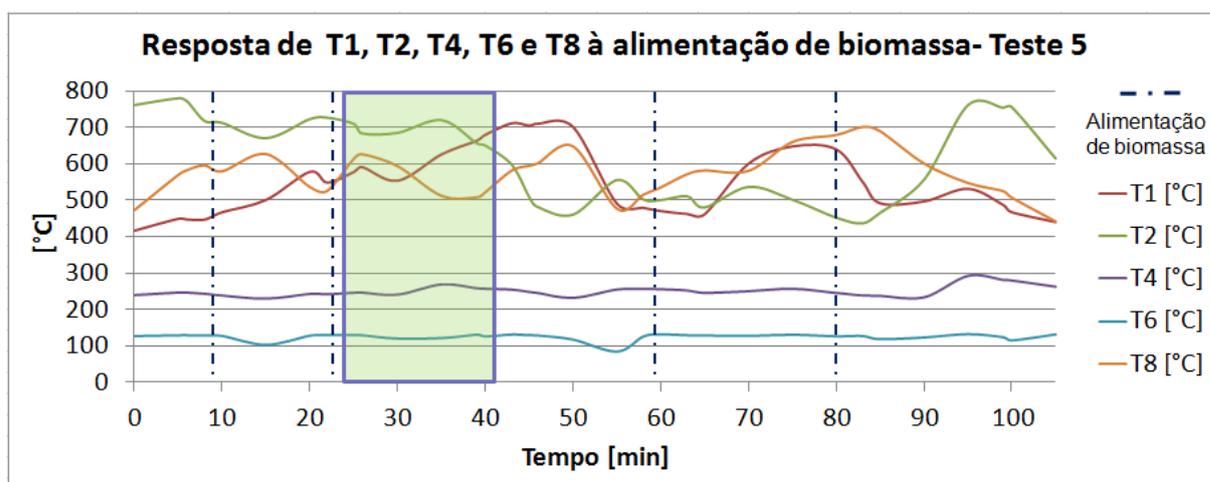


Figura 155: Resposta de T1, T2, T6 e T8 à alimentação de biomassa – Teste 5.

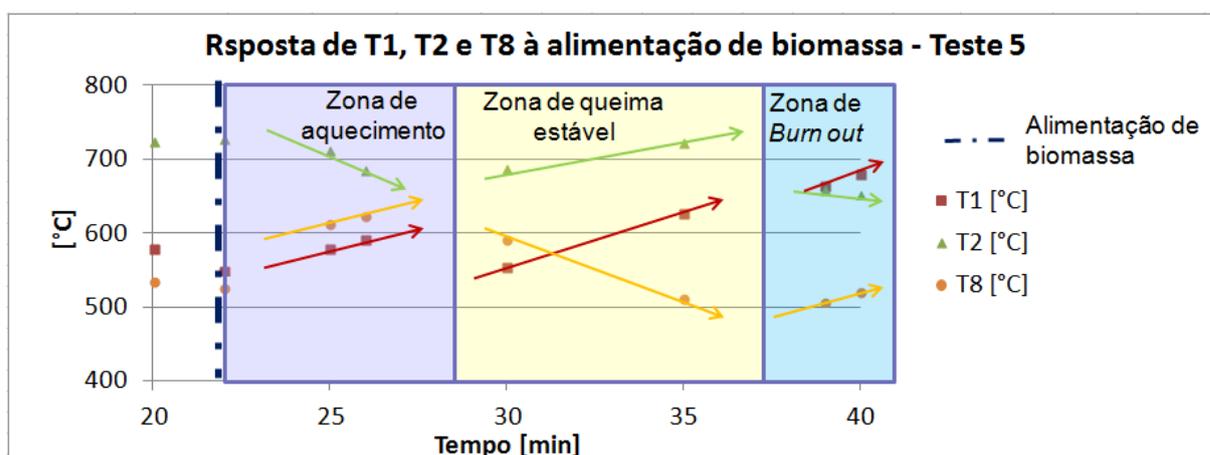


Figura 156: Zonas de combustão após a alimentação do minuto 22 – Teste 5.

Ao se analisar o gráfico da Figura 156, verifica-se que existem três zonas de combustão distintas, inicialmente uma zona de aquecimento, onde ocorre a secagem, o aquecimento e a devolatilização da biomassa recém-fornecida, uma zona de combustão estável, onde ocorre a combustão do carbono fixo da biomassa e uma zona de *burn out*, onde se verifica a finalização da energia contida na biomassa.

Na zona de aquecimento, logo após a porta da caldeira ser aberta e, além da alimentação de biomassa, ocorrer a entrada de ar frio, nota-se que T2 apresenta uma tendência de queda, pois recebe o escoamento de ar frio com a alimentação, enquanto T1 e T8 apresentam tendência de aumento, pois estão na região de chamas formadas pelos voláteis resultantes da devolatilização da biomassa.

Na zona de queima estável, T1 e T2 apresentam um aumento pois estão na região alcançada pelo escoamento reativo de gases de combustão resultantes da combustão do carbono fixo da biomassa, enquanto T8 apresenta diminuição devido à extinção das chamas oriundas da combustão dos voláteis apresentada na zona de aquecimento.

Na zona de *burn out* T1 e T8 apresentam uma recuperação e uma tendência de alta pois estão mais próximas do leito e do escoamento dos gases de combustão, enquanto T2 começa a responder com queda à finalização da energia contida na biomassa.

## 6.2 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS T1, T2, E T8 COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA - TESTE 6

Apresenta-se a análise das temperaturas T1, T2, e T8 durante a realização do teste 6 com intensificação acústica, como pode ser visto na Figura 157.

Salienta-se que a cada alimentação no teste 6 foram fornecidas 4,2 kg em média de lenha de eucalipto e que a intensificação acústica ocorreu com o SA de 400[W], operando em 40 [Hz] sem película de borracha isolando o AS do escoamento de ar primário. O SA funcionou por 20 minutos do minuto 25 ao minuto 45 até o *speaker* quebrar.

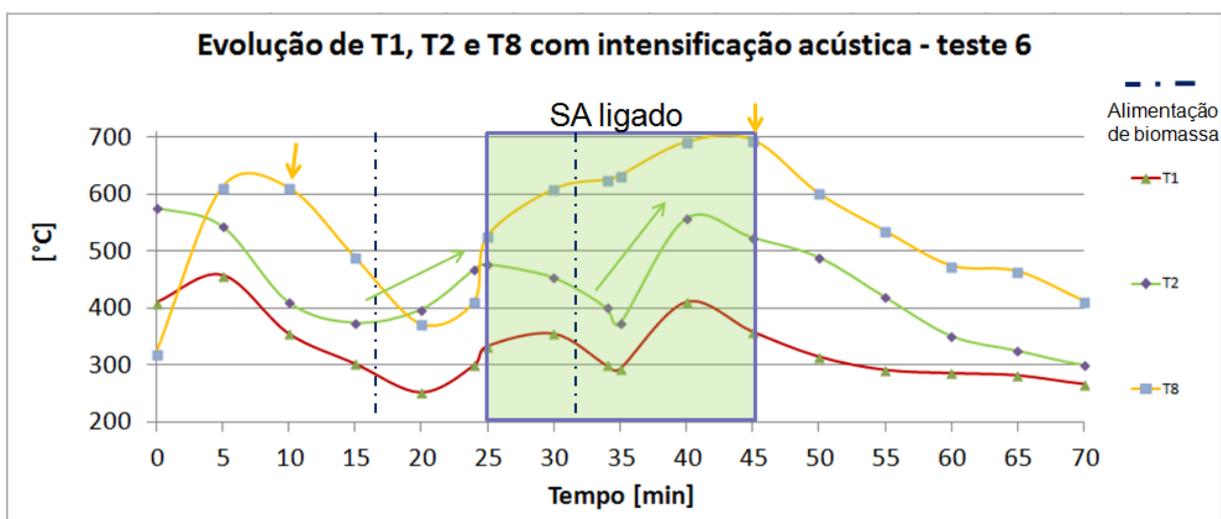


Figura 157: Evolução de T2, T2 e T8 com intensificação acústica – Teste 7.

As linhas pontilhadas azuis representam os momentos de alimentação de biomassa, que ocorreram nos minutos 17 e 33 por aproximadamente 20 segundos. O retângulo verde representa o período em que o AS esteve ligado em 400[W] e 40 [Hz] e ocorreu intensificação acústica.

Para T8, o valor de pico amostrado sem intensificação acústica é de 612 [°C], enquanto que no período com a intensificação acústica, esse valor subiu para 696 [°C], o que mostra um acréscimo de 13,72 [%] no valor de pico da temperatura T8 com a intensificação acústica.

A temperatura T2 apresentou uma taxa de aquecimento sem intensificação acústica de 4,1 [°C/min], enquanto que no período de intensificação acústica essa taxa foi de 35,94 [°C/min], apresentando um acréscimo de 776,59 [%].

### 6.3 ANÁLISE DO TEOR DE O<sub>2</sub> CONSUMIDO NO LEITO COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA - TESTE 6

Apresenta-se a análise dos teores de O<sub>2</sub> durante a realização do teste 6 com intensificação acústica, como pode ser visto na Figura 158.

Salienta-se que a cada alimentação no teste 6 foram fornecidas 4,2 kg em média de lenha de eucalipto e que a intensificação acústica ocorreu com o SA de 400[W], operando em 40 [Hz] sem película de borracha isolando o AS do escoamento de ar primário. O SA funcionou por 20 minutos do minuto 0 ao minuto 20.

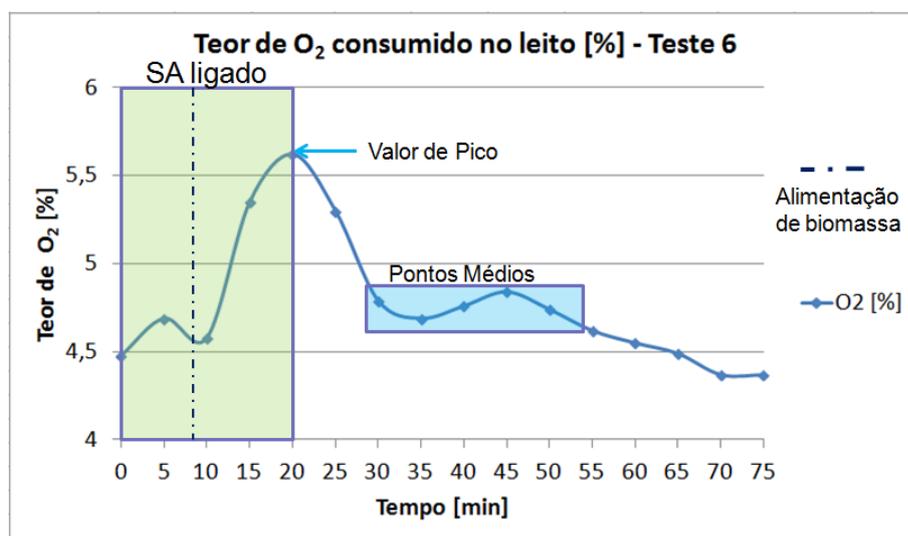


Figura 158: Teor de O<sub>2</sub> consumido no leito com intensificação acústica – Teste 6.

A linha pontilhada azul representa o momento de alimentação de biomassa, que ocorreu no minuto 9 por aproximadamente 20 segundos. O retângulo verde representa o período em que o AS esteve ligado em 400[W] e 40 [Hz] e ocorreu intensificação acústica.

O retângulo azul representa os pontos amostrados sem intensificação acústica, cujo valor médio de 4,74 [%]. O valor de pico durante o período com intensificação acústica é de 5,62 [%], o que mostra um acréscimo de 18,57 [%] no teor de O<sub>2</sub> consumido no leito com intensificação acústica.

## 6.4 ANÁLISE DAS TEMPERATURAS T1, T2, E T8 COM INTENSIFICAÇÃO ACÚSTICA - TESTE 7

Apresenta-se a análise das temperaturas T1, T2, e T8 durante a realização do teste 7 com intensificação acústica, como pode ser visto na Figura 159.

Salienta-se que a cada alimentação no teste 6 foram fornecidas 4,2 kg em média de lenha de eucalipto e que a intensificação acústica ocorreu com o SA de 200[W], operando em 75 [Hz] sem película de borracha isolando o AS do escoamento de ar primário.

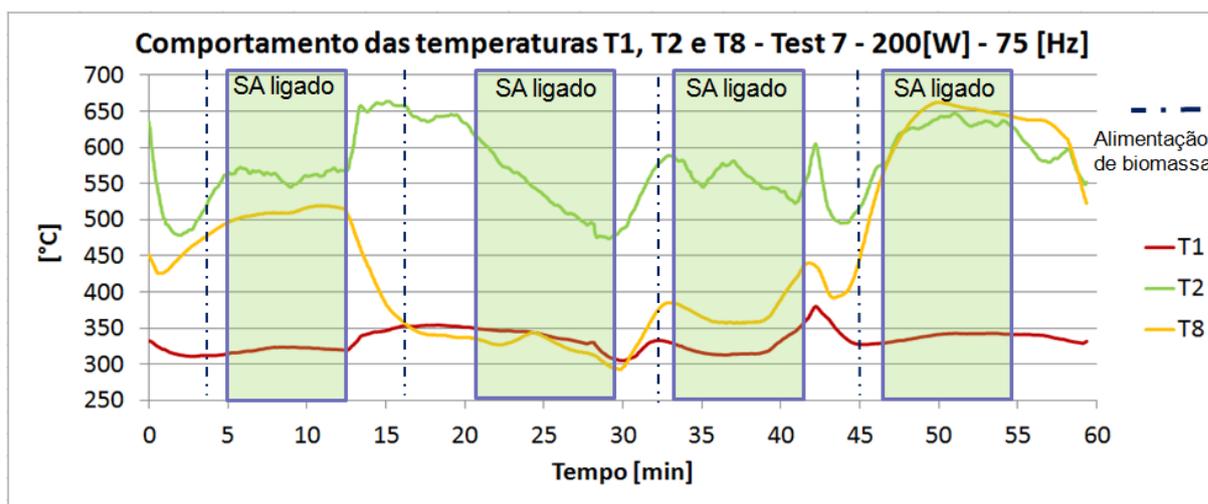


Figura 159: Comportamento das temperaturas T1, T2 e T8 com intensificação acústica – Teste 7.

As linhas pontilhadas azuis representam os momentos de alimentação de biomassa, que ocorreram nos minutos 3, 16, 32 e 45 por aproximadamente 20 segundos. Os retângulos

verdes representam os períodos em que o AS esteve ligado em 200[W], 75 [Hz] com película de borracha isolando o AS do escoamento de ar primário e ocorreu intensificação acústica.

Apesar de se ter realizado o teste 7 com períodos de intensificação acústica em 60, 75 e 60 [Hz] optou-se por analisar o período do teste com a intensificação acústica operando em 75 [Hz].

Ao se analisar T2 nota-se que ela responde de maneira errática à intensificação acústica, impossibilitando qualquer conclusão sobre a influência da mesma sobre o processo de combustão de biomassa no leito.

A mesma análise pode ser feita para T1 e T8 sobre a influência da intensificação acústica sobre o processo de combustão no leito. Além disso, em função das baixas temperaturas alcançadas especialmente por T1 e T8, pode-se concluir que ocorreu combustão lenta, quando não se atinge as temperaturas potenciais em um processo de combustão. Isso provavelmente se deve à menor vazão mássica de fornecimento de biomassa. Pode-se verificar esse fenômeno comparando-se as temperaturas do teste 5, cuja massa média de alimentação foi de 6,6 [kg] de biomassa por alimentação com as temperaturas do teste 7, cuja massa média de alimentação foi de 4,2 [kg] de biomassa por alimentação.

## Capítulo 7

# APRESENTAÇÃO E ANÁLISE GERAL DOS RESULTADOS DOS TESTES

Neste capítulo os resultados dos experimentos que foram tabelados e organizados no capítulo 5 são analisados. Foram montados gráficos que facilitam e possibilitam a visualização dos resultados, bem como a comparação entre resultados dos testes diversos. A análise apresentada neste capítulo complementa a análise apresentada no capítulo 6.

São apresentadas a seguir as análises em separado dos resultados do teste 5, realizado sem intensificação acústica e dos testes 6 e 7, realizados com intensificação acústica. Na sequência as análises serão comparativas entre o teste 5 e o teste 7 e ainda entre o teste 5 e o teste 6.

## 7.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 5

O teste 5 foi realizado sem intensificação acústica e forneceu dados sobre o perfil de temperaturas, composição de gases no leito da câmara de combustão e na chaminé.

A Figura 160 mostra a evolução das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 ao longo do período de teste. Avaliam-se as temperaturas da câmara de combustão (T1 e T2), inclusive do leito (T8), do escoamento na chaminé (T4) e do escoamento na tubulação de saída de vapor (T6) salientando-se que a T6 somente é válida nos momentos em que a válvula de saída de vapor (V8) está aberta e existe escoamento nesta tubulação. Considera-se a T6 como a temperatura da água no interior do tubulão.

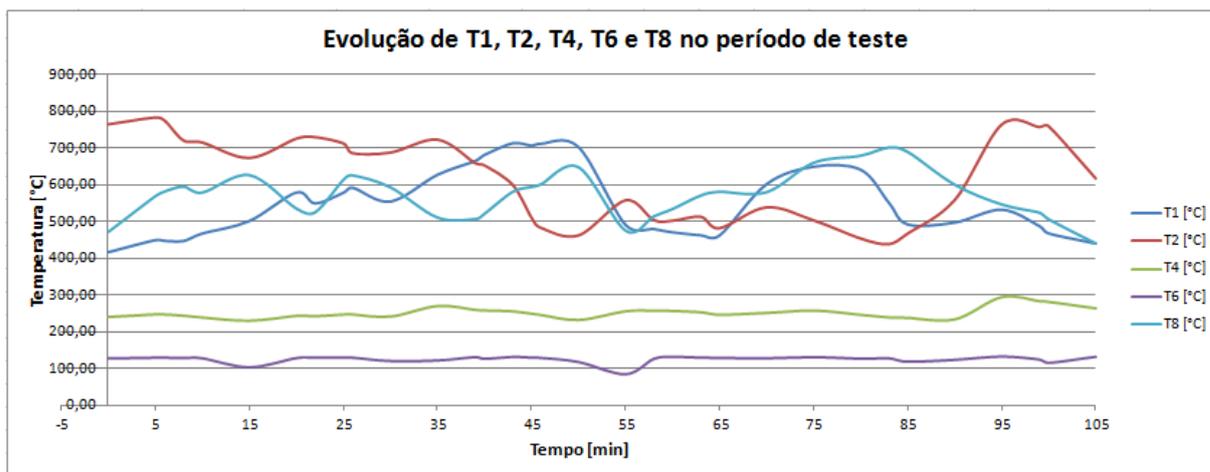


Figura 160: Evolução de T1, T2, T4, T6 e T8 no período do teste.

É importante avaliar o comportamento das temperaturas em resposta à alimentação de biomassa na câmara de combustão.

A Figura 161 mostra as temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 confrontadas com os momentos de alimentação de biomassa na câmara de combustão. Os picos em azul representam os momentos que a biomassa é alimentada para a câmara de combustão. Destaca-se que a biomassa foi alimentada em lotes de lenha de aproximadamente 6,6 [kg] em média.

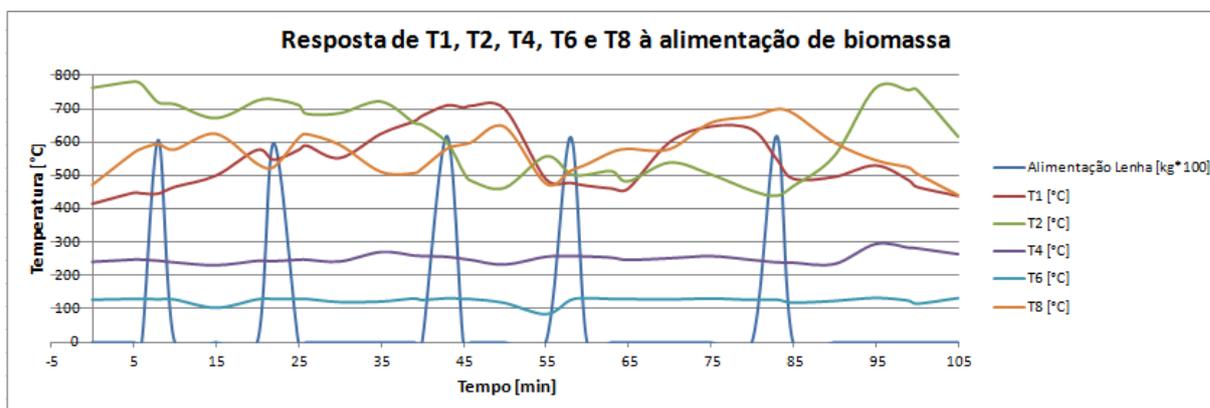


Figura 161: Resposta de T1, T2, T4, T6 e T8 à alimentação de biomassa.

Percebe-se que T1 e T8 reagem muito rapidamente e apresentam acréscimo praticamente assim que a biomassa é alimentada na câmara de combustão, pois são susceptíveis ao aumento das chamas que a nova biomassa produz em sua fase de devolatilização. T2 apresenta um pequeno atraso no acréscimo de temperatura, pois como o termopar está posicionado na porção superior e posterior da câmara de combustão, ele é mais susceptível ao calor do

escoamento dos gases e por este mesmo motivo, T2 demora mais para decrescer a temperatura entre duas alimentações de biomassa seguidas.

Percebe-se ainda que as variações das temperaturas T1, T2 e T8 são significativas ao longo do período do teste, o que gera uma operação pouco estável deste ponto de vista.

T4 apresenta uma variação mais sutil, pois a maior parte do calor contido no escoamento é transferido para a água da caldeira no processo, o que faz com que T4 apresente um resultado mais estável, com pouca variação na temperatura.

T6 reflete as condições de temperatura do interior do tubulão, assim não apresenta dependência com relação à alimentação de biomassa. Os picos de queda em T6 representam os momentos em que a pressão no interior do tubulão cai e a válvula V8 é fechada, diminuindo ou até interrompendo o escoamento de vapor e assim diminuindo a temperatura em T6.

Outro fator de instabilidade no processo de operação da caldeira é a reposição de água, pois como não existe pré-aquecedor de água para este equipamento, todas as reposições são realizadas com água fria, o que altera a temperatura no interior do tubulão e pode desestabilizar os processos.

A Figura 162 mostra como as temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 se comportam em relação ao reabastecimento de água no tubulão. Os picos em azul representam os momentos que a água é realimentada no tubulão.

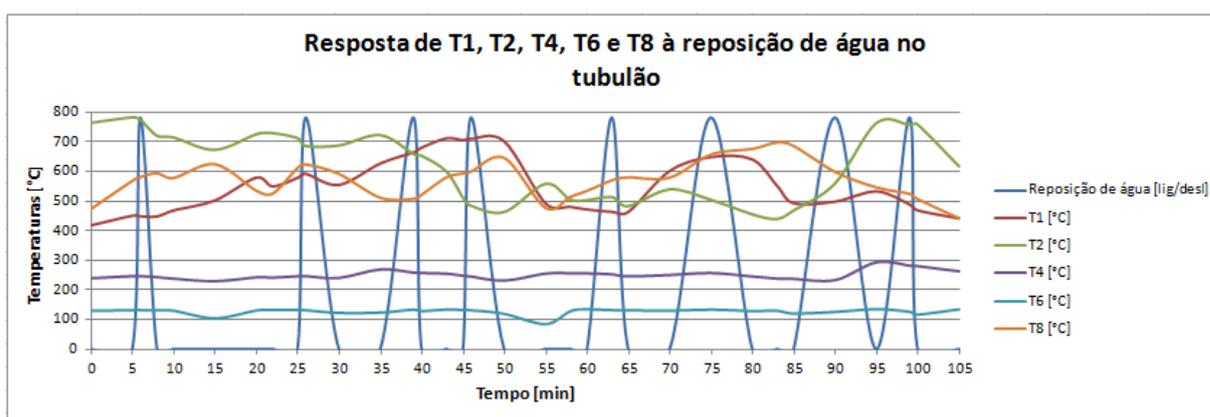


Figura 162: Resposta de T1, T2, T4, T6 e T8 à reposição de água no tubulão.

Somente T6 é susceptível ao reabastecimento de água no tubulão, uma vez que este evento pode baixar a temperatura e conseqüentemente a pressão no interior do tubulão, fazendo que seja necessário o fechamento da válvula V8 e diminuindo o escoamento na saída de vapor e também diminuindo a própria temperatura no interior do tubulão, refletindo em T6.

A análise apresentada avalia as temperaturas diretamente envolvidas com os processos térmicos da operação da caldeira.

Apresenta-se agora a análise da composição de gases no leito da câmara de combustão.

A Figura 163 mostra a evolução do percentual de  $O_2$  e  $H_2$  presentes na câmara de combustão ao longo do período do teste 5.

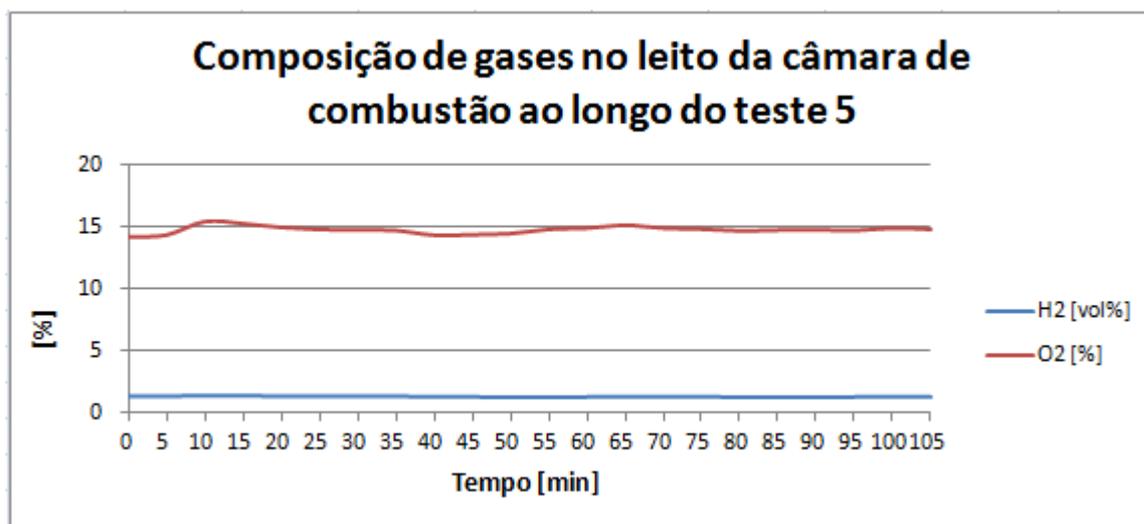


Figura 163: Composição de gases no leito da câmara de combustão – Teste 5.

Para melhor visualizar a evolução do  $O_2$ , apresenta-se a Figura 164 que mostra a evolução do  $O_2$  durante o período de teste.

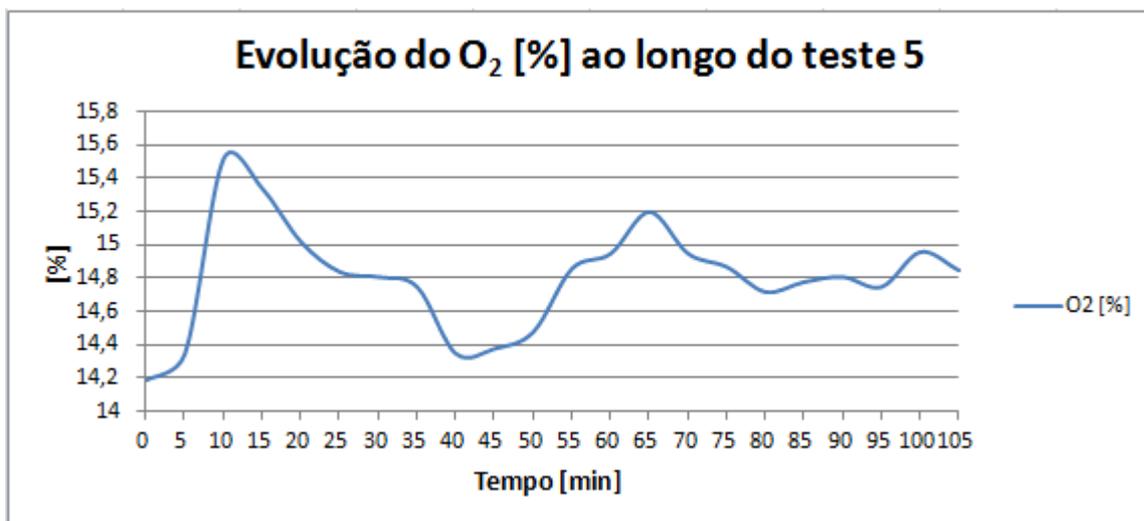


Figura 164: Evolução do  $O_2$  ao longo do teste 5.

Percebe-se que também existe uma variação do teor de  $O_2$ , que pode ser resultado das aberturas da porta da câmara de combustão para a alimentação de biomassa. A alimentação ocorreu nos minutos 8, 22, 43, 58 e 83. Ao se observar o gráfico da Figura 164, percebe-se que em todos os minutos com alimentação de biomassa, com exceção minuto 22 existe uma tendência de subida na curva, mas no minuto 22 existe uma estabilização em um momento de queda, mostrando que realmente o teor de  $O_2$  varia com as aberturas da porta da câmara de combustão nos momentos de alimentação, o que permite concluir que o já alto excesso de ar aumenta ainda mais nesses momentos.

Já a reposição de água ao longo do período do teste ocorre nos minutos 6, 26, 39, 46, 63, 75, 90 e 99.

Ao se observar o gráfico novamente percebe-se que no minuto 26 existe uma inflexão da curva de queda para estabilidade e no minuto 90 existe uma de subida para queda. Nos demais minutos onde ocorreu reposição de água as tendências da curva se mantiveram. Isso permite concluir que o teor de  $O_2$  no leito da câmara de combustão não tem relação com a reposição de água na caldeira.

A Figura 165 mostra a evolução da composição completa dos gases na chaminé ao longo do período do teste.

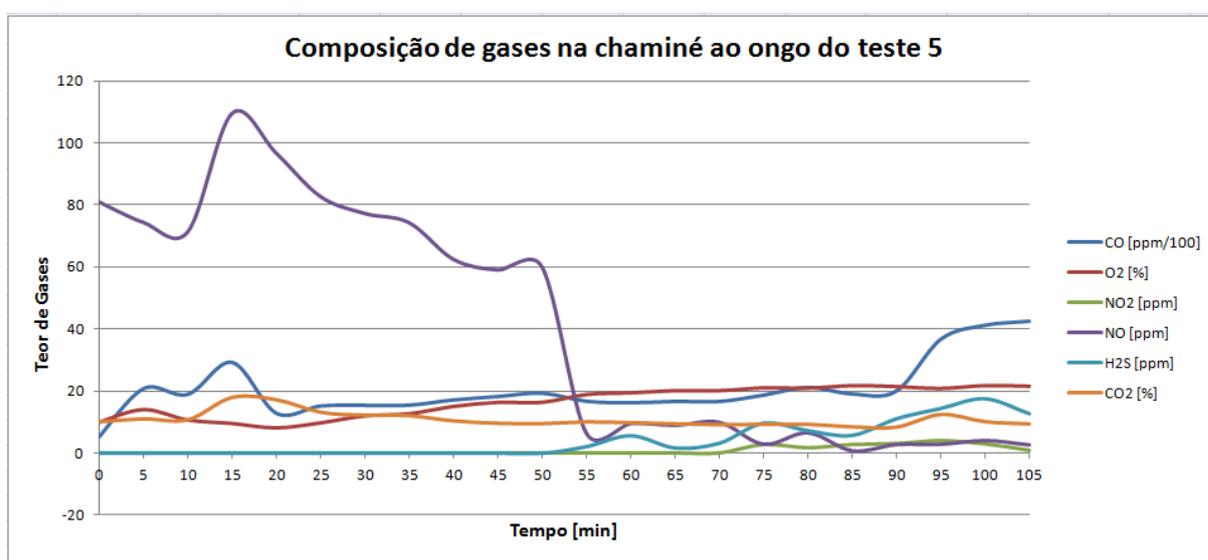


Figura 165: Evolução dos gases na chaminé ao longo do teste 6.

Para melhor visualização do teor de  $O_2$ ,  $CO$  e  $CO_2$  na chaminé apresenta-se o gráfico da Figura 166.

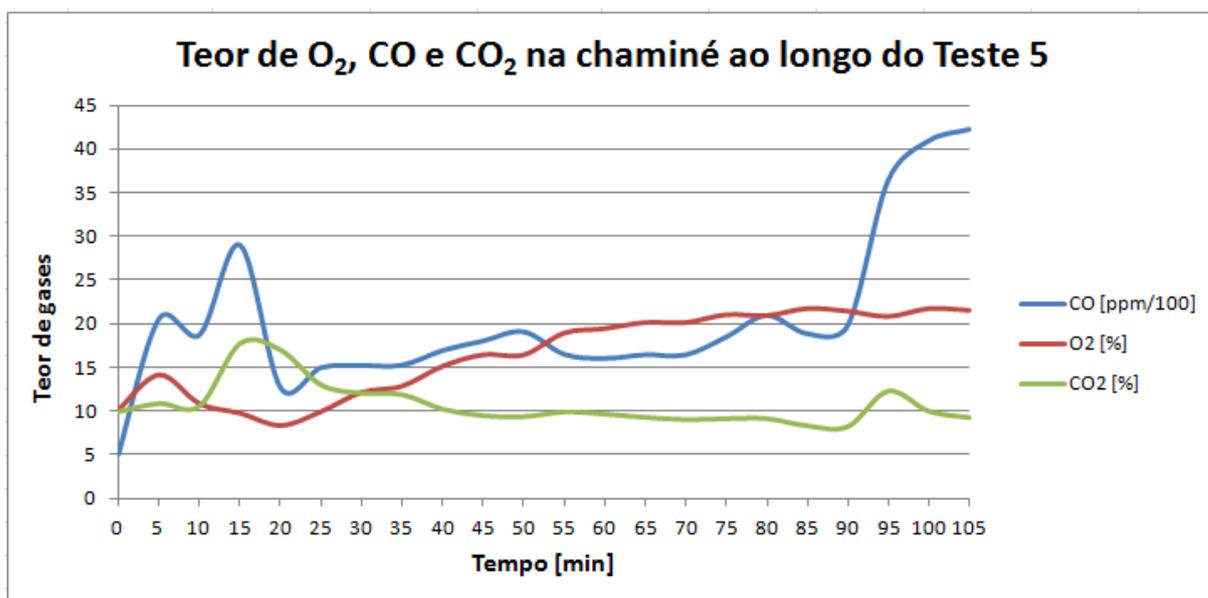


Figura 166: Teores de O<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> na chaminé ao longo do teste 5.

Faz sentido se dizer que quanto mais eficiente é a combustão, mais O<sub>2</sub> reage com elementos combustíveis na biomassa, formando mais CO<sub>2</sub>, o que diminui os teores de O<sub>2</sub> e CO. Percebe-se no gráfico da Figura 166 que as curvas de CO e O<sub>2</sub> realmente apresentam na quase totalidade do período do teste um comportamento semelhante. Quando se analisam as curvas do O<sub>2</sub> e do CO<sub>2</sub> também se percebe que o comportamento das curvas é oposto, ou seja, as quedas no teor de O<sub>2</sub> representam aumentos no teor de CO<sub>2</sub>. As exceções estão em alguns pontos do comportamento da curva de teor de CO, que nos minutos 12 e 90 apresenta o mesmo tendência de alta que o CO<sub>2</sub>, ao contrário do O<sub>2</sub>, que apresenta tendência de queda nesses dois pontos.

## 7.2 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 6

O teste 6 foi realizado com intensificação acústica e forneceu dados sobre o perfil de temperaturas, composição de gases no leito da câmara de combustão e na chaminé.

A Figura 167 mostra a evolução das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 ao longo do período de operação do teste 6. Amostrou-se as temperaturas desde 24 minutos antes do acionamento do SA, ou seja o zero minutos do período considerado para amostragem no teste 6 coincide com o zero da operação.

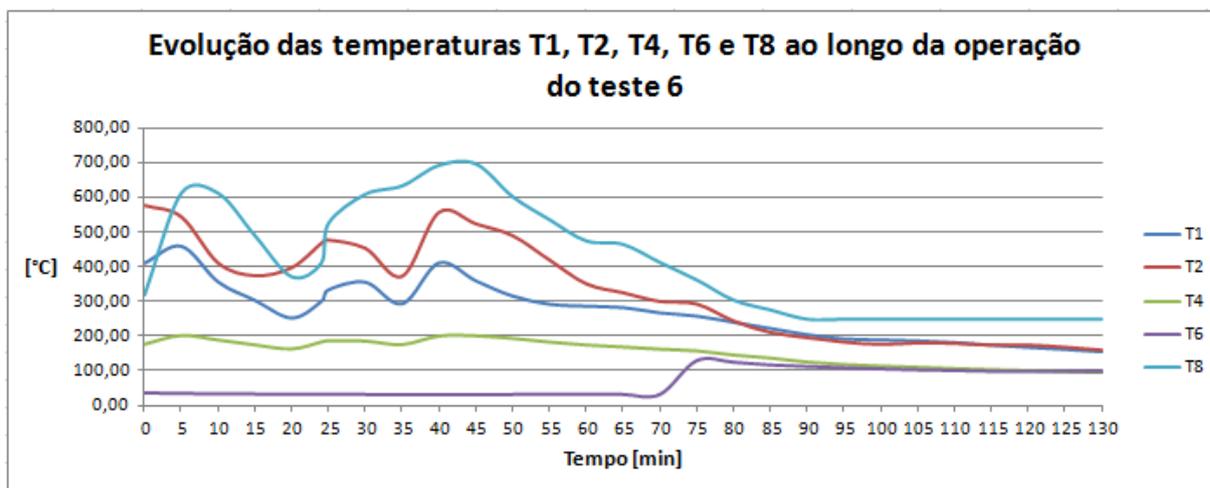


Figura 167: Evolução das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 ao longo do período de operação do teste 6.

Tomou-se a amostragem da operação no caso do teste 6 e não somente a do período de análise, pois, como já explicitado, o SA somente operou por 20 minutos e quebrou. Apesar de esse período ser pouco representativo em termos de amostragem e em termos de repetibilidade para validação, decidiu-se mostrar os resultados.

O resultado interessante deste teste 6 é a possibilidade de verificação da influência da intensificação acústica nas temperaturas em análise em contraste com a alimentação de biomassa que neste teste 6 ocorre aos 34 minutos e o período de operação do SA do minuto 24 ao 45. A Figura 168 mostra a evolução as temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8, para este contraste.

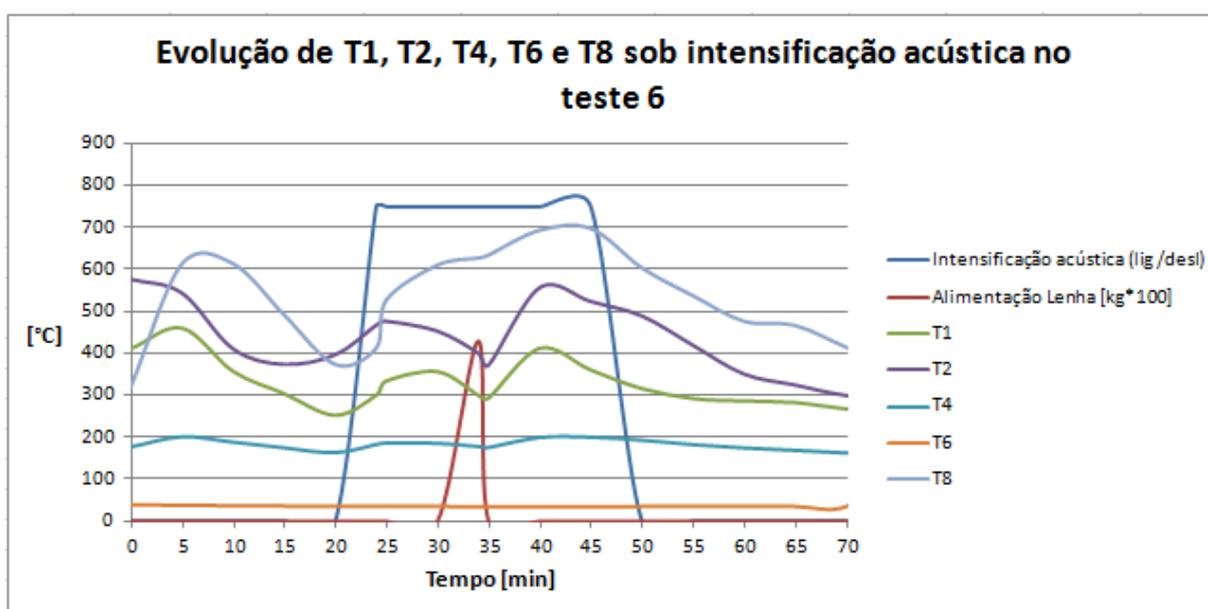


Figura 168: Evolução de T1, T2, T4, T6 e T8 sob Intensificação acústica no teste 6.

Destaca-se no gráfico que o pico em vermelho é a alimentação de biomassa e o retângulo azul mostra o período de intensificação acústica atuando com a operação do SA. Percebe-se claramente a intensa resposta de T8, T1 e T2 e T4 ao acionamento do SA. Após atingirem seus respectivos picos de temperatura, estas começam a baixar até que ocorre a alimentação de biomassa e todas reagem novamente subindo, atingindo novamente picos de temperatura e depois voltam a cair. Porém, dentro do período de acionamento da intensificação acústica, as temperaturas mínimas são mais altas que fora deste período.

Com relação à composição de gases no leito da câmara de combustão ocorre o mesmo efeito descrito para as temperaturas sobre o teor de O<sub>2</sub>. A Figura 169 mostra a evolução da composição de gases durante o período de operação do teste 6. Destaca-se que a intensificação acústica se inicia junto com o início da amostragem no minuto zero e se encerra no minuto 20.

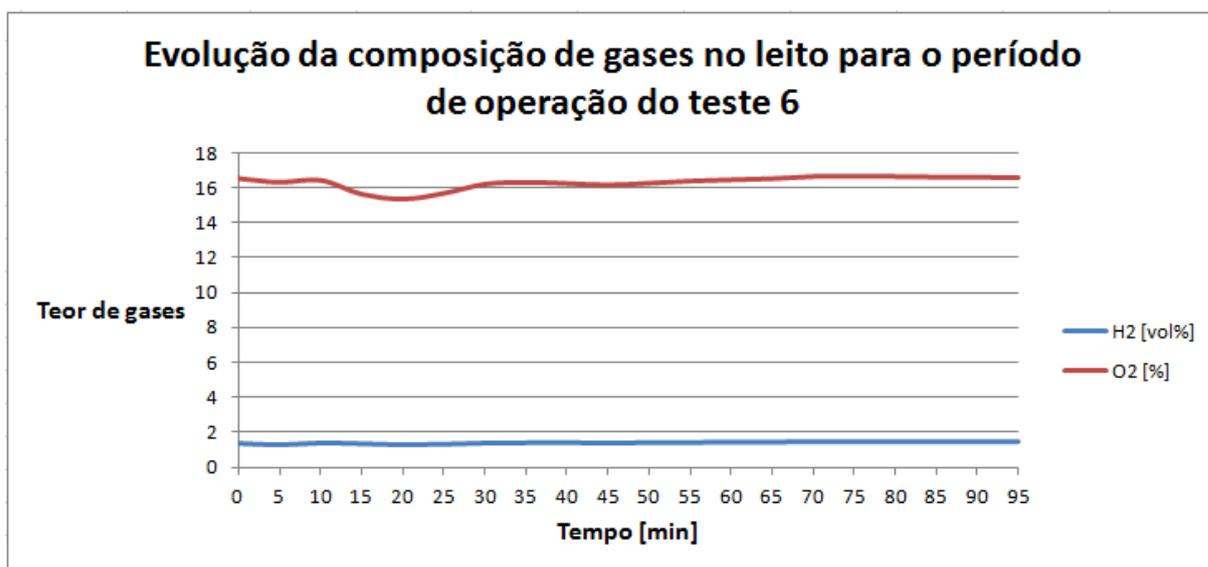


Figura 169: Evolução da composição de gases no leito da câmara de combustão no período de operação do teste 6.

Percebe-se que o teor de O<sub>2</sub> cai durante a operação do SA e volta a subir no minuto 20, assim que o SA para de operar. A Figura 170 mostra a evolução do O<sub>2</sub> durante esta operação.

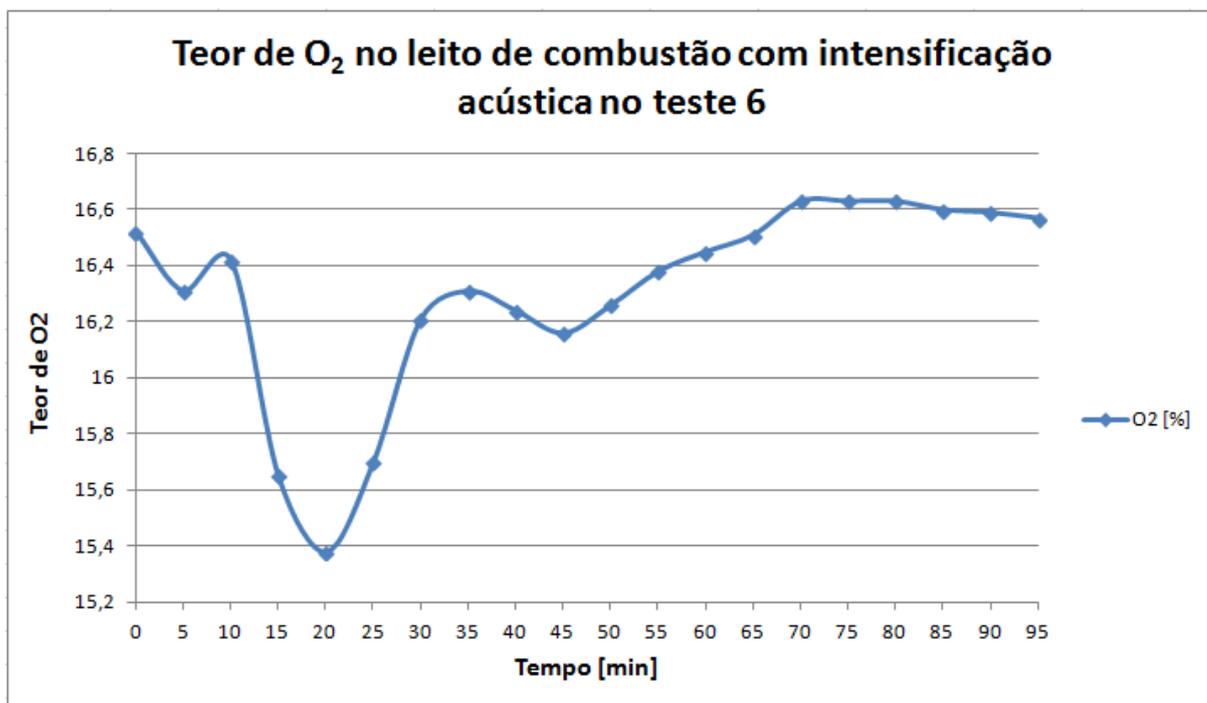


Figura 170: Teor de O<sub>2</sub> no leito da câmara de combustão sob influência de intensificação acústica durante o período de operação do teste 6.

Destaca-se a queda dos teores de O<sub>2</sub> enquanto sob a influência da intensificação acústica, e, em especial o ponto de inflexão e subida após o desligamento do SA no minuto 20. Isso mostra que claramente a intensificação acústica influenciou a composição dos gases no leito da câmara de combustão durante sua operação.

Avalia-se agora a composição de gases na chaminé. A Figura 171 mostra a evolução da composição de gases na chaminé ao longo do período de operação do teste 6.

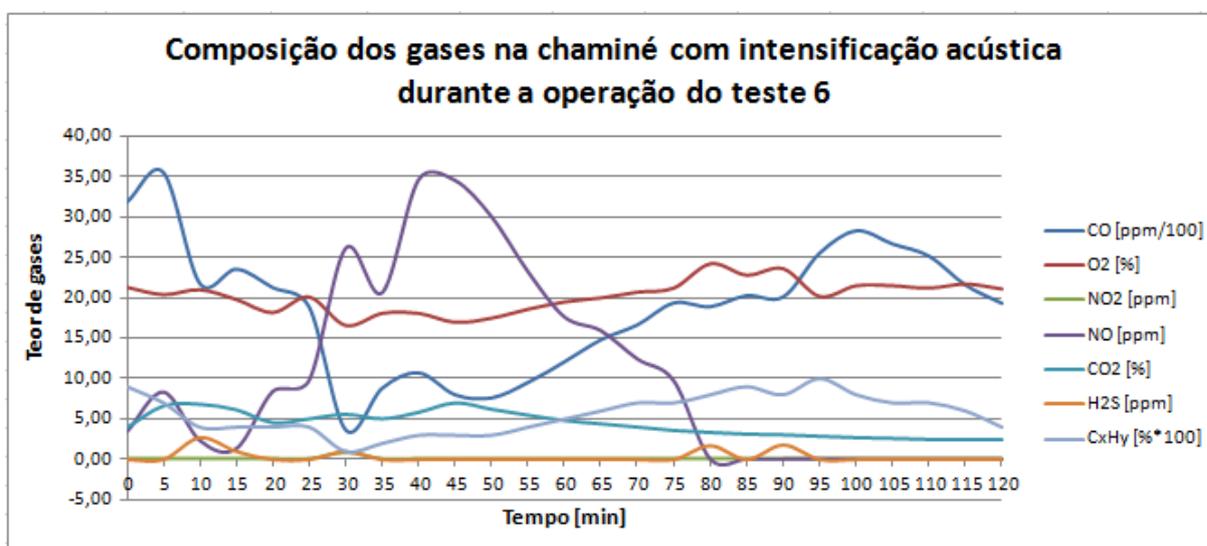


Figura 171: Evolução da composição de gases na chaminé na operação 6.

Destaca-se que para esta análise o início a operação do SA se dá no minuto 25 e o término no minuto 45. Percebe-se que mais uma vez os teores de gases reagem à intensificação acústica. Numa análise em separado do  $O_2$ , CO e  $CO_2$ , em contraste com a operação do SA e a alimentação de biomassa, como mostrada na Figura 172, pode-se perceber a reação dos teores de gases à intensificação acústica mais claramente.

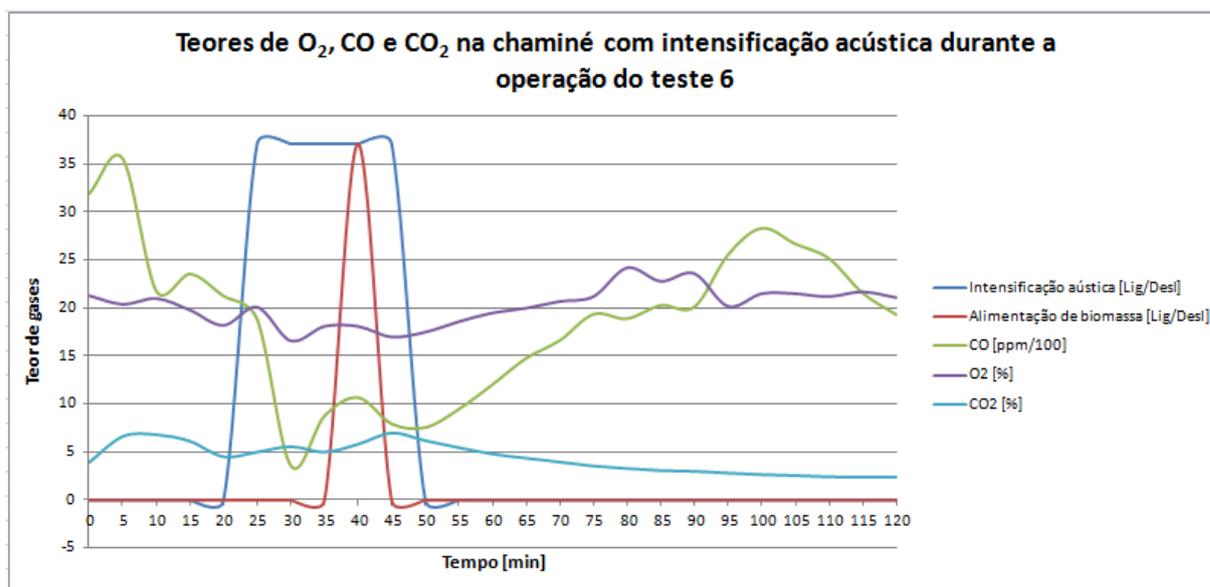


Figura 172: Teores de  $O_2$ , CO e  $CO_2$  na chaminé durante a operação do teste 6.

Percebe-se que o teor CO, que vinha em queda, acentua a tendência de queda no início da operação do SA, varia ao longo desse período de operação do SA, mas retoma a subida assim que o SA é desligado. Já o teor de  $O_2$  subia quando o SA é acionado e inverte sua tendência para queda, depois varia e volta a subir após o desligamento do SA.

O teor de  $CO_2$  vem aumentando e continua a aumentar durante a operação do SA até atingir seu pico e sofrer uma inflexão para queda com o desligamento do SA.

Mais uma vez observa-se que durante a operação do SA houve uma melhor mistura de ar e combustível com consequente melhora da qualidade da combustão, evidenciada pela diminuição dos teores de  $O_2$  e CO e o aumento dos teores de  $CO_2$ .

O teste 6 foi primordial para a avaliação da influência da intensificação acústica no processo de combustão, mesmo com sua análise sendo feita se comparando os períodos de teste com e sem a intensificação acústica. Os resultados analisados neste item, sobre como as temperaturas e as composições de gases no leito e na chaminé reagem à operação do SA,

deixam claro que a intensificação acústica influencia o processo de combustão, melhorando a mistura do ar com a biomassa e conseqüentemente a qualidade da combustão.

### 7.3 ANÁLISE DOS RESULTADOS DO TESTE 7

O teste 7 foi realizado com intensificação acústica em três frequências distintas com no mínimo três intervalos de operação cada uma, tendo assim, amostragem e a repetibilidade necessárias para ser considerado. Além disso, forneceu dados sobre o perfil de temperaturas, composição de gases no leito da câmara de combustão e na chaminé operando com intensificação acústica.

A Figura 173 mostra a evolução das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 ao longo do período de operação do teste 7.

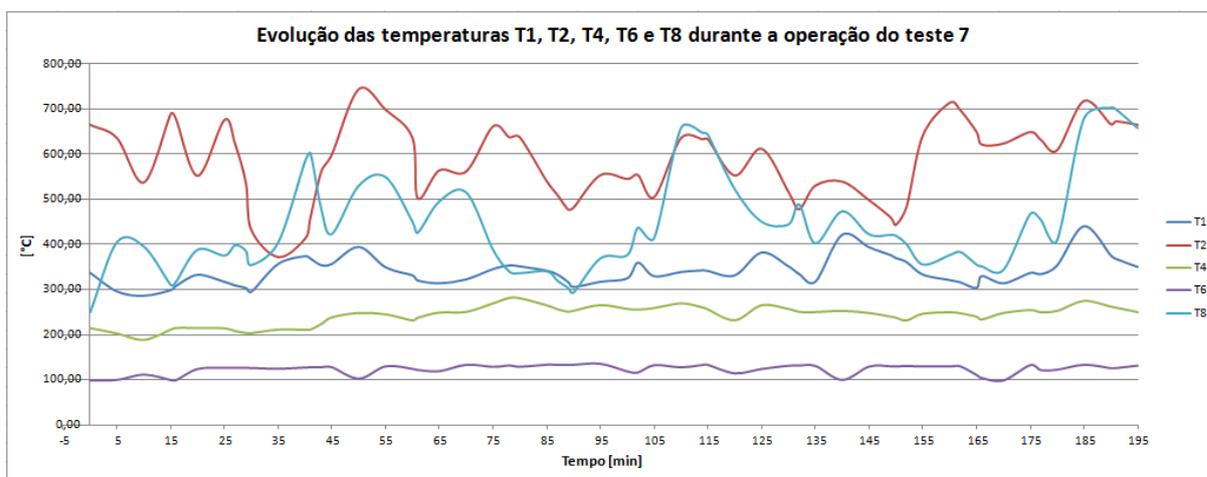


Figura 173: Evolução das temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 ao longo do período de operação do teste 7.

O teste 7 teve 195 minutos considerados em sua amostragem de resultados. Como este período é grande e dificulta a análise dos resultados optou-se separar os períodos de operação do SA para cada frequência para possibilitar a análise separadamente destes intervalos. Houve três testes em frequências distintas, o primeiro intervalo analisado foi do minuto 5 ao 55 com operação do SA em 60 Hz. O segundo intervalo analisado foi do minuto 56 ao 106 com operação do SA em 75 Hz e o terceiro intervalo analisado foi do minuto 130 ao 180 com operação do SA em 90 Hz.

Assim, a Figura 174 mostra o primeiro período analisado, complementado pela Intensificação acústica e pela alimentação de biomassa.

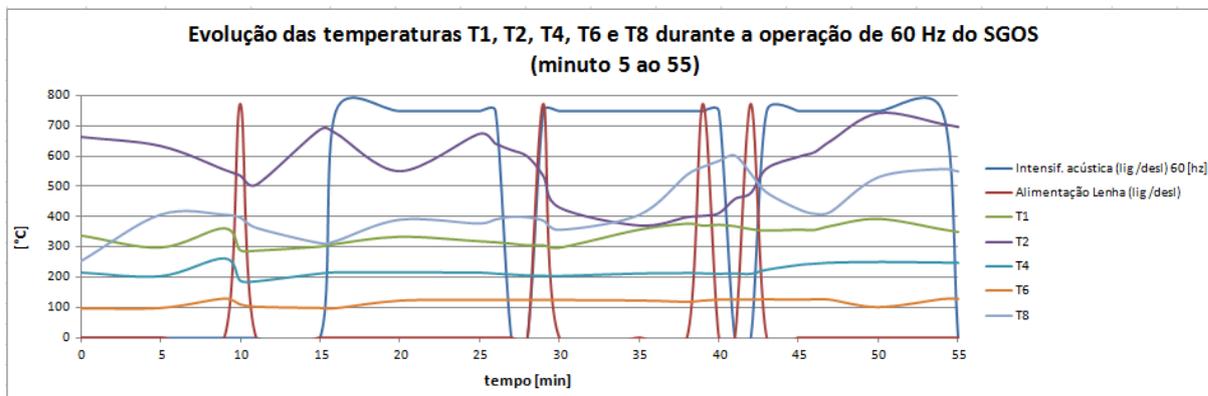


Figura 174: Temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 durante a operação de 60 Hz do SA (minuto 5 ao 55).

Destacam-se para estas análises que os picos são os momentos em que se realizou a alimentação de biomassa e os retângulos são os períodos de ativação do SA.

A Figura 175 apresenta a evolução destas temperaturas para o período em que o SA operou a 75 Hz.

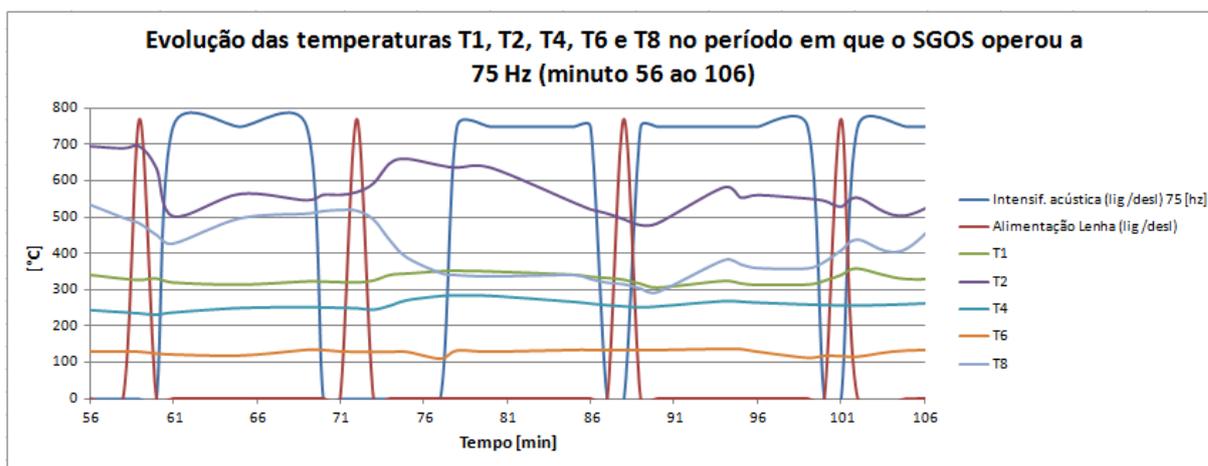


Figura 175: Temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 durante a operação de 75 Hz do SA (minuto 56 ao 106).

A Figura 176 apresenta a evolução destas temperaturas para o período em que o SA operou a 75 Hz.

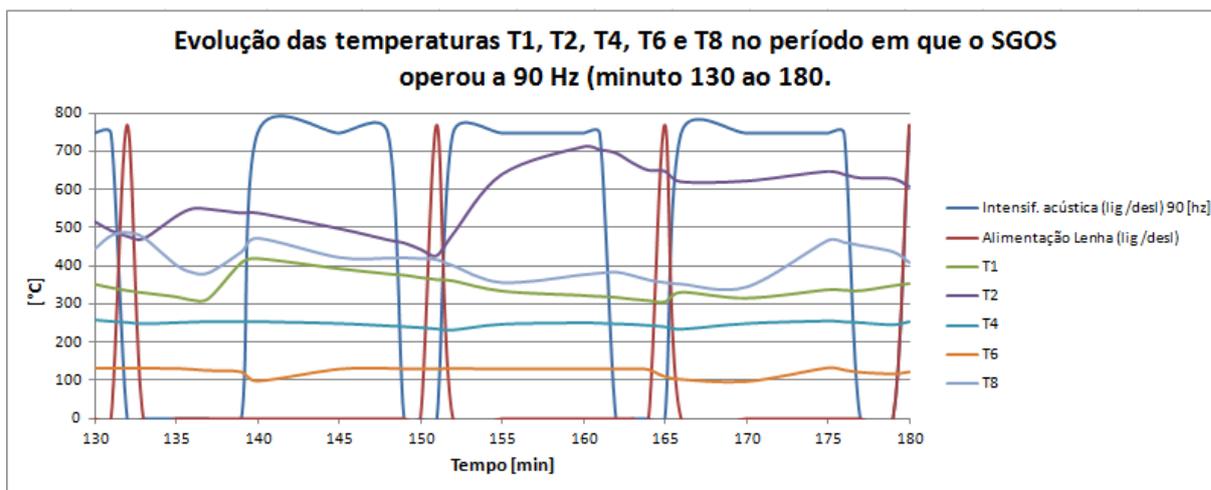


Figura 176: Temperaturas T1, T2, T4, T6 e T8 durante a operação de 90 Hz do SA (minuto 130 ao 180).

Percebe-se que as temperaturas analisadas nos três períodos em alguns casos apresentam reação ao SA, porém, e forma mais sutil que no teste 6. Essa reação pode ser confundida com a reação à alimentação da biomassa, o que torna a análise da evolução das temperaturas nestes períodos incerta com relação à influência da intensificação acústica.

Para auxiliar a análise da composição dos gases no leito e na chaminé, apresenta-se a **Erro! fonte de referência não encontrada.** com os acionamentos e desligamentos do SA.

Tabela 62: Acionamento e desligamento do SA durante a operação do teste 7.

Acionamento e desligamento do SGOS durante a operação do teste 7													
f [Hz]		60			75				90				
Período do teste		1	2	3	1	2	3	4	1	2	3	4	5
Liga	hora	15:32	15:45	15:59	16:17	16:34	16:45	16:58	17:16	17:36	17:48	18:02	18:16
	minuto	17	29	43	61	78	89	102	120	140	152	166	180
Desliga	hora	15:43	15:57	16:11	16:26	16:43	16:56	17:10	17:28	17:45	17:58	18:13	18:27
	minuto	27	41	55	70	87	100	114	132	149	162	177	191

Apresentam-se gráficos com a evolução do  $O_2$  no leito da câmara de combustão para o período de operação do SA em 60 Hz na Figura 177, em 75 Hz na Figura 178 e em 90 Hz na Figura 179

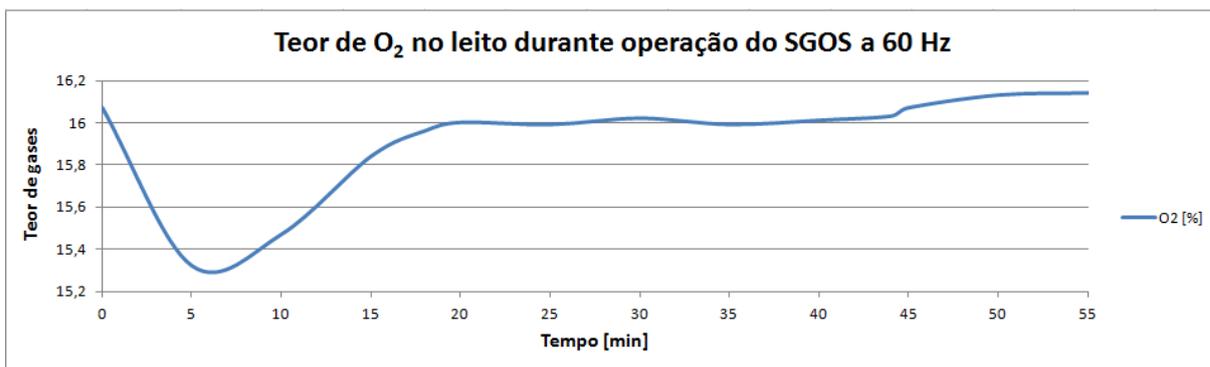


Figura 177: Teor de O<sub>2</sub> no leito durante a Operação do SA a 60 Hz no teste 7.

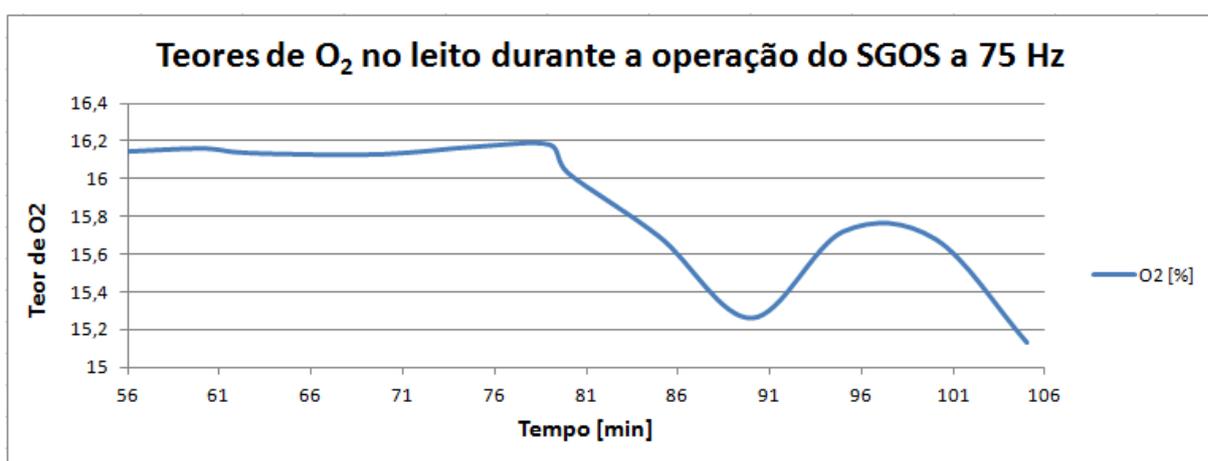


Figura 178: Teor de O<sub>2</sub> no leito durante a Operação do SA a 75 Hz no teste 7.

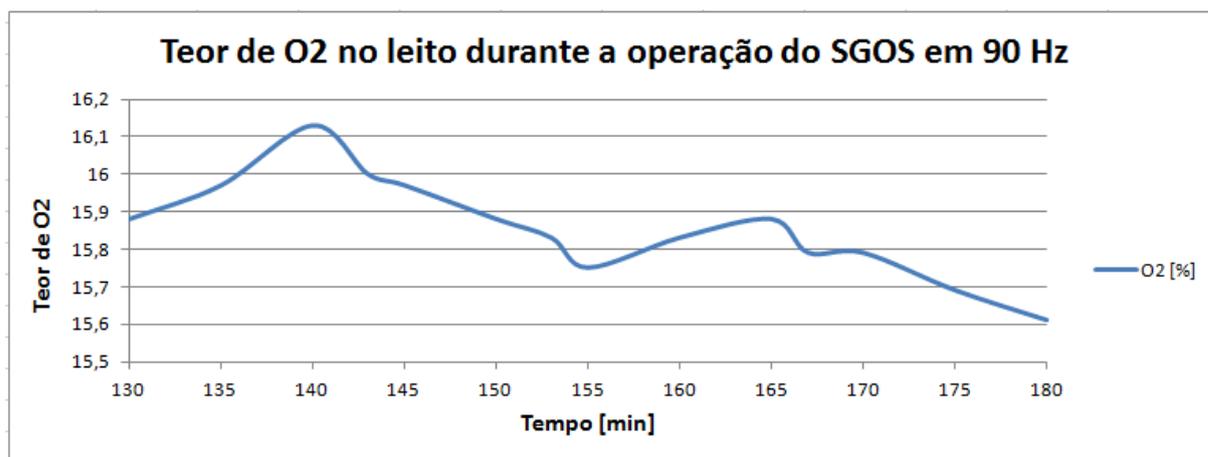


Figura 179: Teor de O<sub>2</sub> no leito durante a Operação do SA a 90 Hz no teste 7.

Apresentam-se gráficos com a evolução do O<sub>2</sub> no leito da câmara de combustão para o período de operação do SA em 60 Hz na Figura 180, em 75 Hz na Figura 181 e em 90 Hz na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

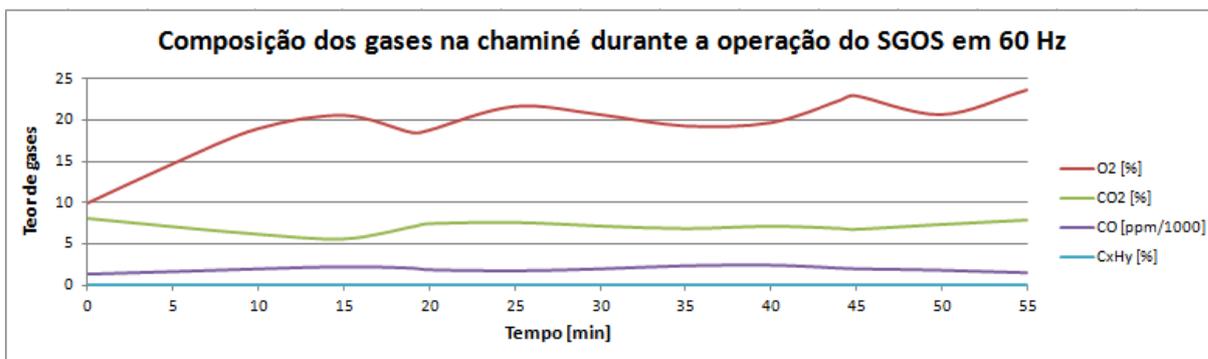


Figura 180: Composição de gases na chaminé durante a operação do SA a 60 Hz no teste 7.

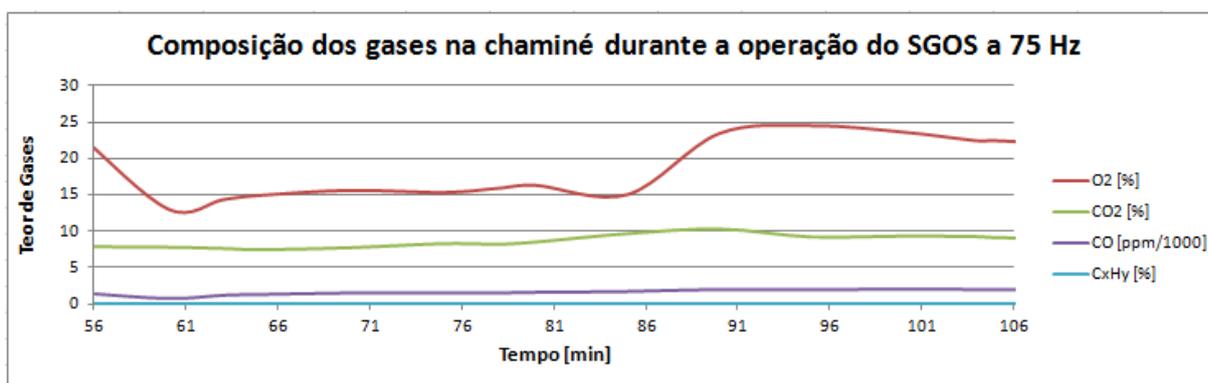


Figura 181: Composição de gases na chaminé durante a operação do SA a 75 Hz no teste 7.

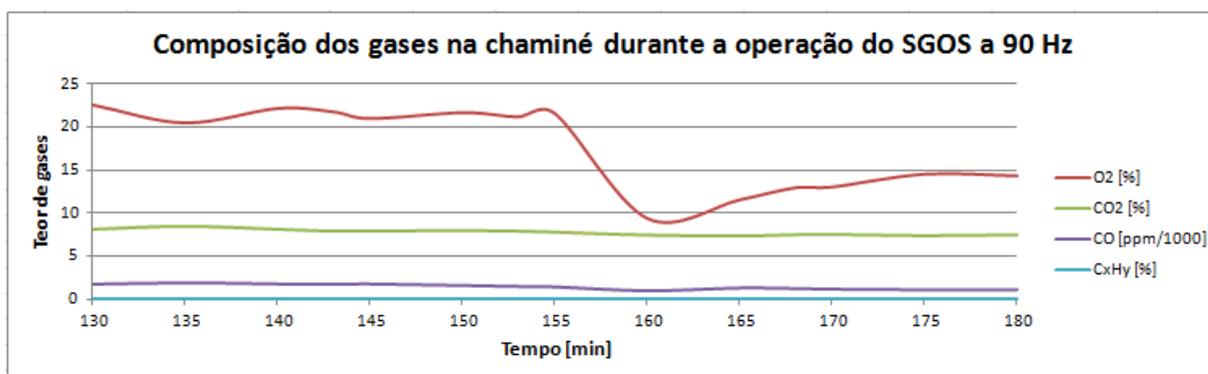


Figura 182: Composição de gases na chaminé durante a operação do SA a 90 Hz no teste 7.

Apresentam-se neste item gráficos com a evolução das temperaturas e das composições de gases no leito da câmara de combustão e na chaminé. Os resultados neles contidos mostram sutil dependência da intensificação acústica quando se compara a análise dos resultados do teste 6.

Isso se justifica pela utilização no teste 7 de um SGOG com 200 [W] de potência real, que é a metade da potência utilizada no SA do teste 6. Além disso, houve a instalação da película de borracha entre o SA e a tubulação onde escoava o ar primário para a proteção do *speaker* do SA, o que pôde ter atenuado em parte a transmissão da pressão acústica das ondas sonoras ao escoamento de ar primário.

Avalia-se na sequência em termos comparativos o teste 5, que é a referência sem intensificação acústica com os testes 6 e 7, ambos com intensificação acústica.

## **7.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DOS TESTES 5 E 7**

O teste 5 foi realizado para que seus resultados pudessem ser a referência da operação convencional, ou seja, sem intensificação acústica. Realizou-se o teste 7 com a intensificação acústica. Analisa-se neste item a influência da intensificação acústica se comparando os testes 5 e 7. Ambos já tiveram seus números e resultados apresentados.

Inicia-se a comparação pelas temperaturas.

### **7.4.1 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTE 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 60 Hz**

Apresentam-se as temperaturas do teste 5 comparadas com as temperaturas do teste 7 durante a operação do SA em 60 Hz, com indicação dos períodos com a operação do SA e dos momentos de alimentação de biomassa. Como T6 e T8 apresentam maior memória térmica em função de estarem diretamente ligadas a energia transferida do escoamento à água do tubulão, serão analisadas as comparações nas temperaturas T1, T2 e T8 que estão diretamente relacionadas à combustão na câmara.

A Figura 183 mostra a comparação de T1, a Figura 184 de T2, e a Figura 185 de T8.

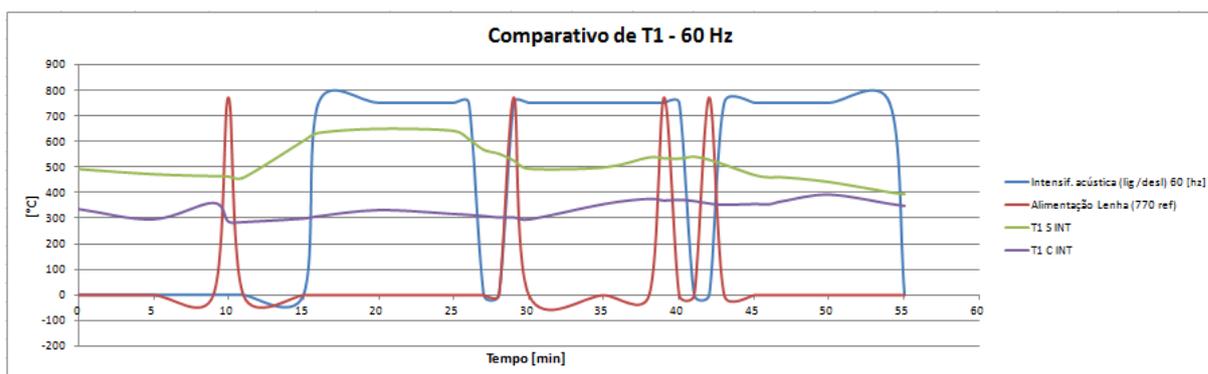


Figura 183: Comparativo T1 – 60 Hz.

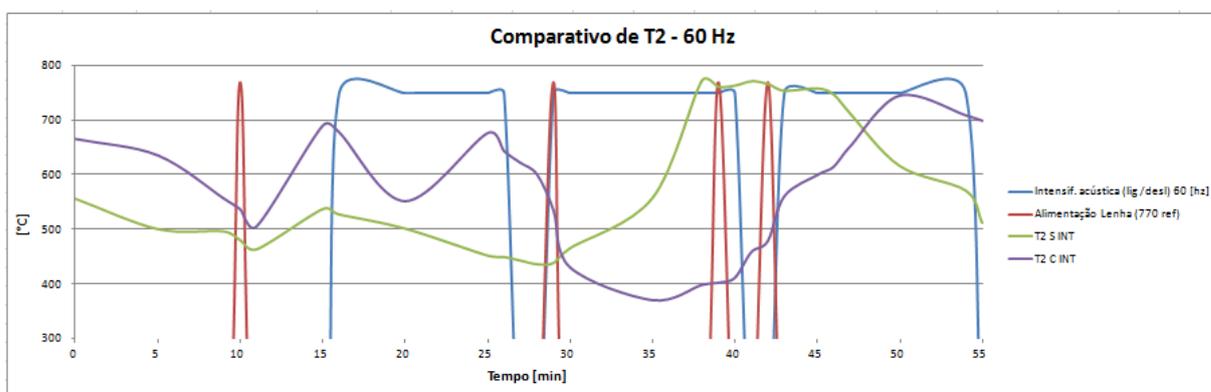


Figura 184: Comparativo T2 – 60 Hz.

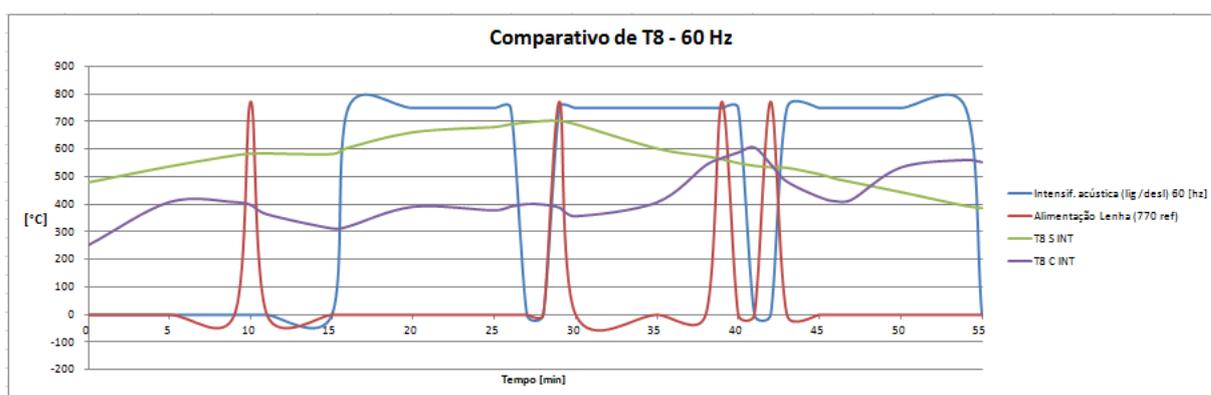


Figura 185: Comparativo T8 – 60 Hz.

Esperava-se que as temperaturas fossem mais elevadas com a intensificação acústica, o que não fica evidente ao se analisar esses gráficos, Isso pode ser um resultado da diferença das operações 5 e 7.

## 7.4.2 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 75 Hz

Apresentam-se as temperaturas do teste 5 individualmente contrastadas com as temperaturas do teste 7 durante a operação do SA em 75 Hz, com indicação dos períodos com a operação do SA e dos momentos de alimentação de biomassa. Como no item anterior, serão analisados T1, T2 e T8.

A Figura 186 mostra a comparação de T1, a Figura 187 de T2, e a Figura 188 de T8.

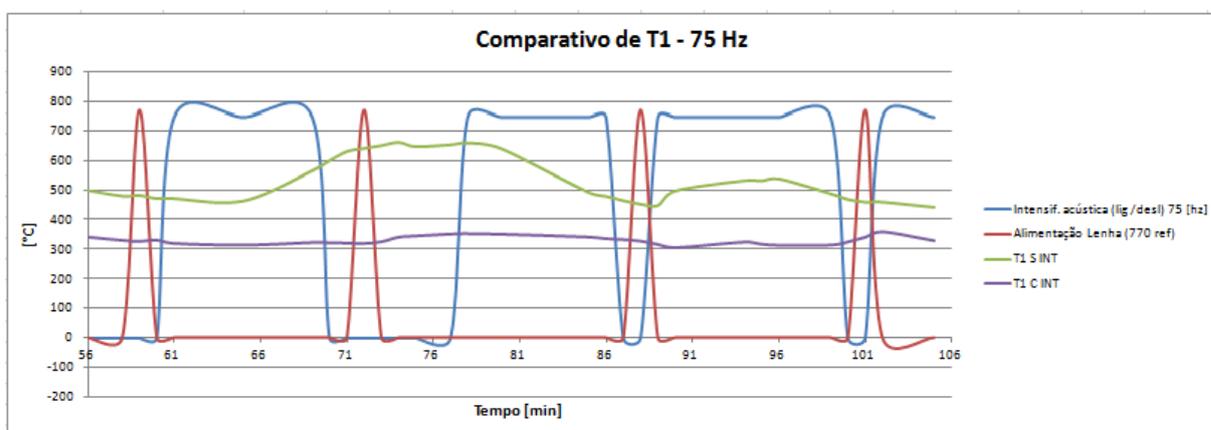


Figura 186: Comparativo T1 – 75 Hz.

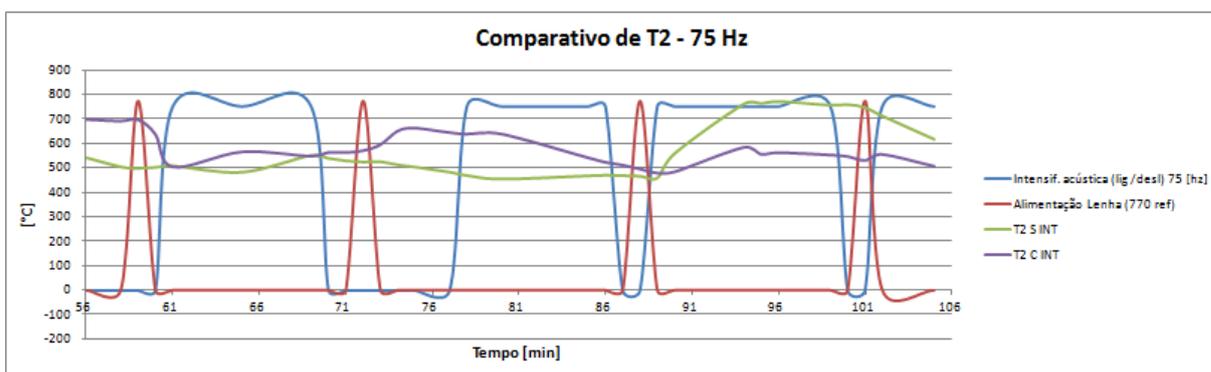


Figura 187: Comparativo T2 – 75 Hz.

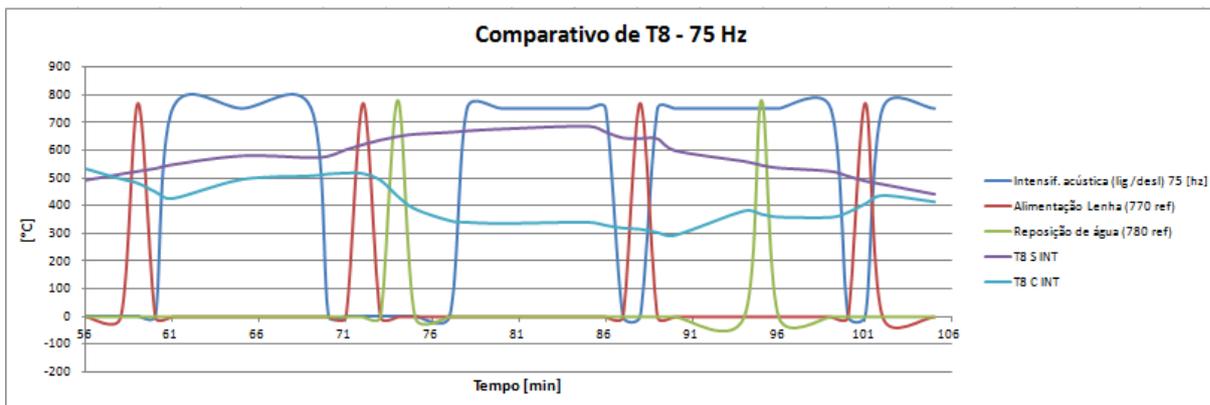


Figura 188: Comparativo T8 – 75 Hz.

Analisando-se T2, percebe-se que nos intervalos de operação do SA a temperatura do teste 7 supera a temperatura do teste 5, apesar de na média da operação, T2 no teste 5 apresentar um valor de 100 [°C] a mais que T2 no teste 7, o que seria um indicativo da intensificação acústica atuando e melhorando a combustão durante a operação do teste 7, porém não se pode tirar esta conclusão de forma definitiva quando se analisa T1 e T8, que permaneceram durante todo o período analisado em patamares menores no caso do teste 7 em relação ao teste 5.

### 7.4.3 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 90 Hz

Apresentam-se neste item as análises de T1, T2 e T8 com o SA operando a 90 Hz no teste 7.

A Figura 189 mostra a comparação de T1, a Figura 190 de T2, e a Figura 191 de T8.

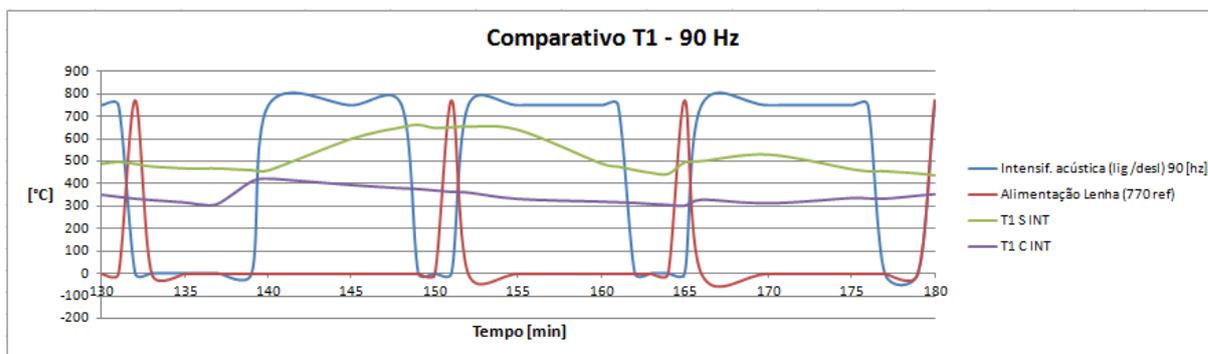


Figura 189: Comparativo T1 – 90 Hz.

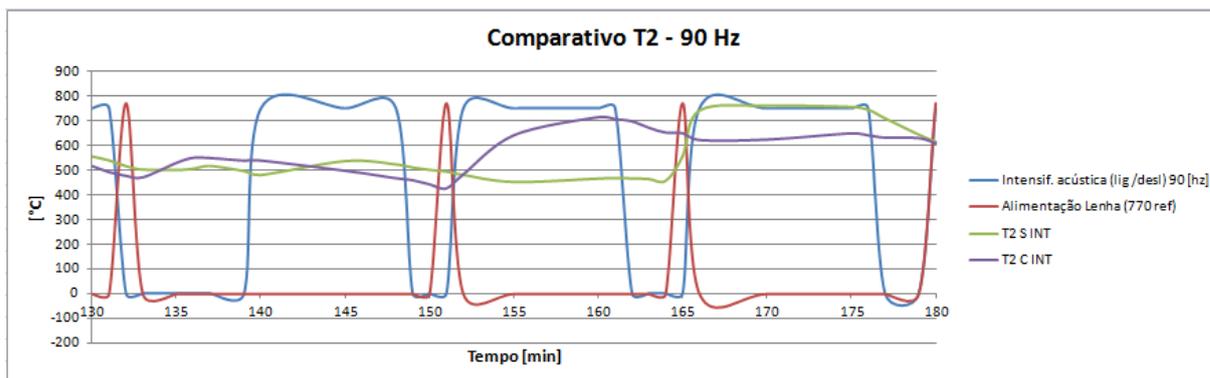


Figura 190: Comparativo T2 – 90 Hz.

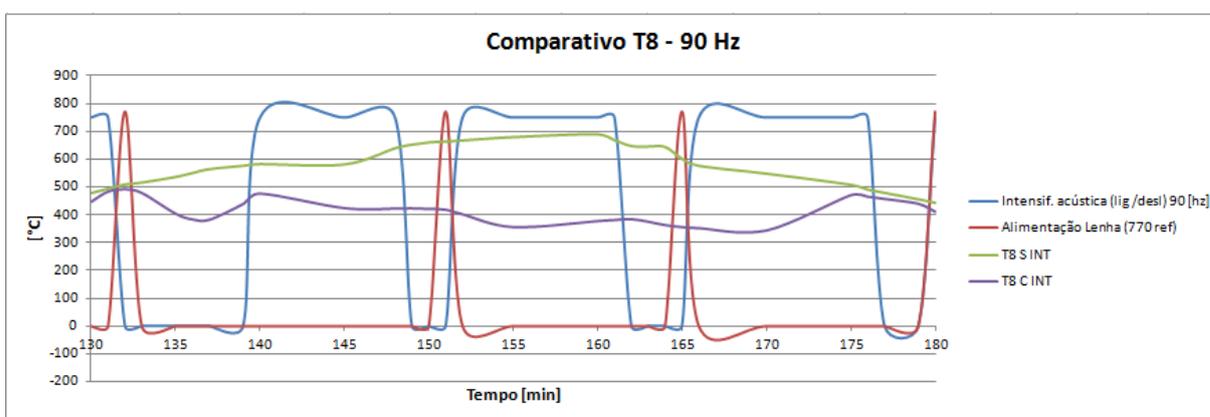


Figura 191: Comparativo T8 – 90 Hz.

A mesma análise do item anterior vale para este. T2 apresenta alguns momentos de superioridade de nos níveis de temperatura do teste 7 com relação ao teste 5, principalmente nos momentos em que o SA está operante, o que indica uma reação de T2 no teste 7 `intensificação acústica. Mas essa reação não fica clara em T1 nem em T8 ao longo do período analisado.

Analisa-se a seguir a composição de gases.

#### 7.4.4 COMPARATIVO DAS COMPOSIÇÕES DE GASES NO LEITO ENTRE OS TESTES 5 E 7

Apresentam-se os teores de O<sub>2</sub>, do teste 5 individualmente comparados com os seus teores do teste 7 durante a operação do SA em 60, 75 e 90 Hz, com indicação dos períodos com a operação do SA.

A Figura 192 mostra a comparação do  $O_2$  para o período de operação de SA em 60 Hz, a Figura 193 para 75 Hz e a Figura 194 para 90 Hz

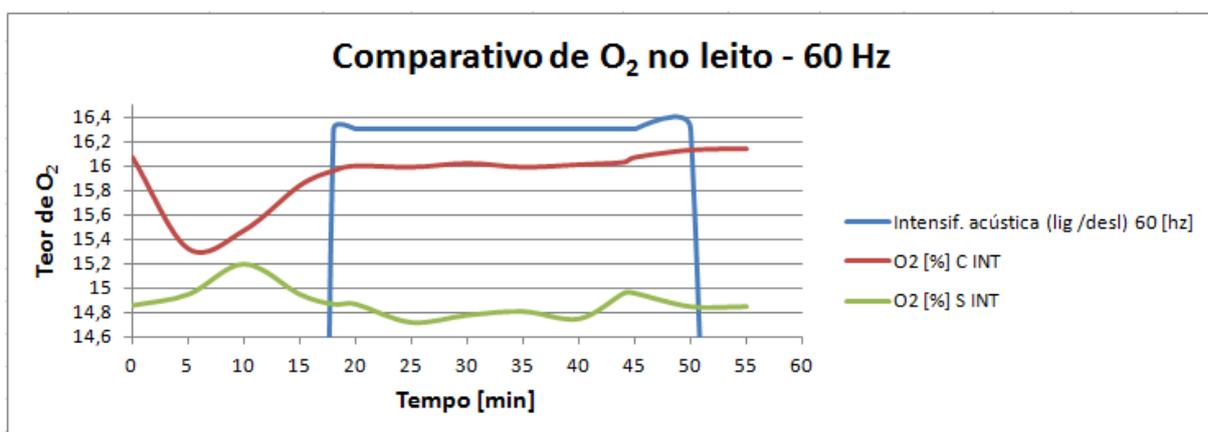


Figura 192: Comparativo de  $O_2$  no leito – 60 Hz.

Os teores de  $O_2$  no teste 7 se mantêm acima dos teores para o teste 5, o que indica que no leito não houve, ou houve muito pouca influência da operação do SA sobre o processo de combustão em 60 Hz.

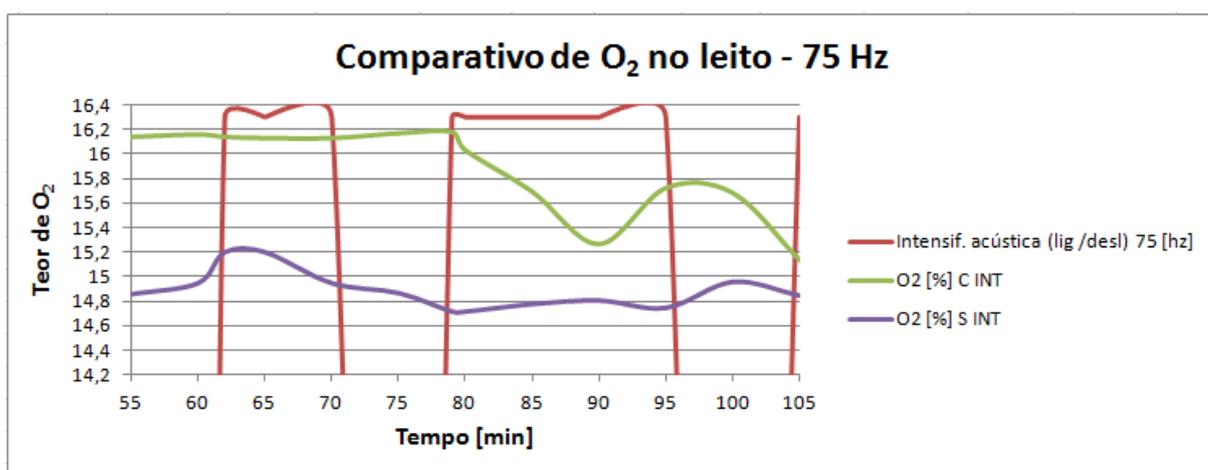


Figura 193: Comparativo de  $O_2$  no leito – 75 Hz.

O minuto 80 apresenta uma clara indicação da influência do acionamento do SA sobre o processo de combustão no teste 7 com a inflexão da curva para queda dos níveis do teor do  $O_2$ , o que indica acréscimo no seu consumo. No mais, vale a mesma avaliação feita para o período de acionamento de SA em 60 Hz.

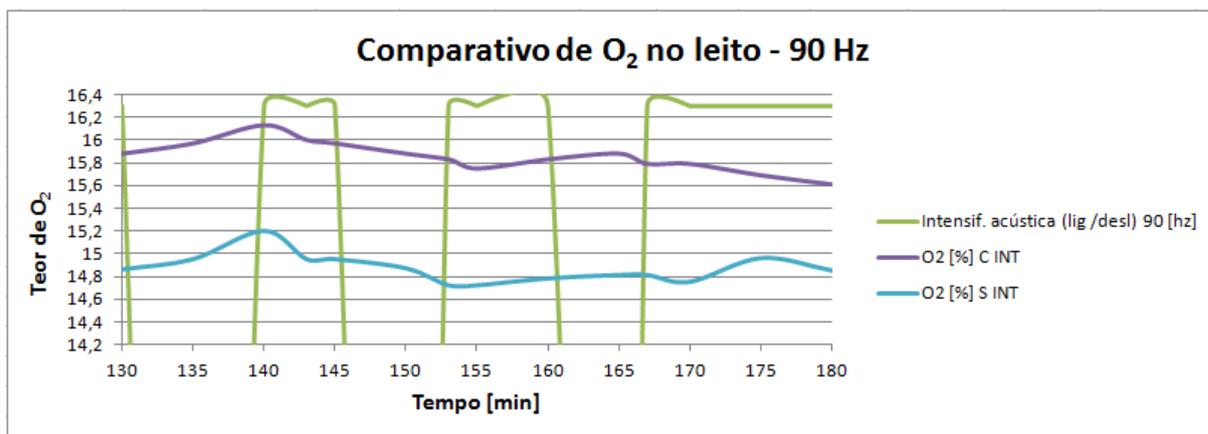


Figura 194: Comparativo de O<sub>2</sub> no leito – 90 Hz.

Apesar dos teores de O<sub>2</sub> ao longo do período de operação do SA em 90 Hz para o teste 7 sinalizarem que são influenciados pela operação do SA, isso ocorre de forma sutil e permite estender para esta análise a mesma avaliação feita para o período de acionamento de SA em 60 Hz.

#### 7.4.5 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DOS GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 60 Hz

Apresentam-se os teores de O<sub>2</sub>, CO e CO<sub>2</sub> do teste 5 individualmente comparados com os seus teores do teste 7 durante a operação do SA em 60 Hz, com indicação dos períodos com a operação do SA.

A Figura 195 mostra a comparação do O<sub>2</sub>, a Figura 196 do CO e a Figura 197 do CO<sub>2</sub>.

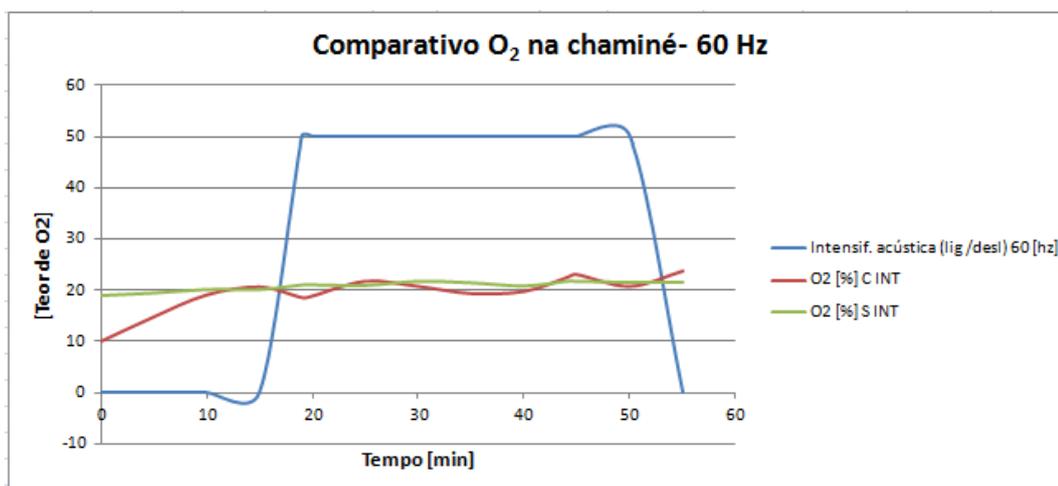


Figura 195: Comparativo O<sub>2</sub> na chaminé – 60 Hz.

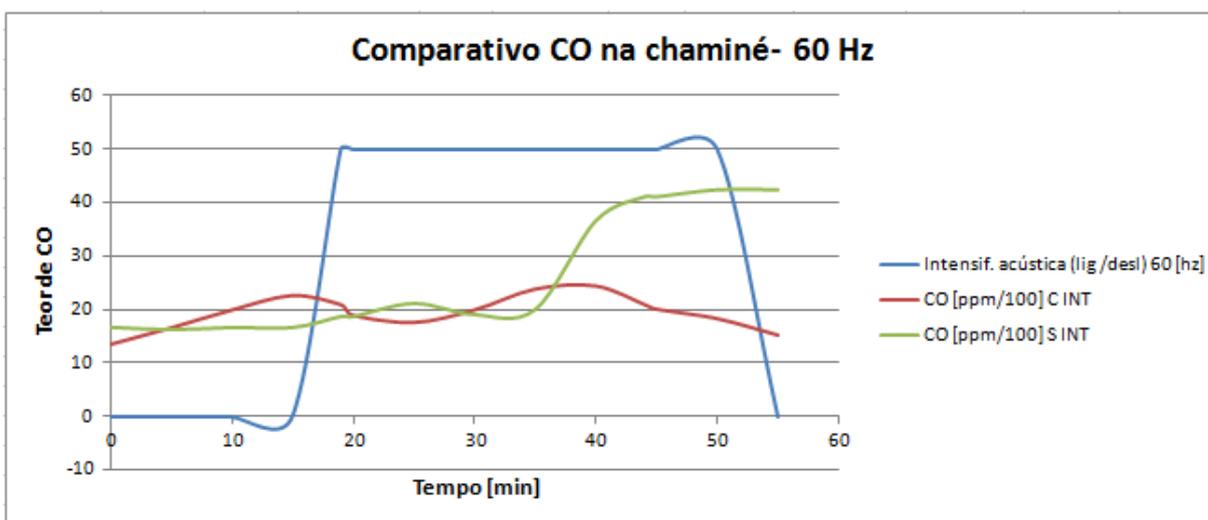


Figura 196: Comparativo CO na chaminé – 60 Hz.

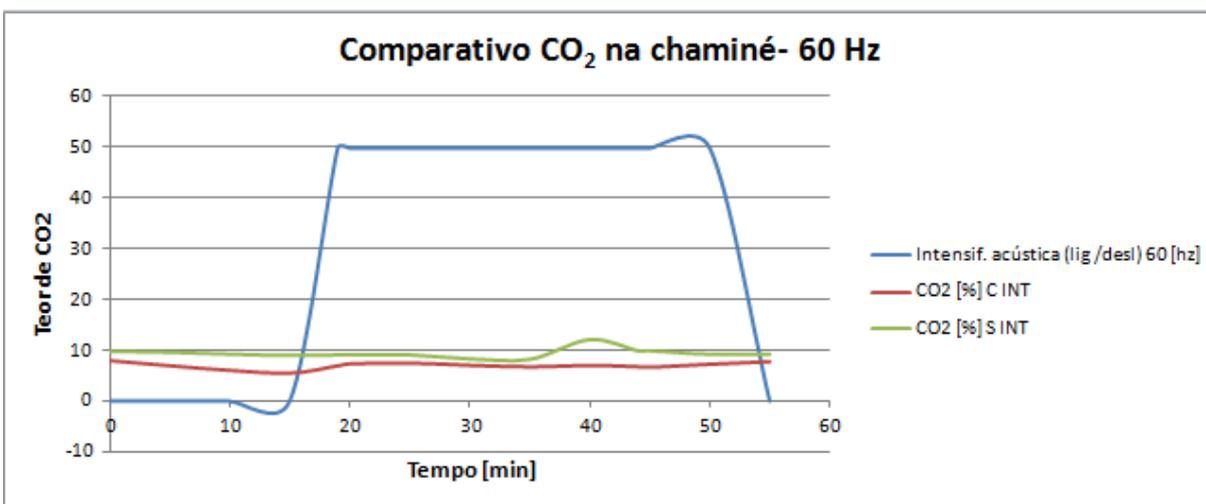


Figura 197: Comparativo CO<sub>2</sub> na chaminé – 60 Hz.

Os teores de O<sub>2</sub> e CO respondem à intensificação acústica invertendo sua tendência de subida para descida quando do acionamento do SA quando comparados com sua própria operação, porém não apresentam significativa diferença entre as operações dos testes 5 e 7.

O mesmo vale para o CO<sub>2</sub> que inverte uma tendência de queda para subida no acionamento do SA.

## 7.4.6 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 75 Hz

Apresentam-se os mesmos teores do item anterior, porém com a operação do SA em 75 Hz, com indicação dos períodos com a operação do SA.

A Figura 198 mostra a comparação do O<sub>2</sub>, a Figura 199 do CO e a Figura 200 do CO<sub>2</sub>.

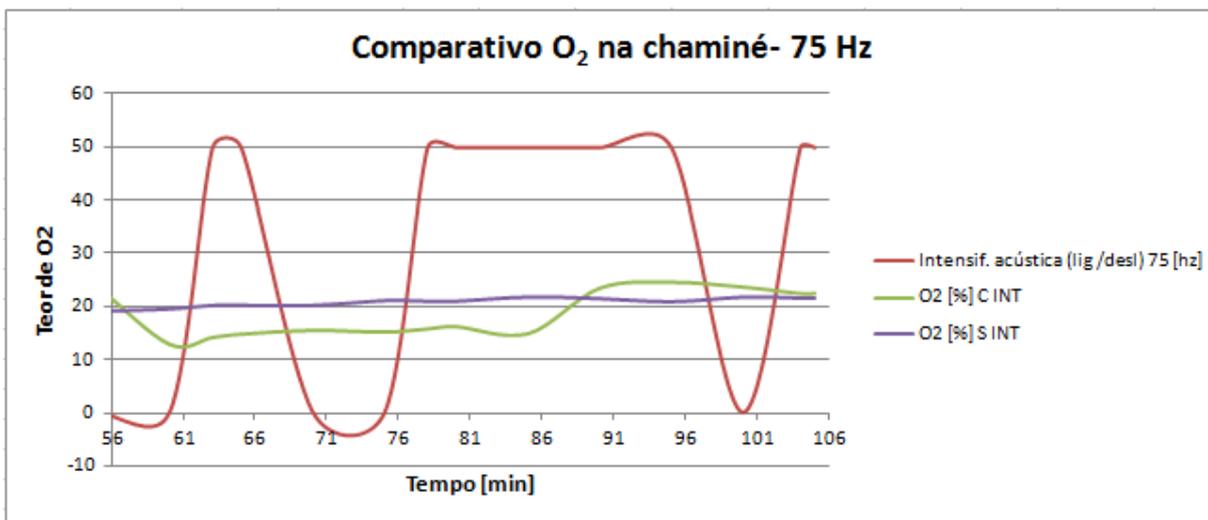


Figura 198: Comparativo O<sub>2</sub> na chaminé – 75 Hz.

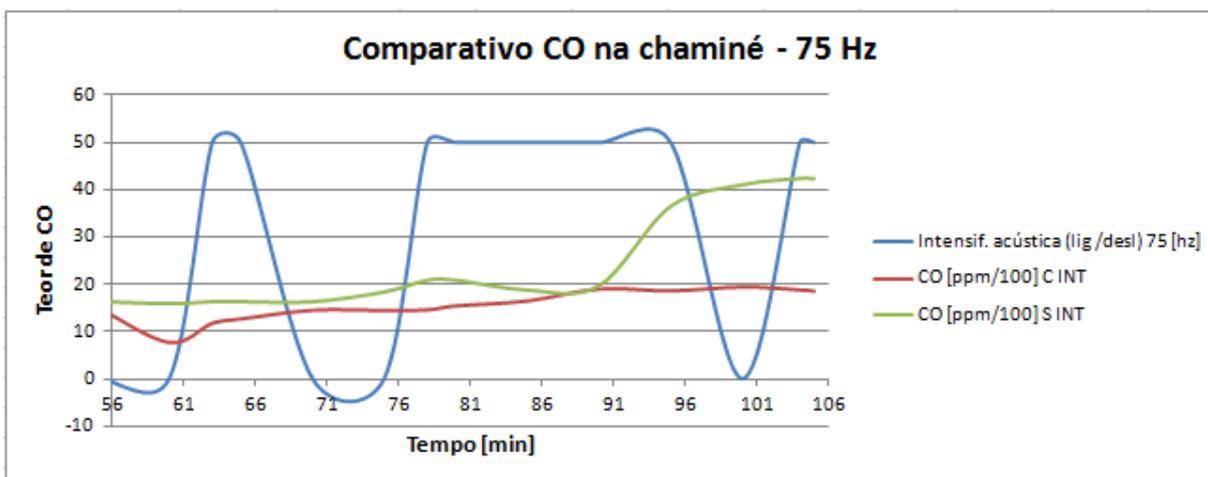


Figura 199: Comparativo CO na chaminé – 75 Hz.

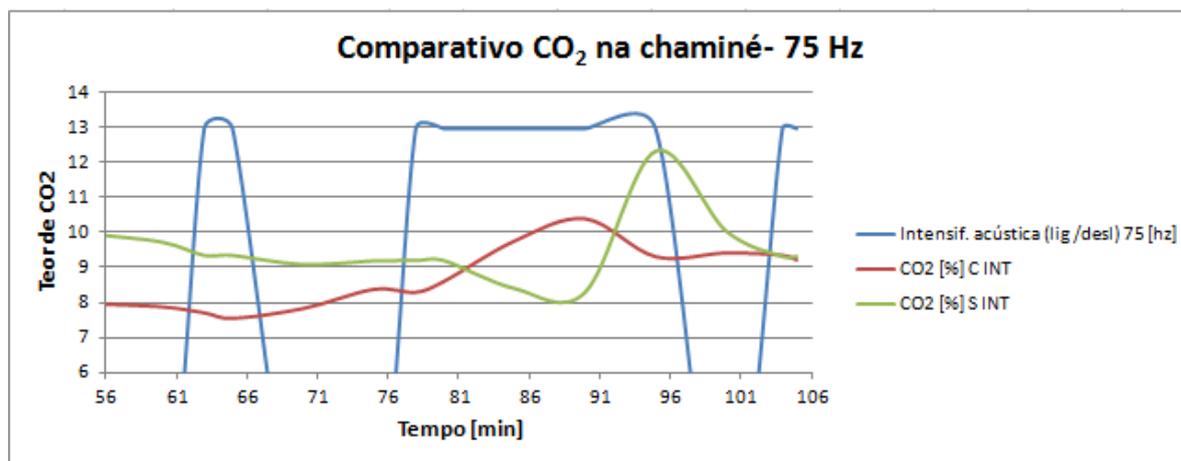


Figura 200: Comparativo CO<sub>2</sub> na chaminé – 75 Hz.

Para o período de operação em 75 Hz é válida a mesma análise feita para o período de operação do SA em 60 Hz, porém, no caso dos teores de O<sub>2</sub> e do CO<sub>2</sub>, os resultados do teste 7 durante a operação do SA em 75 Hz são inferiores aos do teste 5, o que pode indicar que nesta frequência houve resposta da combustão à intensificação acústica. Porém, mesmo com este comportamento dos teores de O<sub>2</sub> e CO, os teores de CO<sub>2</sub> se mantêm no teste 7 menores que no teste 5.

#### 7.4.7 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 7 COM O SA OPERANDO A 90 Hz

Apresentam-se os mesmos teores do item anterior, porém com a operação do SA em 90 Hz, com indicação dos períodos com a operação do SA.

A Figura 201 mostra a comparação do O<sub>2</sub>, a Figura 202 do CO e a Figura 203 do CO<sub>2</sub>.

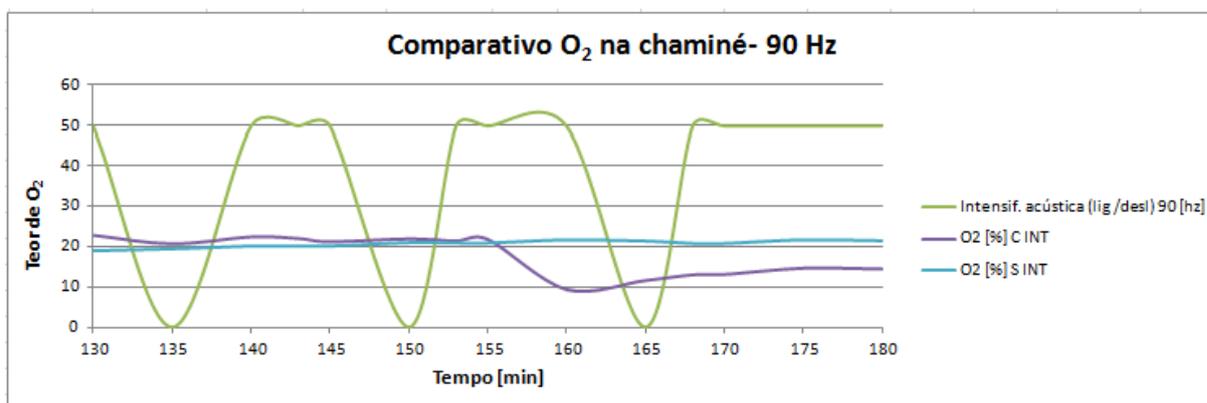


Figura 201: Comparativo de O<sub>2</sub> na chaminé – 90 Hz.

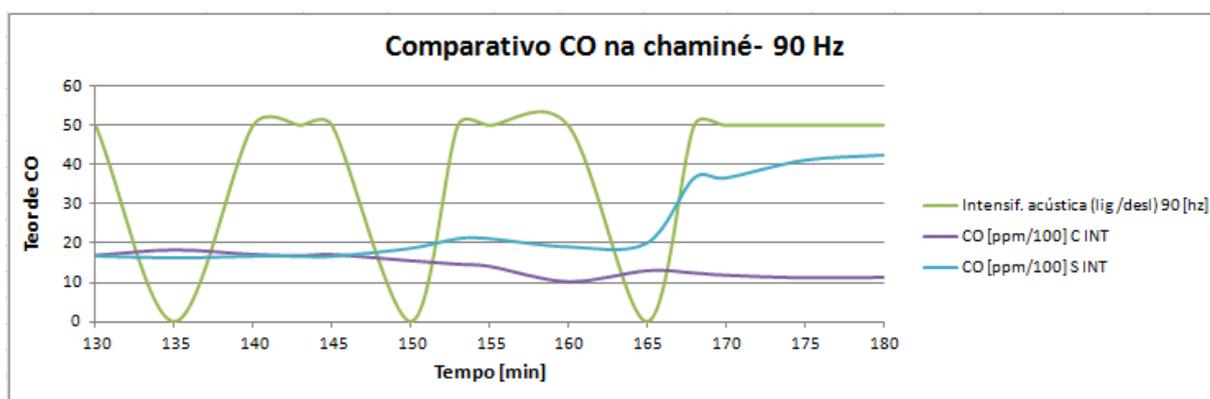


Figura 202: Comparativo de CO na chaminé – 90 Hz.

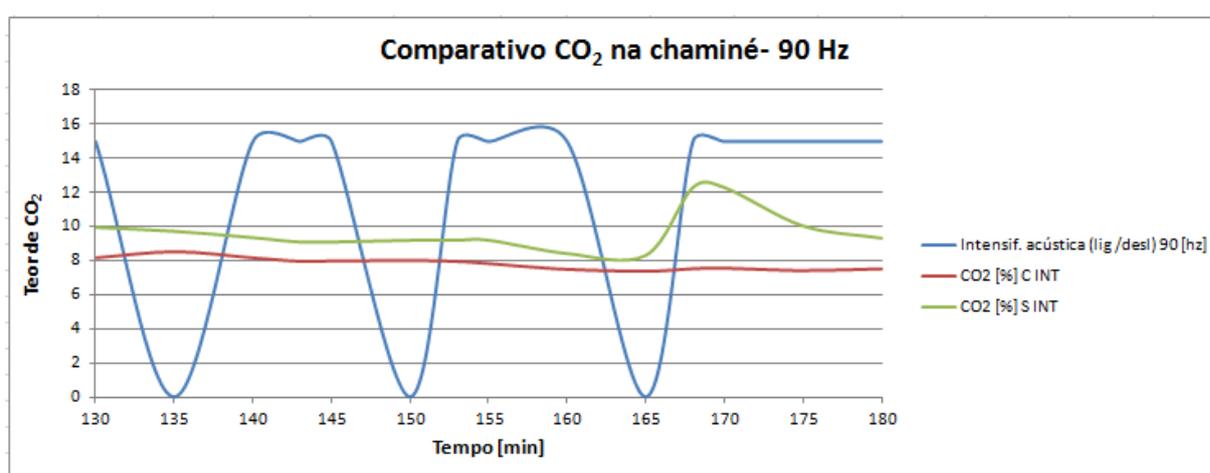


Figura 203: Comparativo de CO<sub>2</sub> na chaminé – 90 Hz.

Os comportamentos apresentados no período de operação de 75 Hz se repetem em 90 Hz, o que novamente pode indicar que nessa frequência houve influência da intensificação acústica sobre o processo de combustão.

Esta análise encerra os comparativos entre o teste 5 e o teste 7.

Apresenta-se a seguir a comparação entre o teste 5 e o teste 6.

## 7.5 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS DOS TESTES 5 E 6

Apresenta-se a comparação dos resultados do teste 6, que teve o SA acionado por 20 minutos com o teste 5. Como critério, considerou-se 50 minutos da operação do teste 6 para que se pudesse ter gráficos comparativos com o mesmo período amostral de ambos os testes.

## 7.5.1 COMPARATIVO DAS TEMPERATURAS ENTRE OS TESTES 5 E 6

Apresentam-se as temperaturas do teste 5 individualmente contrastadas com as temperaturas do teste 6 durante a operação do SA, com indicação dos períodos com a operação do SA. Apresentam-se as comparações para as mesmas temperaturas T1, T2 e T8 avaliadas no comparativo entre teste 5 e teste 7.

A Figura 204 mostra o comparativo para T1, a Figura 205 para T2 e a Figura 206 para T8.

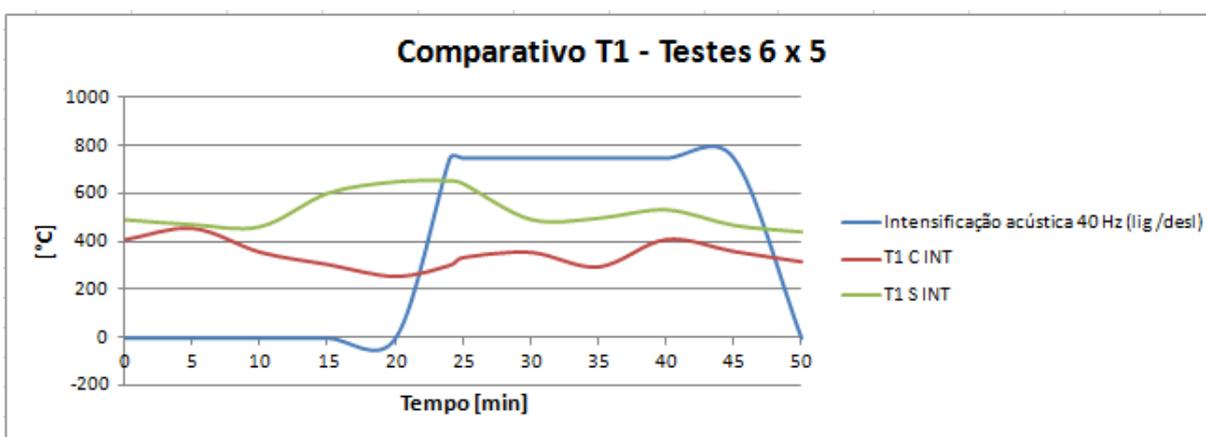


Figura 204: Comparativo T1 – Testes 6 x 5.

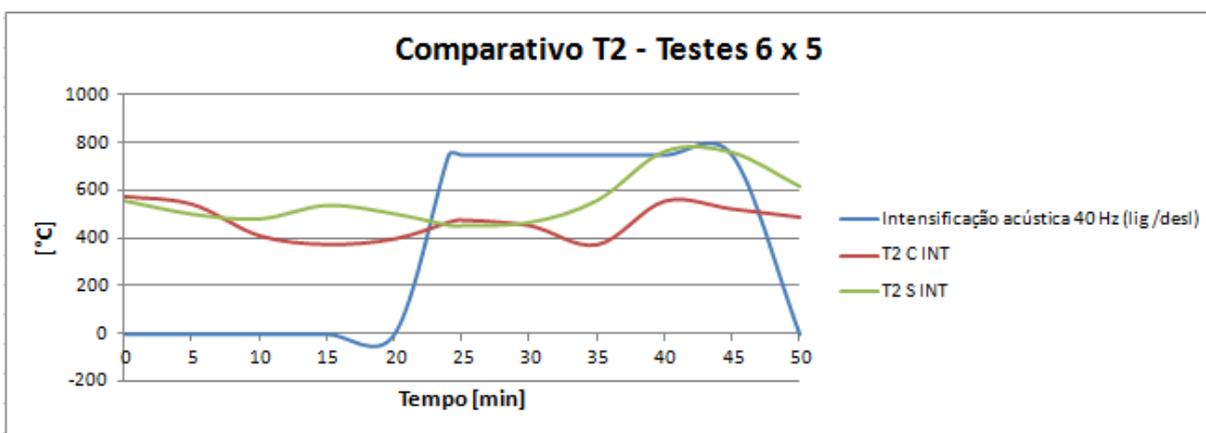


Figura 205: Comparativo T2 – Testes 6 x 5.

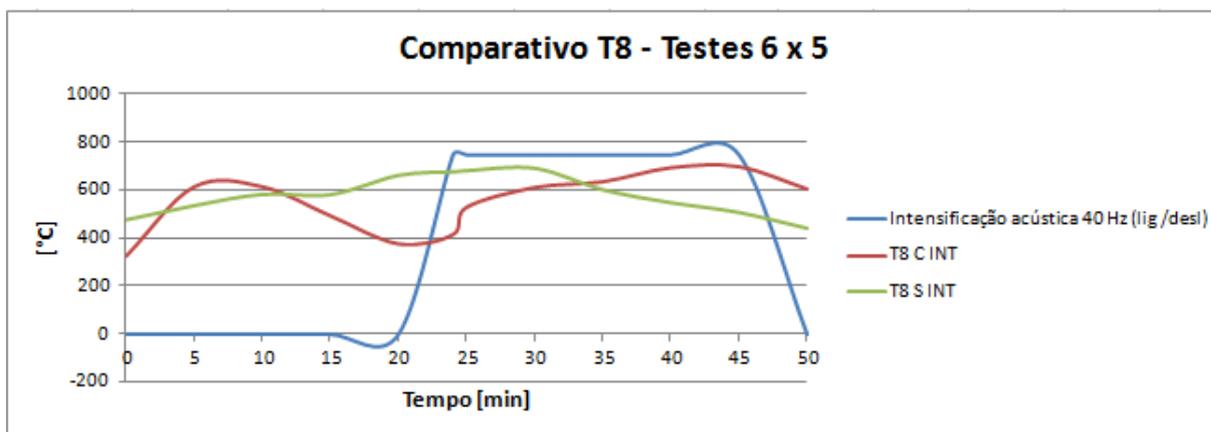


Figura 206: Comparativo T8 – Testes 6 x 5.

As temperaturas não são explicitamente maiores no teste 6 com relação ao teste 5, com exceção de T8 no teste 6 que no período de operação do SGOG apresenta uma inflexão da curva para subida e passa T8 do teste 5, deixando claro que respondeu à ativação do SA. No restante dos casos as temperaturas do teste 5 são mais altas que as do teste 6.

## 7.5.2 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NO LEITO ENTRE OS TESTES 5 E 6

Apresentam-se teores de  $O_2$  no teste 5 comparados com seus teores no teste 6. A Figura 207 mostra o comparativo do  $O_2$  entre os testes 5 e 6.

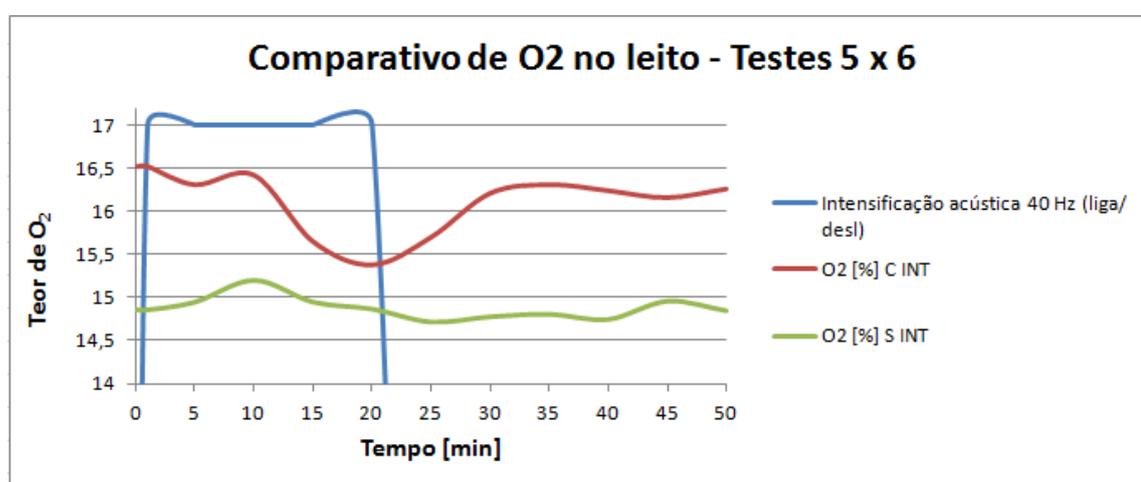


Figura 207: Comparativo  $O_2$  no leito – Teste 6 x 5.

Ao se avaliar o teor de  $O_2$  no leito do teste 6, fica clara a influência do acionamento do SA com a queda dos teores durante a operação do SA e inflexão para subida assim que se desliga o SA. Porém, apresenta teores mais elevados que os do teste 5, o que pode significar que a diferença na operação ao longo dos dois testes pode ter influenciado a comparação.

### 7.5.3 COMPARATIVO DA COMPOSIÇÃO DE GASES NA CHAMINÉ ENTRE OS TESTES 5 E 6

Apresentam-se teores de  $O_2$ , CO e  $CO_2$  na chaminé no teste 5 comparados com seus teores no teste 6. A Figura 208 mostra o comparativo dos teores do  $O_2$  na chaminé entre os testes 5 e 6, a Figura 209 mostra o do CO e a Figura 210 o do  $CO_2$ .

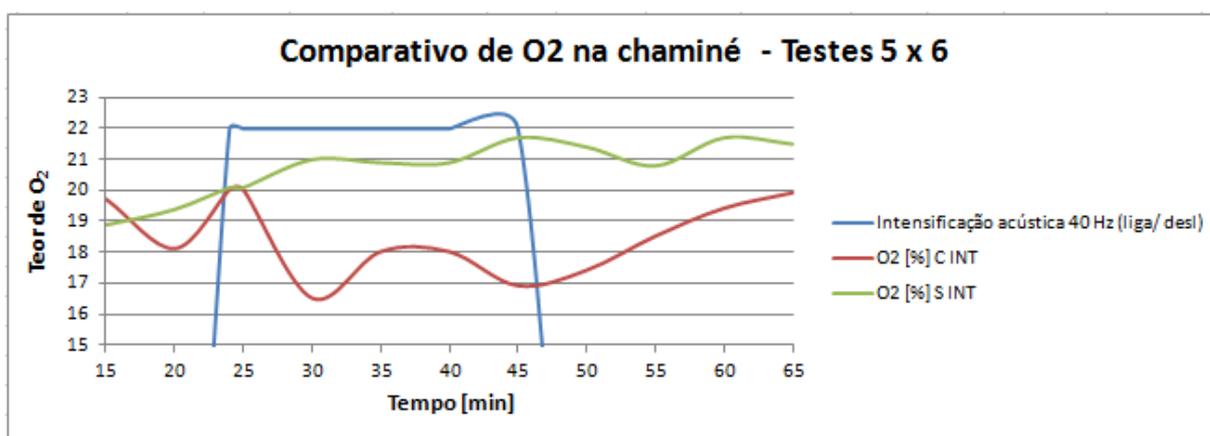


Figura 208: Comparativo  $O_2$  na chaminé – Teste 6 x 5.

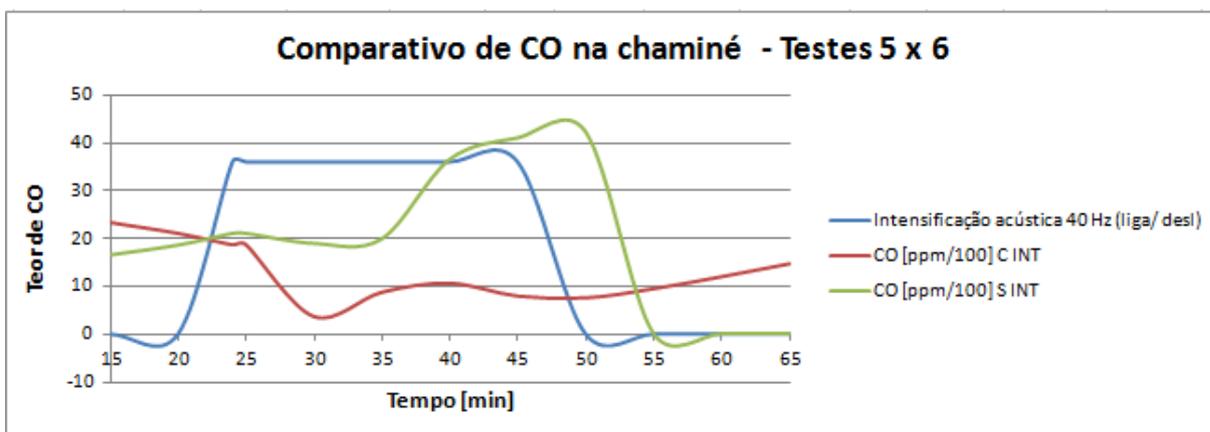


Figura 209: Comparativo CO na chaminé – Teste 6 x 5.

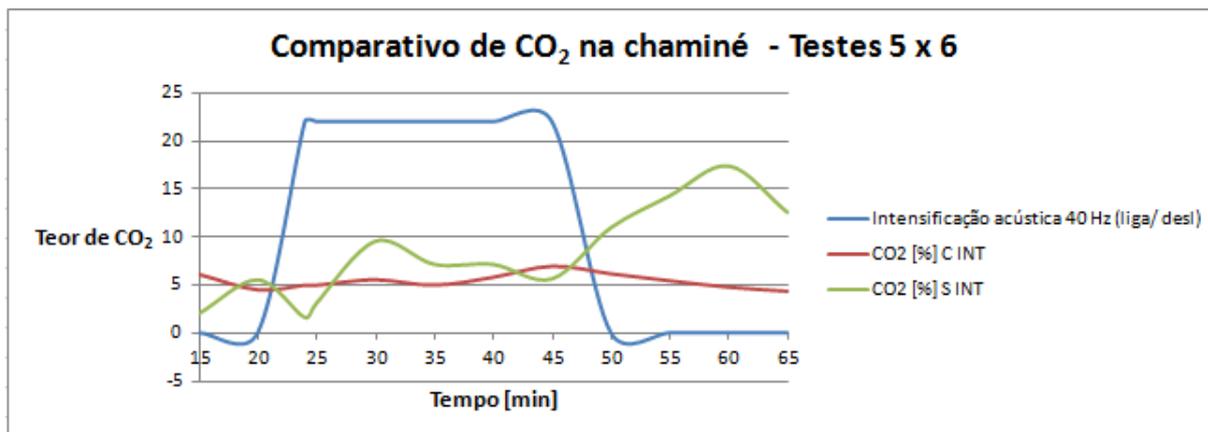


Figura 210: Comparativo CO<sub>2</sub> na chaminé – Teste 6 x 5.

Ao se avaliar os teores de O<sub>2</sub> e CO na chaminé do teste 6, fica clara a influência do acionamento do SA com a queda destes teores durante a operação do SA e inflexão para subida assim que se desliga o SA. O mesmo pode ser verificado com o teor de CO<sub>2</sub>, que aumenta durante a operação do SA. E neste caso, é também perceptível que os teores de O<sub>2</sub> e CO são menores no teste 6 que no teste 5, o que é uma indicação clara que o processo de combustão do teste 6 foi influenciado pela intensificação acústica no sentido de aumentar a mistura de ar e combustível, melhorando a reação de combustão, fazendo que esta seja mais completa, diminuindo os teores de O<sub>2</sub> e CO e aumentando o teor de CO<sub>2</sub>.

## Capítulo 8

### CONCLUSÕES

O valor de pico da temperatura T8 durante o teste 7 sob intensificação acústica com o SA de 400 [W] operando em 40 [Hz] foi aumentado em 13,72 [%] em comparação com o seu valor de pico sem intensificação acústica.

A taxa de aquecimento da temperatura T2 durante o teste 7 sob intensificação acústica com o SA de 400 [W] operando em 40 [Hz] foi aumentado em 776,59 [%], de 4.1 [°C/min] sem intensificação acústica para 35.94 [°C/min] com intensificação acústica.

O O<sub>2</sub> consumido durante o teste 7 sob intensificação acústica com o SA de 400 [W] operando em 40 [Hz] foi aumentado em 18,57 [%], de um valor médio de 4,74 [%] sem intensificação acústica para um valor de pico de 5,62 [%] com intensificação acústica.

A intensificação acústica exerce influência no processo de combustão de biomassa em câmara de combustão com leito fixo. Essa influência se dá não só na melhora e na aceleração da mistura do ar com a lenha de eucalipto, mas principalmente na mistura do ar com os gases combustíveis oriundos da devolatilização da biomassa. Isso fica claro quando se avalia a composição de gases no leito e na chaminé, onde a intensificação acústica exerce mais influência que no leito. Isso indica claramente que a mistura dos voláteis com o ar ao longo do escoamento é mais influenciada pela intensificação acústica do que a mistura lenha e ar no leito.

A influência da intensificação acústica no processo de combustão se deu de forma mais explícita no teste 6, que foi realizado com SA de 400 [W] e sem película de borracha separando o SA do escoamento de ar primário do que no teste 7 com SA de 200 [W] e com a instalação de película de borracha protegendo o SA.

A operação com alimentação manual de lenha dificulta a realização de duas operações idênticas, que seria necessário para que se realizassem duas sessões de testes passíveis de comparação.

A alimentação de lenha influencia os processos de transferência de calor da caldeira, uma vez que aumenta intermitentemente a vazão de biomassa e dos voláteis que geram as chamas, causando instabilidade no processo. Outro fator de instabilidade da alimentação de lenha pela porta da câmara de combustão é o acesso à câmara de ar frio sem controle cada vez que se abre a porta.

As maiores temperaturas atingidas ao longo dos testes foram da ordem de 800 [°C], muito abaixo do esperado. Em simulação realizada com outra configuração de grelha se previu a temperatura de 1.450 [° C] no leito da câmara de combustão. O não atingimento dessas temperaturas se deve a dois fatores. Primeiro, ao se alterar a posição da grelha, se diminuiu o volume original da câmara de combustão, diminuindo a vazão mássica nominal do equipamento. Outro fator foi o excesso de ar muito acima dos padrões de combustão de biomassa utilizado para estes testes.

In test 3, low bed temperature (T8) indicates smoldering combustion and an erratic response to acoustic forcing.

Test 1 was performed with feed of 6.6 kg on average in each feed, against 4.2 kg on average of test 3, which, together with the excess air of 139 [%], caused the smoldering combustion in test 3

No teste 7, a baixa temperatura T8 indica a ocorrência de combustão lenta , isso pois a média de massa de alimentação de biomassa foi de 4,2 kg, em contraste com 6,6 kg em média do teste 5, além disso ocorreram respostas erráticas à intensificação acústica, o que dificulta se tirar conclusões sobre sua influência no processo de combustão de biomassa em leito fixo neste teste.

## 8.1 SUJESTÕES PARA PRÓXIMOS TRABALHOS

Realizar testes com alimentação contínua e fechada através do alimentador de biomassa. Para tal, adaptar o alimentador de rosca sem fim para que possa fornecer para o interior da câmara de combustão e não na porção inicial da câmara cavaco ou serragem. Projetar uma configuração de grelha inclinada com vibrador que possibilite a não compactação e acumulação da biomassa, além de aumentar o volume da câmara. Projetar um separador de escoamento de ar com válvulas de vazão controlada, além de instalar um inversor no soprador para que se tenha controle total da vazão de ar nas tubulações de ar primário e secundário.

Realizar o teste de outros tipos de biomassa e sua análise na configuração da caldeira.

Analisar SAs com diferentes potências.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAF, (2013), <http://www.florestal.gov.br/snif/recursos-florestais/as-florestas-plantadas>, pesquisa realizada em 30/10/2014

ABREU, P. T. C. J., (2009), Investigação Experimental da Taxa de Formação de Depósitos na Co-Combustão de Carvão com Biomassa. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, INSTITUTO SUPERIOR TÉCNICO, UNIVERSIDADE TÉCNICA DE LISBOA, Lisboa, Portugal

ALFIE, M., AMMENDOLA, P., GARGIULO, V., RAGANATI, F., CHIRONE, R., (2014), Magnetite loaded carbon fine particles as low-cost CO<sub>2</sub> adsorbent in a sound assisted fluidized bed, Proceedings of the Combustion Institute 35 (2015) 2801–2809

BARROS, R. W., (2005), Avaliação experimental de sistemas de ciclo combinado com células a combustível e microturbinas a gás e de sistemas para geração térmica com motores Stirling / Etapa III - Avaliação experimental de um sistema de geração térmica e elétrica com motor Stirling operando com gás natural e acoplamento deste com o sistema de gaseificação de biomassa, projeto conjunto NEST/IEM/UNIFEI e CEMIG

BAZZO, E., 1995 "Geração de Vapor", Editora da UFSC, Florianópolis.

BIZZO, W. A. Geração, distribuição e utilização de vapor (Apostila de Curso). Campinas, SP, Brasil: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP 2003

BLEVINS, L. G., (1999), Behavior of bare and aspirated thermocouples in compartment fires, Proceedings of the 33rd National Heat Transfer Conference August 15-17, Albuquerque, New Mexico

CGEE - Geração de energia elétrica a partir de biomassa no Brasil: Situação atual, oportunidades e desenvolvimento. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. Disponível em: <[www.cgee.org.br/arquivos/estudo003\\_02.pdf](http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo003_02.pdf)>. Data de acesso: 29/10/2013

CHAUHAN, M. K.; VARUN; CHAUDHARY, S.; KUMAR, S.; SAMAR. Life cycle assessment of sugar industry: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 7, p. 3445-3453 2011

CHIRONE, R., MASSIMILLA, L., SCODELARO, C., 1992, Batch Combustion of Cohesive Carbon Fines in a Sound assisted fluidized bed combustor, Twenty fourth symposium (international) on Combustion / The Combustion Institute, pg 1323 – 1331.

COELHO, P., COSTA, M., (2007) , Combustão, Edições Orion, 1ª Ed., Lisboa, Portugal

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas: Editora Unicamp, 2008.

DAHL, J., OBERNBERGER, I., 2004, “Evaluation of the combustion characteristics of four perennial energy crops (arundo donax, cynara cardunculus, miscanthus x giganteus and panicum virgatum)”, 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rome, Italy.

FERREIRA, C. A. et al. (1979). Densidade Básica da madeira de plantações comerciais de eucaliptos, na região de Mogi-Guaçu (S.P.). IPEF. No.18, pp. 106-117.

GOVARDHAN, J., RAO, G.V.S., 2010, Evaluation of thermal characteristics of oscillating combustion. International Journal of Engineering, Science and Technology Vol. 2, No. 2, 2010, pp. 165-173.

INCROPERA, F., (2012). Fundamentos da transferência de calor e massa, 6ª Ed, LTC– Rio de Janeiro, Brasil.

LI, Z., ZHAO, W., LI, R., WANG, Z., LI, Y., ZHAO, G., 2009, Combustion characteristics and NO formation for biomass blends in a 35-ton-per-hour travelling grate utility boiler, Bioresource Technology 100 (2009) 2278–2283.

LIMA, G. B. G. (2004). Utilização de biomassa na secagem de produtos agrícolas via gaseificação com combustão adjacente dos gases produzidos. Disponível em: <[www.scielo.br/pdf/eagri/v24n2/v24n2a20.pdf](http://www.scielo.br/pdf/eagri/v24n2/v24n2a20.pdf)>. Data de acesso: 29/11/2011.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. D. Geração termelétrica planejamento, projeto e operação. Rio de Janeiro: Interciência, 2004.

LORA, E. E. S.; VENTURINI, O. J. Biocombustíveis. Volume 1. 1ª Edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2012.

MCKENDRY, P. (2001). Energy production from biomass (part 1): Overview of biomass. Bioresource technology. Vol. 83, pp. 37-46.

MANN, A. P., DIXON, T. F, PLAZA, F., JOYCE, J. A., 2005, Opportunities for Improving the Performance and Reducing the Costs of Bagasse-Fired Boilers, In Hogarth, DM, Eds, Proceedings International Society of Sugar Cane, Technologists Proceedings of the XXV Congress 25, pages pp. 241-247, Guatemala, Guatemala City.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA, (2015), Resenha Energética Brasileira, exercício 2014, site: [www.mme.gov.br](http://www.mme.gov.br), pesquisado em 31/10/2015.

MITOR, V.V., *at al* (1973), Cálculo Térmico de Caldeiras (Método Normativo), Volume 1, Leningrado, URSS.

MORAES, F. A. B. (2011). Centro Universitário de Araraquara. Utilização da biomassa de eucalipto para produção de energia na indústria de celulose e papel. Disponível em: <<http://pt.scribd.com/doc/56285135/Biomassa-de-Eucalipto-para-Producao-de-Energia-na-Industria-de-Celulose-e-Papel>> Data de acesso 06/11/2013

OLIVEIRA, C.V.B.S., 2014, Estudo experimental da gaseificação do eucalipto em gaseificador co-corrente de duplo estágio com ar, vapor saturado e oxigênio para produção de gás de síntese, Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Doutor em Ciências em Engenharia Mecânica, UNIFEI, Itajubá, MG, Brasil

OBERNBERGER, I., SCHARLER, R., 2000, Numerical modeling of biomass grate furnaces, 5° European Conference on Industrial Furnaces and Boilers, Porto –Portugal.

PATIÑO, D., 2009, Aanalysis experimental de combustión de biomasa en um quemador de lecho fijo, Tese de doutorado, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Departamento de Ingeniería Mecánica, Máquinas y Motores Térmicos y Fluidos, Vigo, Espanha.

PERA, H., 1990, Geradores de Vapor, Editora Fama, São Paulo, SP, Brasil.

RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA, 2015, Exercício 2014, Edição de maio de 2015, Núcleo de estudos estratégicos da energia, MME, Brasil

RESENHA ENERGÉTICA BRASILEIRA, 2016, Exercício 2015, Edição de maio de 2016, Núcleo de estudos estratégicos da energia, MME, Brasil

ROCHA, A. M. A., JR, J.A.C., LACAVA,P.T., 2008, Gas concentration And temperature in acoustically excited Delft turbulent jet flames. Fuel 87, 3433–3444.

RÖNNBÄCK, M., AXELL, M., GUSTAVSSON, L., THUNMAN, H., LECKNER, B., 2000, Combustion process in a biomass fuel bed- Experimental results. Progress in Thermochemical Biomass Conversion, 17 – 22 September, 2000, Tyrol – Austria

SAMUELSSON, J., RÖNNBÄCK, M., LECKNER, B., TULLIN, C., 2004, Conversion of Nitrogen in a Fixed Bed - Measurements Inside the Bed, Science in Thermal and Chemical Biomass Conversion, 30 Augusti-2 September 2004, Victoria, Vancouver Island, BC, Canada.

SANTANA, W. M. S., (2009), Crescimento, produção e propriedades da madeira de um clone de Eucalyptus Grandis e e. Urophylla com enfoque energético, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras

SEABRA, J. E. A.; MACEDO, I. C. Comparative analysis for power generation and ethanol production from sugarcane residual biomass in Brazil. Energy Policy, v. 39, n. 1, p. 421-428 2011

SERRANO, C., PORTERO, H., MONEDERO, E., 2013 Pine chips combustion in a 50 kW domestic biomass boiler. Fuel 111 pg 564–573

SENAI, "Treinamento de segurança na operação de caldeiras - Operação de caldeiras" São Paulo - SP, 2004

TORRES, E. A., VICTÓRIO, J.R.S., FERREIRA, M.A., CARVALHO JR, J.A., 1992, Pulsating combustion of palm oil fruit bark. FUEL, p. 257-261

ZIINN, B. T.; Pulse combustion: Recent applications and research issues. 24° Symposium International on Combustion / The Combustion Institute, pp. 1297-1305. Invited Topical Review. School of Aerospace Engineering, Georgia Institute of Technology. Atlanta, Georgia 30332 USA 1992