

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

JUDITH VON PAUMGARTTEN KLAUTAU

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UMA FORNALHA A LENHA DE FLUXO CO-
CORRENTE PARA SECAGEM DE GRÃOS**

**CURITIBA
2008**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

JUDITH VON PAUMGARTTEN KLAUTAU

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UMA FORNALHA A LENHA DE FLUXO CO-
CORRENTE PARA SECAGEM DE GRÃOS**

Dissertação apresentada no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Universidade Federal do Paraná, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental.

Orientador: Marcelo Risso Errera. Ph.D
Co-Orientador: Dr. Thomaz P.F. Borges

**CURITIBA
2008**

Klautau, Judith von Paumgartten

**Análise experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos / Judith von Paumgartten Klautau – Curitiba, 2008
193 f.,**

Orientador: Prof. Marcelo Risso Errera, PhD.

Co-orientador: Dr. Thomaz Penteado de Freitas Borges.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná.

JUDITH VON PAUMGARTTEN KLAUTAU

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DE UMA FORNALHA A LENHA DE FLUXO CO-
CORRENTE PARA SECAGEM DE GRÃOS**

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Marcelo Risso Errera, PhD.
Universidade Federal do Paraná -UFPR

Prof. Dr. Thomaz Penteado de Freitas Borges
Universidade Federal de Santa Catarina -UFSC

Prof. Dr. Electo Eduardo Silva Lora
Universidade Federal de Itajubá -UNIFEI

Prof. Dr. José A. A. Velásquez Alegre
Pontifícia Universidade Católica do Paraná PUC-PR

Prof. Dr. Cristóvão Scapulatempo Fernandes
Universidade Federal do Paraná- UFPR

*A minha família por me apoiar
incondicionalmente*

A Deus
A minha família pelo apoio e motivação,
Ao meu orientador, Prof. Marcelo Errera, pela orientação, confiança e conhecimentos
adquiridos ao longo deste trabalho,
Ao meu co-orientador, Prof. Thomaz Borges, pela ajuda na realização do trabalho,
Ao meu coordenador, Prof. Cristóvão, pela oportunidade de estar aqui,
A banca examinadora, pelas sugestões e comentários,
À Capes, pelo auxílio financeiro,
Aos meus amigos que conquistei em Curitiba pelo companheirismo nessa jornada,
Aos meus amigos de Belém, que mesmo de longe sempre me deram força,
Aos estagiários do AGROGÁS, Keila, César, Rodrigo, Leonardo, Iara e Crys, pela ajuda
em várias etapas do trabalho,
A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desse trabalho.

“Em ciência, o crédito vai para o homem que convence o mundo de uma idéia, não para aquele que a teve primeiro”

William Osler

RESUMO

A secagem de grãos, dentro da atividade de pós-colheita agrícola, é o setor que mais demanda energia. No Brasil, o processo de secagem de grãos mais utilizado é a fornalha a lenha de fluxo contra-corrente, para produzir ar quente à aproximadamente 100°C. Se por um lado a lenha é uma fonte de energia renovável, por outro lado, o ar quente gerado em fornalhas deste tipo contém elevadas quantidades de alcatrão, monóxido de carbono, e material particulado que comprometem a qualidade do grão e trazem riscos de incêndio dentro dos secadores. Além disso, essas fornalhas são difíceis de controlar e portanto fornecer a temperatura adequada para a secagem. Este trabalho apresenta um estudo exploratório de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente, que fornece a energia térmica necessária para os secadores e ao mesmo tempo uma qualidade do ar satisfatória. Foi construída uma fornalha de 40kW de potência nominal para investigar a influencia de três diferentes áreas de grelha e três diferentes regimes de alimentação de lenha. A fornalha foi operada em dois regimes de tiragem: natural e induzida. Foram dezoito experimentos com configurações diferentes. Foram medidos a concentração de monóxido de carbono e a temperatura dos gases de combustão, além de aspectos operacionais. Os resultados mostraram que fornalhas a lenha de fluxo co-corrente apresentam baixos teores de monóxido de carbono, de alcatrão e fuligem, o que representa uma boa qualidade do ar de secagem de grãos. A eficiência energética média da fornalha foi de 75%.

Palavras chave: Queima limpa, biomassa, emissão de poluentes.

ABSTRACT

It has been shown that the grain drying process accounts for most of the energy expenditure along the post-harvest phase. Most of the Brazilian drying mills use counter-current flow woodburning furnaces to produce warm air near 100 °C. On the up side, wood is a renewable source of energy. On the down side warm air generated in such furnaces contains high amounts of tar, carbon monoxide, soot and particulate matter that further compromises the grain quality. It also presents high risks of fire ignition inside the dryers. Furthermore those furnaces are difficult to control and thus to deliver the proper air temperature. This work presents an exploratory study of a concurrent furnace to meet thermal energy needs of dryers while meeting air drying quality standards. We built a 40kW furnace to investigate the influence of three different grate sizes, three different wood feeding regimes. We also operated the furnace under natural and induced draft. That lead to eighteen different experiment set-ups. We observed carbon monoxide concentration and temperature of the flue gas, and also operational aspects in each run. Results showed that concurrent wood burning furnaces can be very successful in providing low levels of carbon monoxide, of tars and of soot as well. It also showed near constant temperature levels of drying air. Energy wise, the average performance of the furnace was around 75%.

Key words: clean burning, biomass, pollutants emission.

LISTA DE SÍMBOLOS

A_g :	Área da grelha (m^2)
A_t :	Área transversal da chaminé (m^2)
A_s :	Área da superfície da fornalha (m^2)
$\bar{c}_{p\text{ carvão}}$:	Calor específico médio do carvão (kJ/kg.K)
$\bar{c}_{p\text{ cinzas}}$:	Calor específico médio das cinzas (kJ/kg.K)
C :	Quantidade de carbono na composição do combustível (%)
E	Coefficiente de excesso de ar
\bar{h}_{ar}	Entalpia do ar à temperatura ambiente (kJ/kg)
F	Fator de forma
h_{iv}	Calor latente e vaporização da água (kJ/Kg)
h_e	Coefficiente de convecção externo ($W/m^2.K$)
h_i	Coefficiente de convecção interno ($W/m^2.K$)
H :	Quantidade de hidrogênio na composição do combustível (%)
H_P	Entalpia dos produtos das reações de combustão (kJ/kg)
H_R	Entalpia dos reagentes das reações de combustão (kJ/kg)
H_u	Altura útil da chaminé (m)
k	Condutividade térmica ($W/m.K$)
L	Espessura da parede (m)
\dot{m}_{ar}	Vazão mássica de ar primário (kg/s)
$\bar{m}_{carvão}$	Vazão mássica de carvão (kg/s)
\bar{m}_{cinzas}	Vazão mássica média de cinzas (kg/s)
\bar{m}_{gas_comb}	Vazão mássica média dos produtos da combustão (kg/s)
\bar{m}_{lenha}	Vazão mássica média de combustível (kg/s)

m_{Cco}	Massa de carbono que reage produzindo CO (kg)
m_{Cco_2}	Massa de carbono que reage produzindo CO ₂ (kg)
m_{Cful}	Massa de carbono que reage produzindo fuligem (kg)
M_s	Massa da amostra nas condições de queima seca
M_u	Massa da amostra nas condições de queima úmida
N_c	Taxa de combustão (kg/h.m ²)
O	Quantidade de oxigênio na composição do combustível (%)
PCI:	Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)
PCS:	Poder calorífico superior do combustível (kJ/kg)
$\dot{Q}_{ar_primário}$	Energia fornecida pelo ar primário (kW)
$\dot{Q}_{carvão}$	Energia contida no carvão (kW)
\dot{Q}_{cinzas}	Energia contida nas cinzas (kW)
$Q_{entrada}$	Total de energia que entra na fornalha (kW)
$\dot{Q}_{gás_comb}$	Energia dos gases produtos da combustão(kW)
\dot{Q}_{lenha}	Energia fornecida pela lenha (kW)
$\dot{Q}_{paredes}$	Energia perdida pelas paredes (kW)
Q_{conv_cond}	Calor perdido por convecção e condução em série
Q_{rad_ext}	Calor perdido por radiação externa
Q_{rad_int}	Calor perdido por radiação interna
$Q_{saída}$	Total de energia que sai da fornalha (kW)
R_{total}	Resistência térmica total (m ² .K / W)
R_{cont}	Resistência térmica de contato (m ² .K / W)
T_{amb}	Temperatura ambiente (K)

T_g	Temperatura média dos gases de combustão (K)
T^t	Temperatura teórica da combustão (K)
U	Coefficiente global da transferência de calor ($W/m^2.K$)
V_{ar}^0	Volume de ar teórico na câmara de combustão (m^3/kg)
V_{ar}	Volume de ar real na câmara de combustão (m^3/kg)
W_s	Umidade base seca da lenha (%)
W_u	Umidade base úmida da lenha (%)

Letras Gregas

α	Razão entre a massa de carbono que reage produzindo CO e a massa de carbono que reage produzindo CO ₂
β	Razão entre a massa do carbono que se transforma em fuligem e a quantidade total de carbono no combustível
$\overline{\Delta h}_{gás_comb}$	Varição de entalpia média dos gases de combustão (kJ/kg)
Δ_x	Incerteza
η	Eficiência da fornalha (%)
ρ_{O_2}	Densidade do O ₂ nas CNTP (kg/m^3)
σ	Desvio padrão

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 01– ESQUEMA COMPLETO DA COMBUSTAO	43
FIGURA 02 – RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE CO E C _x H _y	46
FIGURA 03 – TOXICIDADE DO CO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO.....	47
FIGURA 04 – RELAÇÃO CO/NO _x	48
FIGURA 05 – FORNALHA CONTRA-CORRENTE	51
FIGURA 06 – PROTÓTIPO CONSTRUÍDO POR VERHAART.....	53
FIGURA 07 – PRODUTOS DA COMBUSTÃO DE UM FOGÃO DOWNDRAFT	54
FIGURA 08 -PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO QUEIMADOR DO FOGÃO DOWNDRAFT .	54
FIGURA 09 – FOGÃO Á LENHA DE FLUXO DOWNDRAFT.....	55
FIGURA 10 – CURVA DE CO.....	55
FIGURA 11 – CURVA DE O ₂	55
FIGURA 12 – GASEIFICADOR DE BIOMASSA EXPERIMENTAL	56
FIGURA 13 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DURANTE UMA CORRIDA EXPERIMENTAL EM UM GASEIFICADOR DOWNDRAFT.....	57
FIGURA 14 – TIRAGEM NATURAL.....	62
FIGURA 15 – TIRAGEM FORÇADA.....	63
FIGURA 16 - TIRAGEM BALANCEADA	63
FIGURA 17 – VISÃO SUPERIOR DA FORNALHA (dimensões em mm).....	69
FIGURA 18 –VISÃO LATERAL DA FORNALHA (dimensões em mm).....	69
FIGURA19 – VISÃO EM PERSPECTIVA DA FORNALHA	70
FIGURA 20 – CORTE LONGITUDINAL DA FORNALHA	70
FIGURA 21 – FOTO DA FORNALHA CONSTRUÍDA	72
FIGURA 22 – GRANULOMETRIA DA LENHA UTILIZADA	73
FIGURA 23 – VARIAÇÃO DE ÁREA DE GRELHA UTILIZADA NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS	75

FIGURA 24 – CHAMINÉ DE TIRAGEM NATURAL.....	76
FIGURA 25 – CHAMINÉ DE TIRAGEM INDUZIDA	76
FIGURA 26 – CURVA DE GAUSS.....	80
FIGURA 27 – APARATO PARA A BALANÇA	82
FIGURA 28 – LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES NA FORNALHA.....	83
FIGURA 29 – TERMOPARES UTILIZADOS NA INSTRUMENTAÇÃO	83
FIGURA 30 – INTERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	83
FIGURA 31 – SISTEMA DE CONTROLE COMPACT FIELD POINT DA N.I (CFP)	84
FIGURA 32 – VISÃO DO ARQUIVO.VI DO SOFTWARE LABVIEW UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA	85
FIGURA 33 – ANALISADOR DE GASES DE COMBUSTÃO TEC-GA12	86
FIGURA 34 – POSIÇÃO DA Sonda DO ANALISADOR DE GASES.....	86
FIGURA 35 – POSIÇÃO DA Sonda DO ANALISADOR DE GASES NA CHAMINÉ DE TIRAGEM NATURAL.....	87
FIGURA 36 - POSIÇÃO DA Sonda DO ANALISADOR DE GASES NA CHAMINÉ DE TIRAGEM INDUZIDA	87
FIGURA 37 – FLUXO DOWNDRAFT	93
FIGURA 38 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 01	95
FIGURA 39 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 01	95
FIGURA 40 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 02	96
FIGURA 41 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 02	96
FIGURA 42 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 03	97

FIGURA 43 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 03.....	97
FIGURA 44 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 04.....	98
FIGURA 45 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 04.....	98
FIGURA 46 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 05.....	99
FIGURA 47 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 05.....	99
FIGURA 48 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 06.....	100
FIGURA 49 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 06.....	100
FIGURA 50 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 07.....	101
FIGURA 51 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 07.....	101
FIGURA 52 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 08.....	102
FIGURA 53 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 08.....	102
FIGURA 54 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 09.....	103
FIGURA 55 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 09.....	103
FIGURA 56 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 10.....	105
FIGURA 57 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO	

DURANTE A CORRIDA 10.....	105
FIGURA 58 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 11.....	106
FIGURA 59 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 11.....	106
FIGURA 60 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 12.....	107
FIGURA 61 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 12.....	107
FIGURA 62 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 13.....	108
FIGURA 63 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 13.....	108
FIGURA 64 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 14.....	109
FIGURA 65 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 14.....	109
FIGURA 66 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 15.....	110
FIGURA 67 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 15.....	110
FIGURA 68 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 16.....	111
FIGURA 69 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 16.....	111
FIGURA 70 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 17.....	112
FIGURA 71 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE	

CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 17	112
FIGURA 72 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 18	113
FIGURA 73 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MONÓXIDO DE CARBONO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 18	113
FIGURA 74– VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DA PELE DA CÂMARA DE COMBUSTÃO COM O TEMPO NA CORRIDA DE MAIOR DURAÇÃO	121
FIGURA 75 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ DURANTE CORRIDA DE MAIOR DURAÇÃO	122
FIGURA 76 – RELAÇÃO DA EFICIÊNCIA COM O EXCESSO DE AR.....	123
FIGURA 77 - EFICIÊNCIA X ÁREA DE GRELHA X ALIMENTAÇÃO PARA TIRAGEM NATURAL.....	124
FIGURA 78 - EFICIÊNCIA X ÁREA DE GRELHA X ALIMENTAÇÃO (TIRAGEM INDUZIDA). 126	
FIGURA 79 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NA CORRIDA EXPLORATÓRIA DE TIRAGEM INDUZIDA	127
FIGURA 80 – VARIAÇÃO DO CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA EXPLORATÓRIA DE TIRAGEM INDUZIDA	128
FIGURA 81 – RELAÇÃO EXCESSO DE AR E VARIAÇÃO DE O ₂ , CO ₂ E CO NA TIRAGEM NATURAL.....	131
FIGURA 82 – RELAÇÃO EXCESSO DE AR E VARIAÇÃO DE O ₂ , CO ₂ E CO NA TIRAGEM INDUZIDA	131
FIGURA 83 – RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NO _x E O ₂ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 3 (TIRAGEM NATURAL).....	132
FIGURA 84 – RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NO _x E O ₂ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 11 (TIRAGEM INDUZIDA)	133
FIGURA 85 - RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE CO E C _x H _y	133
FIGURA 86 – DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA	143
FIGURA 87 – FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DAS PAREDES DA FORNALHA	161

FIGURA 88 – FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DAS CHAMINÉ.....	161
FIGURA 89 – PAREDE LATERAL DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	165
FIGURA 90 – TAMPA SUPERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	167
FIGURA 91 - BASE DA CÂMARA DE COMBUSTÃO.....	168
FIGURA 92 – PAREDE LATERAL DA ZONA DE PIRÓLISE.....	170
FIGURA 93- BASE DA ZONA DE PIRÓLISE.....	171
FIGURA 94 – FLUXO DE CALOR EM SISTEMAS CILÍNDRICOS.....	172
FIGURA 94 – CORTE TRANSVERSAL DA CHAMINÉ.....	173

LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – ANÁLISE SOMATIVA DA BIOMASSA (%)	31
TABELA 02 – GRANULOMETRIA DA BIOMASSA.....	34
TABELA 03 – PRINCIPAIS PROCESSOS DE PIRÓLISE.....	36
TABELA 04 – COMPOSIÇÃO DA LENHA	72
TABELA 05– DADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	75
TABELA 06– VARIÁVEIS DE MONITORAMENTO	77
TABELA 07 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO.....	78
TABELA 08 – ESPECIFICAÇÃO E JUSTIFICATIVA DOS TERMOPARES	84
TABELA 09 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO COMPLETA	115
TABELA 10 – UMIDADE DO COMBUSTÍVEL.....	117
TABELA 11 – TEMPERATURA MÉDIA TEMPORAL DA BASE DA CHAMINÉ NO PERÍODO EM REGIME	118
TABELA 12 – TEMPERATURA MÉDIA EM °C NO PERÍODO EM REGIME DE CADA TERMOPAR	120
TABELA 13 - MASSA DAS AMOSTRAS DE LENHA	144

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	22
1.1 MOTIVAÇÃO	23
1.2 OBJETIVOS	23
1.3 APRESENTAÇÃO.....	24
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1 BIOMASSA.....	25
2.1.1 CLASSIFICAÇÃO DOS RECURSOS ENERGÉTICOS DA BIOMASSA	26
2.1.2 COMPOSIÇÃO DA BIOMASSA	27
2.1.3 PODER CALORÍFICO.....	31
2.1.4 PROPRIEDADES TÉRMICAS DA MADEIRA	32
2.1.5 PREPARAÇÃO DA BIOMASSA COMBUSTÍVEL.....	33
2.2 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA	35
2.2.1 PIRÓLISE	35
2.2.2 GASEIFICAÇÃO.....	37
2.2.3 COMBUSTÃO	37
2.3 FORNALHAS.....	48
2.3.1 DEFINIÇÃO E CRITÉRIOS DE SELEÇÃO.....	48
2.3.2) FORNALHAS DE FLUXO CONTRA-CORRENTE E CO-CORRENTE	50
2.3.3 EXPERIÊNCIAS REALIZADAS COM A QUEIMA DE BIOMASSA NOS FLUXOS CONTRA-CORRENTE E CO-CORRENTE.....	52
2.3.4 EFICIÊNCIA DE UMA FORNALHA	58
2.3.5 MATERIAL DAS FORNALHAS.....	58
2.3.6 TIRAGEM.....	60
2.4 SECAGEM DE GRÃOS.....	66
2.4.1 QUALIDADE DO AR DE SECAGEM.....	66
3 MATERIAIS E MÉTODOS	68
3.1 CONSTRUÇÃO DA FORNALHA.....	68
3.1.1 DIMENSIONAMENTO	68
3.1.2 MATERIAL DE CONSTRUÇÃO	71
3.2 COMBUSTÍVEL.....	72
3.2.1 UMIDADE	73
3.2.2 GRANULOMETRIA DA LENHA.....	73
3.2.3 CINZAS.....	73
3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	74
3.3.1 VARIÁVEIS DE CONTROLE	75
3.3.2 VARIÁVEIS DE MONITORAMENTO	76
3.3.3 RESPOSTA DE INTERESSE	77
3.3.4 MATRIZ DE PLANEJAMENTO.....	77
3.3.5 ERROS E INCERTEZAS	78
3.4 INSTRUMENTAÇÃO.....	81
3.4.1 PESAGEM DA LENHA	81
3.4.2 MEDIÇÃO DA TEMPERATURA	81
3.4.3 ANÁLISE DOS GASES	85
3.5 EFICIÊNCIA.....	89
3.6 BALANÇO ENERGIA	89
3.7 CONDIÇÕES DE CORRIDA VÁLIDA	91
3.8 CORRIDAS PRELIMINARES.....	91

4 RESULTADOS	93
4.1 FLUXO CO-CORRENTE.....	93
4.2 TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE CO.....	93
4.2.1 CORRIDA 01	95
4.2.2 CORRIDA 02	96
4.2.3 CORRIDA 03	97
4.2.4 CORRIDA 04	98
4.2.5 CORRIDA 05	99
4.2.6 CORRIDA 06	100
4.2.7 CORRIDA 07	101
4.2.8 CORRIDA 08	102
4.2.9 CORRIDA 09	103
4.2.10 CORRIDA 10	105
4.2.11 CORRIDA 11	106
4.2.12 CORRIDA 12	107
4.2.13 CORRIDA 13	108
4.2.14 CORRIDA 14	109
4.2.15 CORRIDA 15	110
4.2.16 CORRIDA 16	111
4.2.17 CORRIDA 17	112
4.2.18 CORRIDA 18	113
4.3 EFICIÊNCIA.....	114
4.3.1 UMIDADE	114
4.3.2 TEMPERATURA	116
4.3.3 EXCESSO DE AR	121
4.4 ÁREA DE GRELHA X CARGA DE LENHA	123
4.5 CONCENTRAÇÃO DOS GASES	128
4.5.1 CO	129
4.5.2 O ₂ E CO ₂	129
4.5.3 NO _x	131
4.5.4 C _x H _y	133
4.5 BALANÇO DE ENERGIA.....	134
5 CONCLUSÃO.....	136
REFERÊNCIAS.....	138
APÊNDICES	143
ANEXOS.....	191

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, várias formas de energia têm provido as necessidades da sociedade, aumentando o consumo à medida que o homem utiliza novas técnicas. Com a perspectiva de esgotamento no século XXI de importantes fontes de energia de origem fóssil como o petróleo, a humanidade defronta-se com a necessidade de alterar sua matriz energética na busca de um modelo de crescimento sustentado. Soma-se a isto a complexa questão ambiental com a degradação de recursos e ambientes.

Na produtividade agrícola, a pós-colheita de grãos é um dos vários setores que demandam energia e necessitam se enquadrar na situação energética mundial. E dentro pós-colheita agrícola, a secagem é o de maior consumo energético. A disponibilidade de energia para a secagem constitui uma preocupação para todos da área, quer devido à escassez dos recursos naturais, e conseqüentemente, a alta de preço dos mesmos, quer devido ao aumento freqüente da utilização dos combustíveis derivados do petróleo.

Dentro desse quadro, destaca-se a energia da biomassa, uma fonte de energia renovável, podendo ser obtida através do reflorestamento ou florestas nativas. É energia química, possui alta densidade energética e tem facilidade de armazenamento. A principal fonte de energia da biomassa é a lenha, que no Brasil ocupa a terceira posição em fonte de energia utilizada. Dois bilhões de pessoas dependem da lenha como fonte de energia, e o consumo mundial é de 1,1 bilhões de metros cúbicos.

O processo mais utilizado no Brasil para fornecimento de ar quente pra secagem de grãos é a combustão da lenha em fornalhas de fluxo contra-corrente. Porém, a combustão nessas fornalhas geralmente é incompleta, não libera toda a energia química disponível e há emissão de monóxido de carbono, particulados e Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), comprometendo assim a qualidade dos grãos.

A boa eficiência exige a queima completa do combustível, associada à máxima transferência de calor. É necessário dosar corretamente o ar de combustão, promover boa mistura desse ar com os gases combustíveis, criar condições para a circulação

turbulenta dos gases e reduzir a perda de calor para o ambiente.

Esta dissertação apresenta um estudo exploratório de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente, aonde o fluxo de ar vai de cima para baixo, proporcionando uma pirólise mais dosada, e fornecendo condições suficientes para que as reações de combustão se completem. O presente trabalho também busca fornecer uma base de conhecimento para o dimensionamento de fornalhas deste tipo em escala industrial.

1.1 MOTIVAÇÃO

As fornalhas a lenha tradicionais acarretam prejuízos para secagem de grãos, gerando poluentes que contaminam os mesmos. Nelas, o fluxo de ar é oposto ao de alimentação do combustível, e por isso chamado de fluxo contra-corrente. Em fornalhas com este tipo de fluxo não há tempo e espaço suficientes para a reação completa do ar com os gases, levando a uma pirólise descontrolada, que compromete o desempenho do secador, gerando fagulhas que podem causar um incêndio, e conseqüentemente uma combustão incompleta, com emissão do monóxido de carbono, particulados, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), entre outros poluentes. Vale destacar que os HPAs são os principais contaminantes dos grãos.

Buscando uma solução para estes problemas, esta dissertação trata do estudo experimental de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente, isto é, combustível e gases no mesmo sentido. Também chamada de fornalha de fluxo *downdraft*, neste tipo de fornalha os voláteis liberados pela pirólise encontram uma região adiabática, que fornece condições de tempo e temperatura suficientes para que as reações de combustão se completem, diminuindo ou eliminando a emissão de poluentes.

1.2 OBJETIVOS

a) Objetivo Geral

- Verificar a viabilidade de operação de fornalhas de fluxo co-corrente para

fornecimento direto de ar quente para secagem de grãos, criando assim uma base para projetos futuros em escala industrial.

b) Objetivos Específicos

- Construir uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para secagem de grãos;
- Utilizar diferentes regimes de operação na fornalha
- Estudar diferentes regimes de tiragem (natural e induzida);
- Analisar a concentração dos gases de combustão emitidos;
- Calcular a eficiência térmica da fornalha
- Propor uma correlação para dimensionamento de fornalhas em escala industrial;

1.3 APRESENTAÇÃO

O texto foi organizado em capítulos, o primeiro capítulo é esta introdução.

No segundo capítulo apresentou-se uma revisão da literatura sobre o assunto, enfatizando assuntos como: biomassa e seus principais processos de conversão energética, as fornalhas utilizadas para a conversão energética da biomassa e os aspectos principais da qualidade do ar de secagem dos grãos.

No terceiro capítulo foi feita a definição dos materiais e métodos para a realização do trabalho, incluindo dimensionamento do protótipo construído, caracterização do combustível utilizado, um planejamento experimental detalhando as variações da exploração paramétrica realizada, a instrumentação do protótipo, e métodos de cálculo da eficiência e do balanço energético da fornalha.

No quarto capítulo foram apresentados os resultados obtidos nas corridas experimentais, as eficiências de cada corrida assim como a concentração dos gases. Foi analisado separadamente cada fator que influenciou na eficiência da fornalha.

O quinto capítulo apresenta as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão bibliográfica deste trabalho contém informações da literatura, para um melhor entendimento do experimento realizado nesta dissertação. As informações foram divididas em quatro seções.

Na primeira seção, o tema abordado será a biomassa, com sua definição, classificação energética e composição. Também serão reportadas algumas características da biomassa como poder calorífico e propriedades térmicas, assim como a preparação da biomassa bruta para utilização como combustível.

A segunda seção terá informações sobre os principais processos de conversão energética da biomassa, com maior ênfase à combustão, processo utilizado no experimento. Sobre combustão, serão apresentadas as etapas, as características de uma combustão completa e incompleta, e definições importantes como ar teórico, temperatura teórica e entalpia de combustão.

O enfoque da terceira seção é sobre fornalhas, sua classificação e funcionamento. Neste capítulo será esclarecido a diferença entre o fluxo contra-corrente (tradicional) e o fluxo co-corrente, utilizado na fornalha em questão. Também serão relatadas algumas experiências realizadas com os dois tipos de fluxo. Ainda neste capítulo será apresentado um item sobre tiragem, com definição e classificação.

A última seção da revisão bibliográfica terá uma breve apresentação sobre os aspectos fundamentais da secagem de grãos, assim como os requisitos para a qualidade do ar de secagem.

2.1 BIOMASSA

O termo biomassa engloba a matéria vegetal gerada através da fotossíntese e os seus derivados, tais como: resíduos florestais e agrícolas, resíduos animais e a matéria orgânica contida nos resíduos industriais, domésticos e comerciais. Estes materiais contêm energia química provinda da transformação energética da radiação solar (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Estima-se que mundialmente sejam produzidas, pelo processo de fotossíntese,

cerca de 220×10^9 toneladas de biomassa (base seca) por ano, o que equivale a uma energia de 2×10^{15} MJ. O total de energia existente na cobertura vegetal da Terra, incluindo os bosques tropicais e temperados, as savanas e campos, é estimado como sendo cerca de 100 vezes o consumo atual de energia ao longo de um ano na Terra (FRISK *et al.*, 2000).

A biomassa responde por 29,4% da energia primária produzida no país, esse número é composto pelo etanol combustível e pela geração de energia a partir de bagaço de cana-de-açúcar, lenha e biogás (GUARDABASSI, 2006).

Na Europa, A *European Biomass Associations* (AEBIOM) aposta na biomassa como energia do futuro, pois através de estudos realizados, foi comprovado que o uso da biomassa para produzir calor é o mais eficiente.

Em 2005, a AEBIOM adotou um plano que tem como objetivo promover o uso da biomassa para produzir energia, é chamado de *EU Biomass Action Plan* e tem como metas: 75 ¹Mtoe de biomassa para produzir calor; 55 Mtoe para eletricidade; e 19 Mtoe para biocombustíveis. Essas metas precisam ser alcançadas até 2010 (RAGOSSNIG, 2007).

2.1.1 Classificação dos Recursos Energéticos da Biomassa

Os recursos energéticos da biomassa podem ser classificados de diversas maneiras. A classificação aqui adotada será a de biocombustíveis, relacionada aos fluxos de energia da biomassa, e podem ser apresentados em três grupos principais, de acordo com a origem da matéria que a constitui.

Assim, existem os biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis), os combustíveis de plantação não florestal (agrocombustíveis) e os resíduos urbanos. (NOGUEIRA e LORA, 2003):

- Biocombustíveis da madeira (dendrocombustíveis): inclui basicamente a lenha, que pode ser produzida e obtida de maneira renovável a partir de florestas plantadas ou nativas, levando sempre em consideração os limites que possibilitem a regeneração natural de tais florestas, ou também obtidas por desmatamento de formações nativas, neste caso, com intuito de obter terras para atividades agropecuárias. Outro meio de

¹ Mtoe = quantidade de energia correspondente a um milhão de toneladas de petróleo

obtenção destes combustíveis é através de atividades que processam ou utilizam a madeira com finalidade não exclusivamente energética, como por exemplo, em serrarias e indústrias de celulose.

-Biocombustíveis não florestais (agrocombustíveis): produzidos a partir de cultivos anuais, apresentam maior umidade que os biocombustíveis florestais. Geralmente seu uso exige primeiro uma conversão em outro produto energético mais adequado. Nesta classe tem-se, por exemplo, a cana-de-açúcar, cujo valor energético está associado ao conteúdo de celulose, amido, açúcares e lipídios que, por sua vez, determinam o tipo de produto energético que se pode obter.

-Resíduos urbanos: embora inclua materiais de outras origens, a maior parte do lixo e praticamente toda a parte orgânica das águas de esgotos é representada por biomassa. A utilização para fins energéticos destes resíduos significa um relevante benefício ambiental e uma grande eliminação de materiais contaminantes.

2.1.2 Composição da Biomassa

A composição da biomassa é complexa, envolvendo seis elementos principais na fase orgânica e no mínimo 10 outros elementos na fase inorgânica, importante para caracterização das cinzas, não incluindo ainda os metais pesados (JENKINS *et al.*, 1998).

A classificação aqui apresentada será a adotada por Nogueira (2007), que se divide em análise química elementar, análise química imediata e análise somativa.

a) Análise Química elementar

A análise química elementar corresponde ao conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa, geralmente referente à matéria seca. Nesta análise, são apresentados valores para o carbono (C), hidrogênio (H), enxofre (S), oxigênio (O), nitrogênio (N) e cinzas, que aqui será representado pela letra Z. Cabe ressaltar que as cinzas agregam todos os elementos não combustíveis (NOGUEIRA e LORA, 2003).

A análise química elementar constitui a base dos cálculos de combustão, e para

a sua determinação existem os procedimentos de referência, apresentados nas normas americanas ASTM E 870-82 *Standard test methods for analysis of wood fuel*, ASTM E 778-87 *Standard test method for nitrogen in the analysis sample of refuse derived fuel*, e ASTM E 777-87 *Standard test method for carbon and hydrogen in the analysis sample of refuse derived fuel*.

b) Análise Química imediata

A análise química imediata se refere ao conteúdo percentual, baseado na massa do combustível, dos materiais voláteis, do carbono fixo, das cinzas e da umidade.

O conteúdo de voláteis é uma medida da reatividade do combustível, quanto maior o teor de voláteis, maior a reatividade e mais rápida é a ignição (LEWANDOWSKI, 1997). Expressa a facilidade de se queimar um material e se determina como a fração em massa do combustível que volatiliza durante o aquecimento de uma amostra, em atmosfera inerte, até aproximadamente 850° C, por 7 minutos.

A fração de carbono que permanece na amostra logo após este aquecimento é chamada de carbono fixo ou coque. Para esta avaliação se podem aplicar as normas ASTM D 1102-84 *Standard test method for ash in wood*, e ASTM E 872-82 *Standard test method for volatile matter in the analysis of particulate wood fuels* (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Durante a combustão da biomassa, são convertidos em voláteis aproximadamente 70 – 80 % da matéria seca (LEWANDOWSKI, 1997).

Um outro componente da análise química imediata da biomassa é a umidade (W), entendida como a medida da quantidade de água livre na biomassa e que pode ser avaliada pela diferença entre os pesos de uma amostra, antes e logo após ser submetida à secagem. É possível apresentar os valores de umidade em base seca ou úmida, conforme seja a condição de referência adotada, como apresentado nas equações (1) e (2).

- umidade base seca:

$$W_s = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad \text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{material seco}} \quad (1)$$

-umidade base úmida:

$$W_u = \frac{M_u - M_s}{M_u} \quad \text{kg}_{\text{água}} / \text{kg}_{\text{material nas condições de trabalho}} \quad (2)$$

onde M_u e M_s correspondem respectivamente aos valores da massa de uma mesma amostra de combustível nas condições de queima (úmida) e seca. O método ASTM E871-82, *Standard method for moistures analysis of particulate wood fuel*, detalha as condições de ensaio (NOGUEIRA e LORA, 2003).

A umidade do combustível é um fator limitante na combustão da biomassa, devido à sua influência no poder calorífico. O limite térmico (auto-sustentação da combustão) para a maioria dos combustíveis de biomassa é em torno de 65% base úmida. Acima desse ponto, é liberada energia insuficiente para a combustão para satisfazer a evaporação e a produção de calor. Geralmente, muitas câmaras de combustão requerem um combustível suplementar, como gás natural, quando a biomassa tem umidade acima de 50 a 55% base úmida, e o CO e outros produtos da combustão incompleta podem ser emitidos em quantidades significativas, dependendo do *design* da câmara de combustão (JENKINS *et al.*, 1998).

Para completar a análise química imediata da biomassa, existem as cinzas, que constituem o material inorgânico próprio do combustível. Este é distribuído através do combustível, e é algumas vezes referente ao material disperso atômicamente. É composto por silício (Si), potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), fósforo (P), magnésio (Mg) e ferro (Fe).

A liberação do material inorgânico disperso atômicamente de uma partícula combustível é influenciada tanto pela sua volatilidade própria como pela reação das porções orgânicas do combustível. O material próprio volátil a temperaturas de combustão inclui derivados de alguns metais alcalinos, principalmente potássio e sódio. O material não volátil pode ser liberado com transporte convectivo durante a pirólise rápida (JENKINS *et al.*, 1998).

As cinzas da biomassa em alta concentração podem diminuir o poder calorífico,

e também causar perda de energia (STREHLER, 2000). Além disso, a presença de resíduos prejudica a transferência de calor, e por isso as cinzas devem ser removidas manualmente (LEWANDOWSKI, 1997).

c) Análise Somativa

A análise somativa da biomassa é constituída principalmente de três polímeros: celulose, hemicelulose e lignina, numa proporção aproximada de 50:20:30. Os demais componentes, presentes em menor quantidade, são compostos de baixo peso molecular chamados extrativos, encontrados notadamente na casca e englobando terpenos, ácidos graxos, compostos aromáticos e óleos vegetais.

Os polímeros da análise somativa são componentes essenciais na pirólise da biomassa, sendo a base para o entendimento da sua conversão térmica. Alguns autores dividem a pirólise da biomassa em estágios individuais de acordo com a pirólise de cada um desses três componentes (e.g. YANG *et al.*, 2007).

A celulose é constituída de unidades de glicose, resultando num polímero de alto peso molecular, aproximadamente 100000 kg/kmol. As cadeias de celulose nas paredes celulares das plantas são arranjadas compactamente, de modo que suas fibras apresentam regiões nitidamente cristalinas, uma consequência do número grande de ligações de hidrogênio que resulta numa forte interação entre suas moléculas.

A hemicelulose é uma mistura de polissacarídeos, compostos quase inteiramente de açúcares, entre eles a glicose, com o peso molecular em torno de 30000 kg / kmol.

A lignina, outro componente da biomassa, é um polímero amorfo e heterogêneo, que envolve os polissacarídeos da madeira. Caracteriza-se pelo elevado número de grupos OCH_3 e de grupos OH . Tem um alto peso molecular (MCKENDRY, 2002).

Quanto aos extrativos, geralmente, a ocorrência é maior na casca e menor na parte lenhosa. Apesar do baixo teor de extrativos em relação aos demais componentes, sua presença pode influir na escolha da madeira para determinados fins, como os extrativos de cor ou voláteis que dão valor estético, ou os compostos aromáticos que impedem o ataque da madeira por fungos e insetos, ou os taninos e resinas que

interferem negativamente no processo de hidrólise da madeira (YANG *et al.*, 2007).

A tabela 01 apresenta a porcentagem da análise somativa para a biomassa.

TABELA 01 – ANÁLISE SOMATIVA DA BIOMASSA (%)

Componente	Faixa em quantidade (%)
Celulose – C ₆ H ₁₀ O ₅	45 -50
Hemi-celulose – C ₅ H ₈ O ₄	25 – 35
Lignina – C ₉ H ₁₀ (OCH ₃) _{0,9-1,7}	25 - 35

FONTE: NOGUEIRA, 2007

Além da classificação quanto aos recursos energéticos e da composição da biomassa, uma outra característica importante para a combustão da mesma é o seu poder calorífico, apresentado a seguir.

2.1.3 Poder Calorífico

O poder calorífico representa a quantidade de calor por unidade de massa (ou volume) liberada durante a combustão de um combustível. Pode ser denominado de poder calorífico superior (PCS) ou inferior (PCI). O primeiro é a quantidade de calor liberada durante a combustão com a água na forma condensada. O poder calorífico inferior é a quantidade de calor liberada durante a combustão com a água sob a condição de vapor. Quanto maior a umidade do combustível, menor será o seu poder calorífico inferior (VAN WYLEN, 1998).

O poder calorífico superior (PCS) pode ser determinado experimentalmente em laboratórios usando-se um aparelho denominado calorímetro, que mede a variação da temperatura da água provocada pela queima completa da amostra do combustível.

Jenkins² (1990) *apud* Borges (1994) apresenta algumas funções que relacionam o PCS com a composição. Com base no teor de cinzas em massa foi dada a relação apresentada na equação (3):

$$PCS = 20 - 20Z \quad (\text{MJ/kg}) \quad (3)$$

onde Z é a porcentagem de cinzas em base seca.

² JENKINS, B.M.; **Fuel properties for biomass materials**. Internacional Symposium on Application and management of energy in Agriculture. 17p., 1990

Para uma fração mássica de carbono (C) da biomassa em base seca entre 0,3 e 0,6, que é o caso da madeira, o referido autor também apresenta a equação (4).

$$PCS = 2,3 + 35C \quad (\text{MJ/kg}) \quad (4)$$

Jenkins (1990) *apud* Borges (1994) recomenda a equação (5) para o cálculo do PCI.

$$PCI = \left(\frac{1}{1 + w_s} \right) (PCS - h_{lv} (w_s + 9h)) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (5)$$

Onde h_{lv} é o calor latente de vaporização da água, 2440 kJ/kg a 25°C.

Depois de reportado sobre o poder calorífico, no item seguinte serão apresentadas as principais propriedades térmicas da madeira.

2.1.4 Propriedades Térmicas da Madeira

As propriedades térmicas dos materiais são observadas quando a energia térmica é fornecida ou removida do material. Como no presente trabalho o material estudado é a lenha, as características apresentadas neste item são específicas da madeira. As principais propriedades térmicas da madeira são: condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica.

a) Condutividade Térmica

A condutividade térmica é uma característica dos materiais que mede o fluxo de calor que passa por uma unidade de espessura do material sujeito a um gradiente de temperatura. A condutividade térmica da madeira é muito menor do que a dos metais. Por exemplo, a condutividade térmica da madeira com 12% de umidade é entre 0,1 e 1,4 W/m.K, comparado com 216 do alumínio e 45 do aço (SIMPSON, 1999).

b) Calor específico

O calor específico é definido como a quantidade de energia necessária para aumentar uma unidade de massa em uma unidade de temperatura, ou seja, o quanto de calor é necessário para 1 kg de madeira aumentar em 1°C, por exemplo.

Para a madeira, o calor específico é dependente da temperatura e da umidade, mas praticamente independe da densidade ou espécie. À 20°C e 12% de umidade, o calor específico da madeira é de 1,3 kJ/Kg.K (SIMPSON, 1999).

c) Difusividade Térmica

A difusividade térmica é uma característica dos materiais que determina quão rápido o material pode absorver calor do ambiente que o rodeia. É a relação entre a condutividade térmica e o produto da densidade com o calor específico.

Devido à baixa condutividade térmica, à densidade moderada e ao calor específico da madeira, a difusividade térmica da mesma é muito mais baixa quando comparada a materiais como metal, tijolo ou pedra. Um valor típico para a difusividade térmica da madeira é $0,161 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, comparado com $12,9 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para o aço e $0,645 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ para a lã mineral. Por esta razão, a madeira não é extremamente quente ou fria ao toque, como os outros materiais (SIMPSON, 1999).

Como último item do capítulo sobre biomassa, será apresentado a seguir alguns processos necessários para a utilização da biomassa como combustível.

2.1.5 Preparação da Biomassa Combustível

A biomassa bruta, produzida nas atividades florestais ou como resíduo, não é adequada à utilização nos processos de conversão. É necessário um pré-processamento para que a biomassa possa ser empregada como combustível. Os três principais processos são: redução granulométrica, secagem e densificação.

Para aumentar a reatividade e a superfície específica dos biocombustíveis sólidos, é necessário em alguns casos reduzir a granulometria da biomassa bruta. Desta forma, a madeira é cortada em pedaços até atingir a granulometria necessária, que varia de acordo com o tipo de sistema de utilização da biomassa. Um exemplo é mostrado na tabela 02, onde a granulometria é em função do diâmetro do pedaço de madeira. (NOGUEIRA e LORA, 2003).

TABELA 02 – GRANULOMETRIA DA BIOMASSA

Tipo de sistema de utilização da biomassa	Granulometria recomendada (mm)
Leito em movimento	50-100
Queima em suspensão	< 6,0-7,0
Leito fluidizado borbulhante	20-30
Leito fluidizado circulante	<6,0-7,0

FONTE: NOGUEIRA e LORA, 2003

Nienhuys (2005) afirma que pedaços de madeira menores queimam melhor do que as maiores. Para fogões a lenha domésticos, o ideal são madeiras com diâmetro de 4 a 5 cm. O autor conclui também que o corte longitudinal da madeira é mais fácil de se trabalhar do que o corte transversal.

O tamanho dos pedaços de lenha influencia na transferência de calor. Com pedaços mais finos, o aquecimento é mais rápido, a liberação de voláteis é mais rápida, já com pedaços mais grossos, o processo é mais devagar (JENKINS *et al.*, 1998).

Além da redução granulométrica, a secagem é uma alternativa para o pré-processamento da biomassa bruta. Como já mencionado, alguns tipos de biomassa apresentam umidade muito alta, o que dificulta sua utilização como combustível e reduz a quantidade de energia disponível para conversão em calor. Desta forma, para adequar a umidade da biomassa a um processo de conversão determinado, faz-se necessária uma secagem preliminar.

A secagem pode ser natural ou por meio de secadores. A primeira emprega a radiação solar para aumentar o potencial de secagem do ar. Os secadores permitem reduzir significativamente este tempo, mesmo em períodos chuvosos ou úmidos. Nestes equipamentos os agentes de secagem mais utilizados são os produtos de combustão da própria biomassa em fornos e caldeiras (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Além da redução granulométrica e da secagem, existe a densificação, para biomassas de baixa densidade, como a serragem e cavacos de madeira, casca de arroz e bagaço de cana, pois essa baixa densidade dificulta e torna economicamente inviável seu transporte a longas distâncias e armazenamento (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Após apresentado sobre as características principais da biomassa, a seguir serão explicados os principais processos de conversão energética da mesma.

2.2 CONVERSÃO ENERGÉTICA DA BIOMASSA

Os processos de conversão energética da biomassa podem ser classificados em três grupos: processos físicos, termoquímicos e biológicos. Os processos físicos não alteram a composição química original da matéria prima, entre eles estão a densificação e a redução granulométrica, utilizados também como preparação da biomassa para outros processos de conversão. Os processos termoquímicos se caracterizam por alcançarem temperaturas elevadas e incluem a combustão, gaseificação, e pirólise, que inclui a liquefação (pirólise rápida), considerados os mais comuns para os sistemas dendroenergéticos, sobretudo pelo baixo teor de umidade da madeira. Os processos biológicos, incluem, entre outros, a fermentação alcoólica e a digestão anaeróbia, e geralmente são desenvolvidos em biomassa com alto teor de umidade e temperaturas próximas à ambiente.

Como o interesse aqui é a dendroenergia, neste capítulo será apresentada uma breve descrição da pirólise e gaseificação, e uma descrição completa da combustão, processo de conversão utilizado neste trabalho.

2.2.1 Pirólise

A pirólise é a degradação térmica da biomassa em ausência total ou parcial de agente oxidante a temperaturas relativamente baixas, comparadas à gaseificação, havendo transformação em outros combustíveis (frações combustíveis sólidas, líquidas e gasosas). O calor requerido pode ser fornecido indiretamente pela combustão da biomassa, porém o produto não resulta desta combustão, mas sim da ação térmica (NOGUEIRA e LORA, 2003).

A pirólise da biomassa pode ser realizada em diferentes condições de temperatura e tempo de residência, variáveis que afetam diretamente o tipo de produto final e a proporção das fases sólida, líquida e gasosa (NOGUEIRA e LORA, 2003).

O principal objetivo no processo de pirólise é a obtenção de produtos com

densidade energética mais alta e melhores propriedades do que àquelas da biomassa inicial. A Tabela 03 apresenta os processos mais comumente conhecidos para se realizar a pirólise de materiais lignocelulósicos (GOMEZ, 2000a).

TABELA 03 – PRINCIPAIS PROCESSOS DE PIRÓLISE

Tecnologia	Tempo de residência	Taxa de aquecimento	Temperatura máxima (°C)	Produto principal
Carbonização	Horas/dias	Muito pequena	400	Carvão Vegetal
Convencional	5 – 30min	Pequena	600	Gás e Líquido
Rápida	0,5 – 5s	Intermediária	650	Gás e Líquido
Flash	<1s	Alta	<650	Gás e Líquido
Ultra-Rápida	< 0,5s	Muito Alta	1000	Gás e Líquido

FONTE: NOGUEIRA e LORA, 2003

A carbonização é geralmente aplicada quando o produto final desejado é carvão vegetal. Sob as condições de carbonização, bio-gás e bio-líquidos também são formados, e podem ser usados para manter o processo de conversão térmico, enquanto os excessos de gases e óleos podem ser recuperados e usados posteriormente (STREZOV *et al.*, 2007).

Atualmente, modernas unidades de pirólise têm uma extensa gama de aplicação, incluindo a extração de voláteis e líquidos, assim como o carbono sólido. Dependendo da quantidade desejável de cada tipo de energia (gás, líquido ou sólido), a pirólise pode ter uma escala que vai de baixas taxas de aquecimento até métodos pirolíticos rápidos (STREZOV *et al.*, 2007).

Enquanto o processo de pirólise convencional (pirólise lenta) é dirigido, especificamente, para a produção de carvão vegetal (*charcoal*), a pirólise rápida é considerada um processo avançado, no qual, cuidadosamente controlando os parâmetros de processo, podem ser obtidas elevadas quantidades de líquidos, chamados de Bio-óleos (GOMEZ *et al.*, 2000b).

Cabe aqui ressaltar que a pirólise é considerada também uma das etapas de outro processo de conversão energética, a combustão, e dentro da combustão a pirólise acontece com a presença do agente oxidante, como na fornalha estudada nesta dissertação. Nesse caso específico, o objetivo principal não é a obtenção de um

produto com densidade energética maior que a do produto inicial, e sim liberar os gases voláteis presentes na madeira para posterior reação destes com o agente oxidante, para produção de calor. Uma melhor explanação sobre isso será apresentada no item 3.2.3.

A seguir será apresentado a definição do processo de gaseificação.

2.2.2 Gaseificação

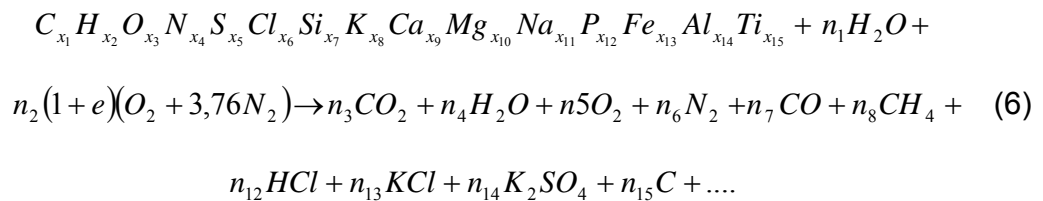
Um outro processo termoquímico de conversão energética da biomassa é a gaseificação. Neste processo, a produção de calor não é o objetivo principal, e sim a conversão da biomassa em um gás combustível, através de sua oxidação parcial a temperaturas elevadas, utilizando-se entre 20 e 40% da quantidade teórica de ar. Este gás é um energético intermediário, e poderá ser empregado mais adiante em outro processo de conversão, a fim de gerar calor ou potência mecânica, adequando-se a sistemas em que a biomassa sólida não é possível de ser utilizada. Basicamente o conteúdo médio dos compostos combustíveis no gás resultante da biomassa é, para o CO entre 9 e 21%, para o gás hidrogênio (H₂) entre 6 e 19% e para o metano (CH₄) entre 3 e 7% (NOGUEIRA e LORA, 2003).

2.2.3 Combustão

Por ser o processo de conversão energética utilizado neste trabalho, neste item, será apresentada uma explicação mais detalhada do que já fora para os processos de pirólise e gaseificação.

Combustão é uma reação química exotérmica entre uma substância, o combustível, e um gás, o comburente, usualmente o oxigênio, para liberar calor. É um processo de obtenção de energia que envolve simultâneas transferências de calor e massa, com reações químicas (e.g. WARNATZ, 2003).

Uma reação global da combustão da biomassa com o ar tem a forma apresentada na equação (6), onde o primeiro reagente representa a composição da biomassa, incluindo as cinzas (JENKINS *et al.*, 1998).



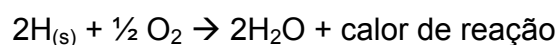
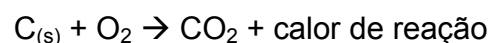
A inclusão de 15 elementos na fórmula empírica do combustível é incompleta. Existem muitos outros, e alguns importantes para a combustão da biomassa. Metais pesados, por exemplo, têm uma forte influência na formação das cinzas, mas não estão incluídos na equação acima (JENKINS *et al.*, 1998).

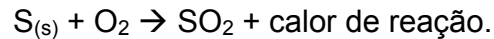
O segundo termo dos reagentes é a umidade em base seca do combustível. E o terceiro termo representa o ar, embora também seja uma simplificação, representada por uma simples mistura binária de oxigênio e nitrogênio em uma razão volumétrica de 21% para 79%. O ar inclui muito mais constituintes, mas que não são importantes na análise bruta, apesar de que não deve escapar de atenção a presença de certos gases a uma concentração muito baixa, muitos formados na queima da biomassa, que têm impactos nas propriedades radioativas da atmosfera (JENKINS *et al.*, 1998).

O lado dos produtos da reação é complexo. Os principais aparecem primeiro, mas existem ainda muitos produtos importantes para o sucesso da operação do sistema de combustão da biomassa, incluindo poluentes atmosféricos como CO, hidrocarbonetos (HC), óxidos de nitrogênio e enxofre, entre outros, assim como cloretos, sulfatos, carbonatos e silicatos (JENKINS *et al.*, 1998).

a) Ar Teórico e Excesso de ar

Os produtos principais à que se refere o parágrafo anterior são produtos de uma combustão completa. Esta ocorre quando há oxigênio suficiente, para a oxidação completa de todos os elementos do combustível. Os elementos químicos carbono, hidrogênio e enxofre reagem com o oxigênio do ar formando os produtos de combustão segundo as reações :





A quantidade de oxigênio suficiente para a oxidação completa de todos os elementos do combustível, é chamada de ar teórico. Na combustão completa com ar teórico não se obtém oxigênio nos produtos (e.g VAN WYLEN, 1998).

A quantidade mínima necessária de ar para a combustão completa é calculada através da composição do combustível e dos valores numéricos das fórmulas das reações químicas, através da equação (7) (NOGUEIRA e LORA, 2003):

$$V_{ar}^0 = \frac{100}{21} \frac{1}{\rho_{O_2}} \left(2,67 \frac{C}{100} + \frac{8H}{100} + \frac{S}{100} - \frac{O}{100} \right) \quad (m^3/kg) \quad (7)$$

onde ρ_{O_2} ($1,428 \text{ kg/m}^3$) é a densidade do oxigênio nas CNTP, e C, H, S e O são as quantidades em percentual de carbono, hidrogênio, enxofre e oxigênio presentes no combustível, respectivamente.

Entretanto, na prática, alguns autores reportam que a combustão completa geralmente não é alcançada, pois é necessária uma quantidade de ar maior do que a quantidade teórica, chamada de excesso de ar (e.g VAN WYLEN, 1998; VLASSOV, 2001; NOGUEIRA e LORA, 2003).

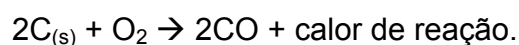
A equação (8) apresenta o cálculo do excesso de ar.

$$E = \frac{V_{ar}}{V_{ar}^0} \quad (8)$$

onde V_{ar} é o volume de ar real da combustão (m^3/kg) e V_{ar}^0 é o volume de ar teórico da combustão (m^3/kg).

O excesso de ar, determinado com base nas medições das concentrações de CO_2 ou O_2 , presentes nos produtos da combustão, deve ser mantido o mais baixo nível possível, até que a presença de fuligem ou de CO indique que há presença de combustão incompleta (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Quando é fornecida à combustão uma quantidade menor de ar que a necessária, esta é dita incompleta. A falta de ar influi sobre a reação da queima do carbono e como produto de combustão aparecerá o monóxido de carbono (CO), devido à reação:



O monóxido de carbono ainda é considerado um gás combustível, pois ao reagir com o oxigênio libera calor. Assim, em uma combustão incompleta, o aproveitamento do combustível e o rendimento da caldeira diminuem. E o monóxido de carbono é um gás tóxico e provoca a poluição do ambiente e também danos à saúde humana, pois reage com a hemoglobina do sangue provocando envenenamento (VLASSOV, 2001).

É possível encontrar pequenas quantidades de CO nos produtos de combustão, mesmo quando fornecido excesso de ar. A quantidade exata formada depende de diversos fatores, incluindo a mistura e a turbulência durante a combustão, e o tempo de residência do combustível na fornalha, que dizem respeito ao projeto aerodinâmico da mesma (VAN WYLEN, 1998).

A literatura comprova que níveis de excesso de ar elevados podem provocar retardamento da reação da combustão, redução na eficiência global do sistema de combustão e exigência de uma turbulência mais potente. Por outro lado, ar em quantidade inferior ao ar teórico deve ser evitado por propiciar a combustão incompleta (e.g BEJAN, 1997; VAN WYLEN, 1998).

De acordo com Martin (2007), ainda há a formação de CO através do coque, devido à falta de oxigênio, pois o carbono do coque resultante dessa falta de oxigênio, ou seja, do coque que não completou sua combustão, pode reagir com os produtos de oxidação ao redor (CO_2 e H_2O) em uma etapa de redução e formar CO e H_2 .

A fim de se obter valores mínimos de CO nos produtos da combustão, deve-se estabelecer um excesso de ar de 1,3, para combustível sólido. Ainda assim, observa-se a redução da temperatura de combustão e do teor de CO_2 (NOGUEIRA e LORA, 2003).

Além do CO, existem outros produtos que indicam uma combustão incompleta, como gás hidrogênio (H_2), metano (CH_4) e fuligem.

O excesso de ar pode ser ajustado mediante um controle adequado do equipamento. O cálculo do coeficiente de excesso de ar implica na medição do fluxo real de ar de combustão ou na análise química dos gases de combustão. A medição do fluxo de ar, quando possível, tem o inconveniente de apresentar margens de erro, muitas vezes não toleráveis, tornando os resultados imprecisos. A determinação das porcentagens de CO_2 ou de O_2 nos gases de combustão é uma alternativa viável para a

maioria dos combustíveis normalmente aplicados às caldeiras (e.g. BAZZO, 1995).

Depois de explicado o significado de ar teórico e excesso de ar na combustão, a seguir serão apresentadas as etapas do processo de combustão.

b) Etapas da Combustão

A combustão da madeira pode ser dividida em até quatro fases: secagem, pirólise e/ou gaseificação, e oxidação.

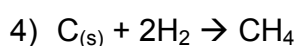
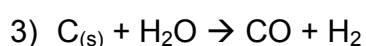
Na secagem, a umidade da madeira evapora para o ambiente.

A segunda fase é a pirólise, e como reportado anteriormente, dentro da combustão, o objetivo principal da pirólise é liberar os voláteis da biomassa para posterior reação destes com o ar, portanto alguns autores referem-se a essa fase como volatilização (e.g. NOGUEIRA e LORA, 2003).

A pirólise decompõe o combustível formando radicais, que levam a produtos gasosos (condensáveis ou não condensáveis) e/ou produtos sólidos. Os produtos gasosos consistem de hidrocarbonetos (C_xH_y), uma fração de oxidação parcial (CO , H_2) e uma fração de oxidação completa (CO_2 , H_2O). Os produtos sólidos constituem o coque (MARTIN, 2007).

Enquanto o carvão antracito perde menos de 10% da sua massa na pirólise, e o carvão betuminoso perde entre 5 e 65% da sua massa, a biomassa pode perder até 90% da sua massa nesse estágio da combustão (JENKINS *et al.*, 1998).

A terceira fase é a gaseificação, onde a madeira se converte em gases combustíveis e incombustíveis, através de reações com o oxigênio (O_2), vapor d'água (H_2O) e gás hidrogênio (H_2). A fronteira entre o processo de gaseificação e pirólise não é uma linha bem definida. E na gaseificação, os produtos sólidos da pirólise ricos em carbono são convertidos em componentes gasosos pelas seguintes reações:



Em altas temperaturas, as reações 2 e 3 prevalecem, e são endotérmicas. Os produtos resultantes da gaseificação são normalmente tão reativos que se oxidam imediatamente (e.g BORGES, 1994).

A próxima e última etapa da combustão é a oxidação, fase em que os produtos da gaseificação e/ou pirólise, ao reagirem com o oxigênio, são convertidos principalmente em gás carbônico (CO_2) e vapor d'água (H_2O). E no caso de haver enxofre (S) na composição da lenha há a formação de dióxido de enxofre (SO_2). As reações de oxidação são exotérmicas, e podem alcançar temperaturas de até $1600\text{ }^\circ\text{C}$ (BORGES, 1994).

É a fase em que o chamado oxigênio "primário" reage. A oxidação de compostos gasosos envolve cadeias de reações cujos elementos ativos são radicais responsáveis pela combustão em chama. A estrutura da chama depende principalmente da mistura entre o gás combustível e o oxigênio. A oxidação do coque necessita da adsorção do O_2 através de sua superfície porosa, formando CO , o qual é queimado na fase gasosa (MARTIN, 2007).

Se os processos de oxidação são incompletos, são obtidos produtos da oxidação parcial, resultantes da falta de reatividade. E também longas cadeias de carbono dos produtos sólidos, que formam fuligem, sintetizados dos últimos resíduos gasosos do combustível à alta temperatura e sem O_2 (MARTIN, 2007).

O carbono dos produtos sólidos resultantes da falta de oxigênio pode reagir com os produtos de oxidação circundantes (CO_2 e H_2O), numa etapa de redução, formando CO e H_2 . Entretanto, se a temperatura for suficiente, a fase sólida pode desaparecer, restando apenas uma fração combustível na fase gasosa.

Se necessário, em particular quando o processo de combustão leva a formação primária de gás combustível, uma segunda fase de oxidação é necessária, utilizando oxigênio secundário, para obter a completa oxidação dos gases e assim transformar todo o poder calorífico do combustível em calor (MARTIN, 2007).

Nos sistemas industriais geralmente o chamado ar primário é para a combustão do coque, e o ar secundário para a combustão dos voláteis. Em alguns sistemas o carbono do combustível se queima no leito somente até CO , concluindo sua combustão

até CO_2 , juntamente com os voláteis.

As quatro fases da combustão podem ocorrer ao mesmo tempo, na mesma partícula de madeira, ou cada fase pode predominar em regiões distintas de uma fornalha ou caldeira.

A figura 01 apresenta um esquema completo da combustão.

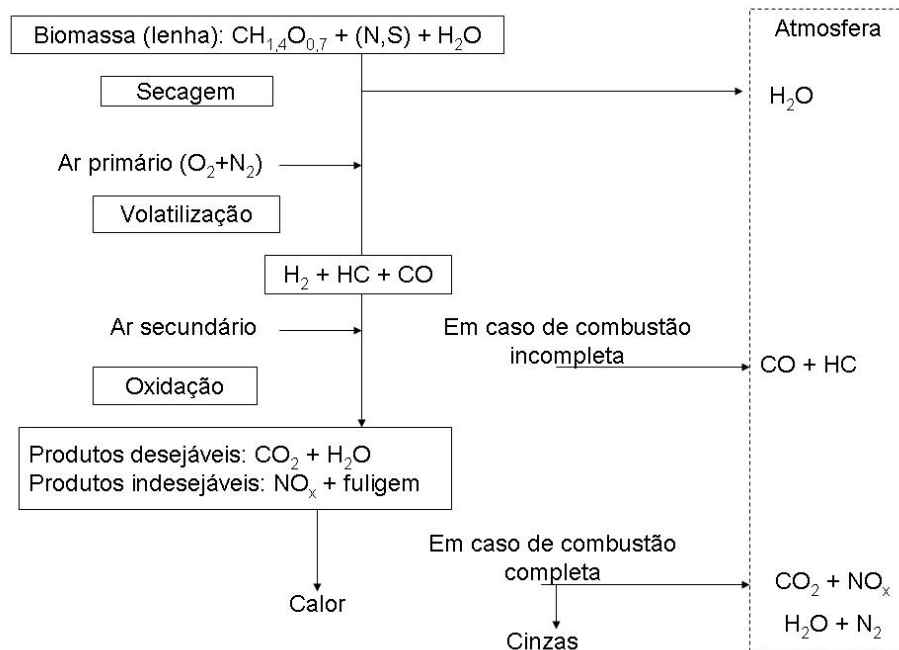


FIGURA 01– ESQUEMA COMPLETO DA COMBUSTAO
 FONTE: Redesenhado de NOGUEIRA e LORA, 2003

c) Entalpia de combustão

A entalpia de combustão (h_{RP}) é definida como a diferença entre a entalpia dos produtos e a entalpia dos reagentes quando ocorre combustão completa a uma dada temperatura e pressão (VAN WYLEN, 1998).

É definida na equação (9), e é sempre negativa. O valor positivo ou absoluto da mesma quantidade representa o poder calorífico inferior do combustível (BEJAN, 1997).

$$\bar{h}_{RP} = H_P - H_R \quad (9)$$

Onde H_P é a entalpia dos produtos e H_R a entalpia dos reagentes.

A entalpia de combustão é expressa em unidade de energia (kJ) por unidade de massa (kmol), tal como por kg de combustível.

d) Temperatura teórica da combustão

Em um processo de combustão que não envolve trabalho ou variações de energia cinética ou potencial, a temperatura atingida pelos produtos é chamada de temperatura adiabática da chama (VAN WYLEN, 1998).

A temperatura teórica da combustão que pode ser atingida para um dado combustível e certo estado de reagentes, ocorre quando a mistura é estequiométrica. É calculada através da entalpia dos produtos e dos reagentes. O resultado não é exato porque a entalpia dos produtos não é exatamente proporcional à temperatura.

Geralmente a temperatura teórica da combustão, aqui representada por T^t , é de 20 a 25% maior do que a temperatura real na zona de combustão. Assim, calculando-se T^t é possível avaliar aproximadamente a temperatura real dos gases, que serve para decidir se o combustível garante ou não a temperatura necessária para o forno.

A temperatura real da combustão pode ser controlada pela quantidade de excesso de ar que é utilizada. Quando falta ar na zona de combustão, ou seja, o coeficiente de excesso de ar é menor que 1 ($E < 1$) nem todo o calor é liberado, o calor disponível na câmara de combustão diminui e a temperatura diminui. Quando há ar em excesso ($E > 1$), é necessário gastar a energia térmica dos produtos de combustão para aquecer o ar em excesso até a temperatura dos gases, diminuindo a temperatura (e.g VAN WYLEN, 1998; VLASSOV, 2001, WARNATZ, 2003).

e) Produtos da combustão

Como já reportado, os produtos da combustão completa são principalmente H_2O e CO_2 . O O_2 aparece nos produtos da combustão em virtude do excesso de ar, isto é, representa a quantidade de oxigênio que não participou das reações de combustão.

A formação de SO_2 depende do teor de enxofre do combustível, e o SO_3 é formado pela oxidação do SO_2 . A redução do excesso de ar diminui a quantidade de O_2 disponível para a oxidação do SO_2 em SO_3 , reduzindo a formação de H_2SO_4 , nas partes

frias da caldeira (PINHEIRO e VALLE, 1995).

Dentre os produtos da combustão incompleta, são muito nocivos à saúde humana os particulados, o monóxido de carbono (CO), conforme já citado, e os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs). Os particulados são responsáveis por obstruções pulmonares e doenças crônicas decorrentes. Os HPAs causam câncer no sistema respiratório. O monóxido de carbono causa insuficiência respiratória devido a sua afinidade com a hemoglobina, que transporta o oxigênio para os tecidos do corpo. O particulado com tamanho inferior a $0,1\mu\text{m}$ é denominado fuligem e sua formação está associada às reações de craqueamento dos hidrocarbonetos, ou seja, reações complexas em fases gasosas que geram núcleos condensados sólidos. Essas reações competem com o mecanismo de oxidação dos hidrocarbonetos, sendo mais pronunciadas em situações de combustão rica e elevadas temperaturas (WILLIAMS³, 1976) *apud* (LACAVA e CARVALHO, 2003).

A fuligem é formada principalmente na zona primária de chamas difusivas, onde, em geral, a combustão ocorre com falta de oxigênio. No entanto, sua formação pode ocorrer em qualquer região da chama, desde que não haja uma adequada mistura entre os reagentes. A maioria da fuligem produzida na região primária pode ser consumida na região secundária (região de reação onde já há uma maior concentração de oxigênio) se a temperatura for suficientemente elevada. Assim, do ponto de vista da emissão de fuligem, a chama pode ser dividida em duas regiões distintas: a região primária, que governa a taxa de produção, e a região secundária, que determina a taxa de consumo (LEFEVRE⁴, 1983) *apud* (LACAVA e CARVALHO, 2003). Portanto, a presença de fuligem nos produtos da combustão depende do balanço entre essas duas regiões (LACAVA e CARVALHO, 2003).

O monóxido de carbono, além de ser o mais nocivo dos produtos da combustão incompleta, é também um bom indicador da presença de outros poluentes. Uma curva levantada por Bussman⁵ (1988) *apud* Borges (1994) mostra uma relação entre

³ WILLIAMS, A. **Fundamentals of Oil Combustion**. Progress in Energy and Combustion Science., v.2, n.3, p.167-79, 1976

⁴ LEFEVRE, A.H **Gas Turbine Combustion**. Bristol, PA : Taylor & Francis, 1983

⁵ BUSSMANN, P.J.T. **Woodstoves: Theory and Applications in Developing Countries**. Tese de Ph.D., Eindhoven University of Technology, 174p.,1988

concentrações de CO e hidrocarbonetos pesados (C_xH_y) obtidos na combustão da lenha, apresentado na figura 02.

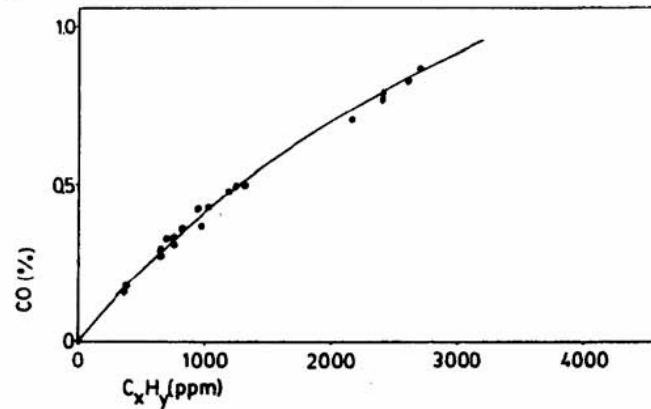


FIGURA 02 – RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE CO E C_xH_y .
FONTE: BUSSMAN (1988, APUD BORGES, 1994)

Bussman (1988) *apud* BORGES (1994) também pesquisou o efeito da concentração de CO na atmosfera em função do tempo de exposição, obtendo o resultado apresentado na figura 03.

Outro gás poluente que pode ser emitido na combustão da biomassa é o óxido de nitrogênio (NO_x). É produzido durante a combustão do Nitrogênio do ar (NO_x térmico) ou do Nitrogênio do combustível (NO_x combustível). Na difusão turbulenta, a produção de NO_x é altamente dependente da composição do combustível e da relação ar/combustível (PINHEIRO e VALLE, 1995).

Os limites de NO_x admissíveis são apresentados para condições específicas de combustão. Quanto maior for o teor de O_2 nos produtos da combustão, mais diluído serão os poluentes e menor o NO_x medido. A temperatura e o teor de O_2 e N_2 nos produtos da combustão são os principais fatores para a formação de NO_x e são controlados pelo excesso de ar. Assim, além da influência na eficiência da combustão, determina os níveis de emissão de NO_x e CO.

Pequenos excessos de ar geram altas temperaturas de chama e baixos teores de O_2 e N_2 , enquanto altos valores, o contrário. O teor de NO_x atinge o máximo a um excesso de ar entre 1,05 e 1,3. Diminuindo o excesso de ar, o NO_x diminui rapidamente

porque os teores de O_2 e N_2 , potenciais formadores de NO_x , diminuem. Com o aumento do excesso de ar, o teor de NO_x também diminui, devido à diminuição da temperatura da chama. Abaixo de $1500^\circ C$, a formação de NO_x diminui significativamente (PINHEIRO e VALLE, 1995).

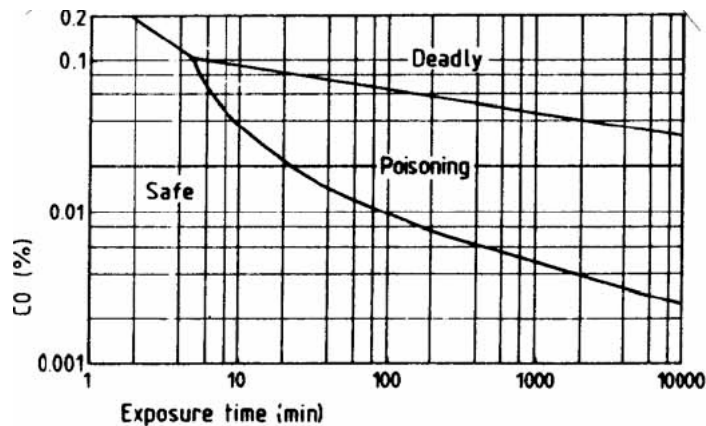


FIGURA 03 – TOXICIDADE DO CO EM FUNÇÃO DO TEMPO DE EXPOSIÇÃO
 FONTE: BUSSMAN (1988) *apud* BORGES (1994).

A relação típica entre o excesso de ar e a emissão de NO_x e CO é apresentada na figura 04. As curvas de emissão de NO_x e CO devem ser analisadas simultaneamente, pois a diminuição de um poluente pode levar ao aumento da formação de outro. Observa-se que o teor de CO diminui rapidamente com o aumento do excesso de ar.

A diminuição das emissões de NO_x é muitas vezes acompanhada de um aumento da emissão de particulados, que consistem de fuligem, produzida a partir dos constituintes em fase gasosa, e coque, cuja produção é devido a natureza multi-componente do combustível (PINHEIRO e VALLE, 1995).

Segundo a Resolução 382 do Conama, de 26/12/2006, o limite de emissão de NO_x proveniente da combustão de derivados da madeira é de 360 ppm. Acima dessa concentração o NO_x é considerado prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente.

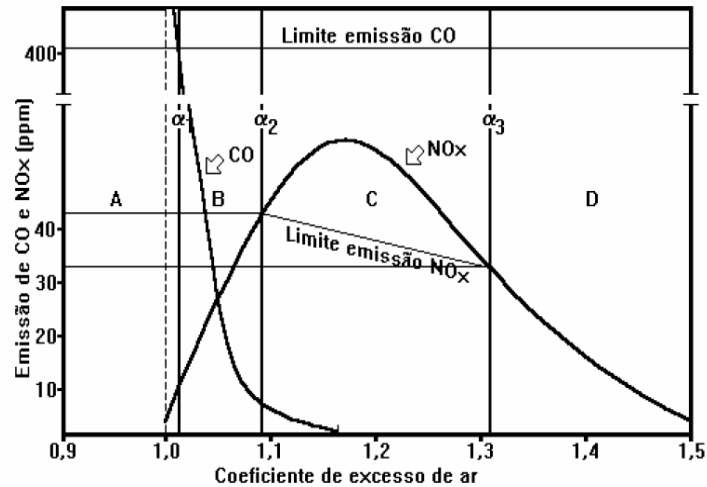


FIGURA 04 – RELAÇÃO CO/NO_x
 Fonte: BURD⁶ (1992) *apud* PINHEIRO e VALLE (1995)

2.3 FORNALHAS

Esta seção apresenta uma discussão sobre fornalhas, definição, classificação e mecanismos de funcionamento quanto ao fluxo de gases. Também serão apresentadas algumas experiências realizadas com fornalhas a lenha.

2.3.1 Definição e critérios de seleção

A fornalha é a unidade destinada a converter a energia química do combustível em energia térmica (e.g. BAZZO, 1995). É o local onde se queima o combustível. Consta de duas partes principais: a grelha, onde ocorre a pirólise (ou volatilização), com a liberação dos voláteis e a combustão do coque; e câmara de combustão, onde ocorrem as reações do ar de combustão com os voláteis emitidos na pirólise (PÊRA, 1996).

O volume de uma câmara de combustão deve ser suficiente para garantir uma combustão eficiente. Volumes pequenos podem implicar em combustão parcial com presença de material ainda combustível nos gases que deixam a fornalha. Por outro lado, volumes grandes representam maior superfície de irradiação, implicam em menores temperaturas na câmara, dificultando a ignição das partículas de combustível.

⁶ BURD, V. **Squeezing Clean Energy from Boilers and heaters. Chemical Engineering.**, v.99, n.3, p.145-150, 1992

Segundo Pêra (1996), as fornalhas podem ser classificadas de acordo com a queima e o tipo de combustível. As fornalhas de queima sob suporte utilizam combustíveis sólidos a granel ou picados, ou moídos grosseiramente. As fornalhas de queima em suspensão são usadas para combustíveis pulverizados, ou gaseificados, finamente divididos.

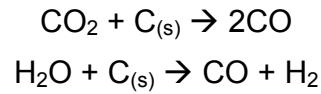
No presente trabalho, o combustível em estudo é a lenha, e por isso será utilizada a primeira alternativa.

A queima sob suporte é também chamada de contra-corrente ou queima na camada. O combustível é carregado por cima, permanece nas barras da grelha, e o ar move-se por baixo, atravessando toda a camada. Porém, existe também o fluxo co-corrente, ou também chamado *downdraft*, onde o combustível e os gases fluem no mesmo sentido. No item 3.3.2 é apresentada uma melhor discussão do assunto.

Na queima sob suporte em fluxo contra-corrente, pedaços do combustível fresco caem por cima da camada e recebem o calor do fluxo de baixo dos gases incandescentes e também do fluxo de calor de radiação acima da camada. À medida que cresce a temperatura do pedaço de combustível, ocorrem processos de decomposição de substâncias orgânicas e saída de voláteis. Nesta saída, os combustíveis sofrem grandes alterações das suas propriedades. Estes se tornam mais porosos, aparecem fissuras na estrutura da superfície, tornando-a rugosa. Assim termina a formação do coque. É um processo rápido e se completa em uma camada fina de um pedaço de combustível (e.g. VLASSOV, 2001).

À medida que os voláteis são liberados para a câmara de combustão, o carbono do coque começa a reagir com o oxigênio, iniciando assim a combustão do coque. A zona de queima do coque é dividida pela altura em duas zonas: inferior e superior. A primeira é chamada zona do oxigênio, por apresentar grande quantidade desse gás. A reação principal desta zona é a de formação do dióxido de carbono, e o papel do oxigênio é predominante. No final dessa zona a concentração do oxigênio é quase nula.

A zona superior é chamada de zona redutora, por nela ocorrerem reações redutoras com a formação do monóxido de carbono. Nela só são possíveis as seguintes reações de combustão do carbono:



São reações endotérmicas, acompanhadas pela diminuição da temperatura. Por isso a temperatura máxima e a concentração máxima de CO_2 têm lugar no final da zona inferior.

Alguns autores afirmam que a queima em grelha implica em queima parcial do combustível. É comum a presença de carbono não queimado no cinzeiro, que tende ser tanto maior quanto maior for o teor de cinzas do combustível (e.g. VLASSOV, 2001).

2.3.2) Fornalhas de fluxo contra-corrente e co-corrente

O principal diferencial desse trabalho é o fluxo dos gases na fornalha. Enquanto as fornalhas convencionais apresentam o fluxo contra-corrente, ou seja, combustível e gases em sentidos opostos, a fornalha aqui estudada apresenta o fluxo co-corrente, onde o combustível e os gases fluem no mesmo sentido, apresentando vantagens em relação ao fluxo convencional, como será apresentado neste capítulo.

Nas fornalhas convencionais o combustível é alimentado por cima enquanto o ar de combustão entra por baixo, geralmente através de uma grelha (Figura 05). Assim, o ar entra primeiro em contato o carvão em combustão, que devido à sua alta porosidade, tem uma grande área de superfície específica. Mesmo uma camada fina de carvão consome a maioria do oxigênio no ar, produzindo dióxido de carbono (CO_2). Esse processo libera uma grande quantidade de calor, por isso, quando CO_2 encontra mais carvão no caminho, uma segunda reação acontece, reduzindo parte do CO_2 a CO , devido à falta de oxigênio. Como a redução é uma reação endotérmica, o gás esfria, e assim a redução nas camadas superiores é menos intensa. E se nas camadas superiores ainda encontra-se madeira não modificada, esta irá aquecer pelo contato com o gás ainda quente, causando a pirólise descontrolada e produzindo voláteis e carvão, longe da zona de combustão (BORGES, 1994).

Os produtos da pirólise não encontram oxigênio, a menos que se forneça ar secundário. Porém, este é fornecido normalmente frio, e assim resfria a chama, impedindo a re-conversão do CO formado em CO_2 (BORGES, 1994). No início do

processo de combustão da lenha, a temperatura deve ser superior a 300 °C, temperatura na qual já são emitidos alguns voláteis pela pirólise, e estes começam a reagir com o oxigênio, dando início às reações de combustão (NOGUEIRA e LORA, 2003).

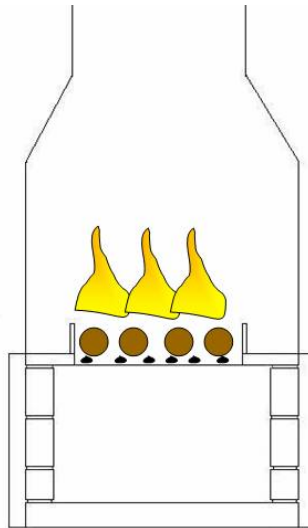


FIGURA 05 – FORNALHA CONTRA-CORRENTE

Para a queima completa dos voláteis, é necessária uma temperatura superior a 650°C, que é a temperatura de combustão do CO, pois a essa temperatura, a constante de equilíbrio da equação de formação do CO é praticamente nula (WAN WYLEN, 1998).

Conclui-se que na combustão de fluxo contra-corrente, não é possível fornecer oxigênio suficiente para queimar toda a resina evaporada pela lenha, se a liberação dela é muito forte no início. E não existe tempo suficiente para que toda resina vaporizada reaja quimicamente com o ar, devido ao curto tempo de residência dos gases na câmara de combustão (BORGES, 1994).

Como mencionado anteriormente, as fornalhas são classificadas quanto à queima e ao tipo de combustível, e não há referências que as classifiquem quanto ao fluxo de gases. Assim chega-se a conclusão que os dois reagentes, ar e madeira, podem fluir na mesma direção, em fluxo co-corrente ao invés de se encontrarem frente a frente.

Através da utilização de uma grelha e uma chaminé, cria-se um fluxo de ar que

vai de cima para baixo na lenha. Isto faz com que a chama se forme de cabeça para baixo. Assim, o fogo não se forma entre cada pedaço de lenha, e sim abaixo deles, fazendo com que os pedaços de lenha não se aqueçam demais logo no começo do processo, e a emissão de voláteis seja mais dosada ao longo da queima. Enquanto que nas fornalhas de fluxo contra-corrente os gases quentes que envolvem a lenha fria entram no processo, nas fornalhas de fluxo co-corrente a lenha fria recebe calor por radiação numa proporção bem menor, diminuindo assim a pirólise descontrolada.

A distância entre a chama formada na zona de pirólise e o topo da chaminé, chamada região adiabática, pois teoricamente não troca calor com o ambiente, é um espaço em que os gases têm a chance de reagirem completamente com o ar, pois fornece condições de tempo e temperatura suficientes para as reações de combustão se completarem (BORGES, 1994).

Vlassov (2001, p.98) se refere ao fluxo co-corrente com uma maneira de queima do combustível na camada ainda não amplamente desenvolvida, devido aos poucos estudos realizados sobre o mesmo.

2.3.3 Experiências realizadas com a queima de biomassa nos fluxos contra-corrente e co-corrente

Neste item serão apresentados os resultados de algumas experiências realizadas em combustão de biomassa com fluxo co-corrente, e também de fluxo contra-corrente, para efeito de comparação das emissões de CO.

Verhaart (1990) construiu um protótipo de fornalha de fluxo co-corrente, com a região adiabática em seção horizontal e altura da chaminé variável (Figura 06), e obteve uma combustão com baixo teor de CO, de 300 ppm em média, como apresentado na figura 07.

Borges (1994) construiu um fogão a lenha de uso doméstico com algumas modificações no queimador. Ele inverteu o fluxo de ar e construiu uma região adiabática (Figura 08). Com essas modificações, os voláteis pirolisados pela radiação e condução do leito de carvão juntamente com o ar para combustão passam por uma região de altas temperaturas, a grelha. Os gases resultantes passam então pela região

adiabática, fornecendo condições de tempo e temperatura para que as reações de combustão se completem.



FIGURA 06 – PROTÓTIPO CONSTRUÍDO POR VERHAART
FONTE: VERHAART (1990)

A figura 09 mostra o fogão construído por Borges (1994), já com o queimador *downdraft* acoplado ao trocador de calor e às chapas para as panelas. O queimador foi construído em argila aditivada com cinza de casca de arroz.

O fogão doméstico de combustão *downdraft* construído por Borges (1994) obteve os resultados apresentados na figuras 10 e 11. Foi encontrado um teor médio de 1600 ppm de CO e 8,86% de O₂.

Prasad (2004) também realizou algumas experiências com fogões a lenha de combustão *downdraft*, propondo uma alimentação de lenha em intervalos constantes, a fim de se obter um regime periódico, e assim determinar a taxa de fornecimento de energia. O autor concluiu que quanto menor o intervalo entre uma carga e outra, maior o teor de CO nos produtos da combustão e menor a temperatura dos gases.

Olsson (2004), em um experimento com fogão a lenha com combustão convencional (fluxo contra-corrente) conseguiu uma emissão de CO de 3000 ppm.

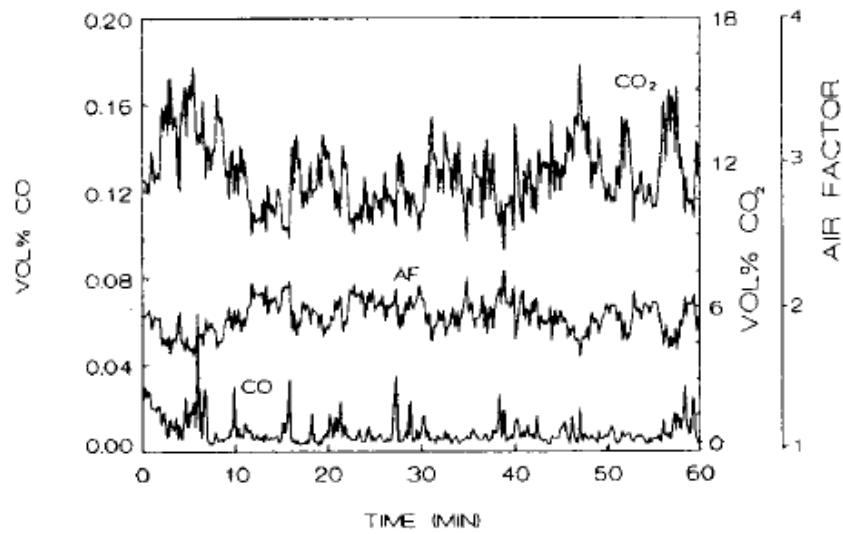


FIGURA 07 – PRODUTOS DA COMBUSTÃO DE UM FOGÃO DOWNDRAFT
 FONTE: VERHAART (1990)

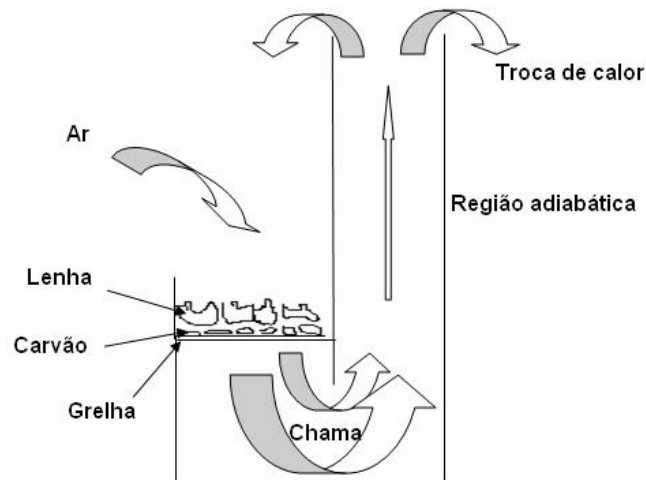


FIGURA 08 - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO QUEIMADOR DO FOGÃO DOWNDRAFT
 FONTE: Adaptado de BORGES (1994)

Hedman *et al* (2006) também realizou experimentos com um queimador de lenha de combustão convencional, o referido autor obteve uma concentração de CO de 2500 ppm em média.

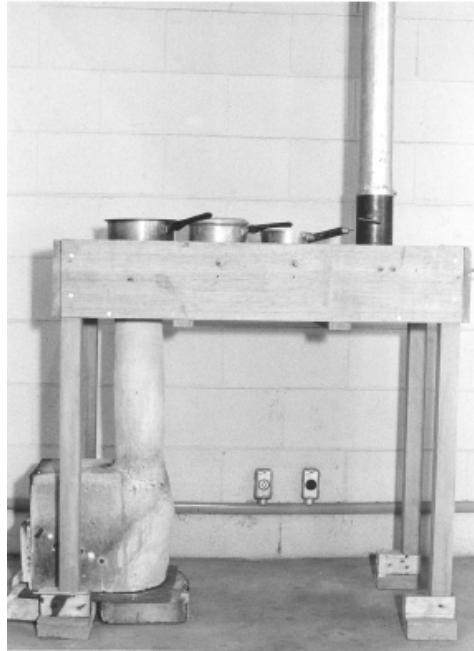


FIGURA 09 – FOGÃO Á LENHA DE FLUXO DOWNDRAFT
FONTE: BORGES (1994)

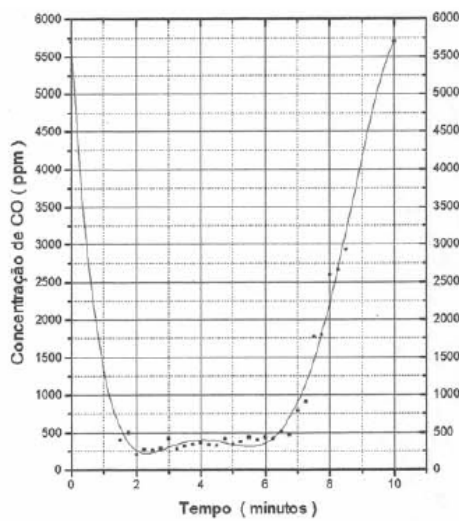


FIGURA 10 – CURVA DE CO
FONTE: BORGES (1994)

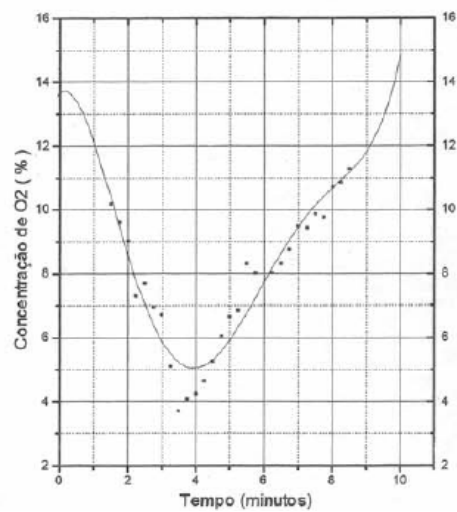


FIGURA 11 – CURVA DE O₂
FONTE: BORGES (1994)

Além de fornalhas e fogões, o fluxo downdraft tem sido aplicado também é gaseificadores de biomassa.

Zainal *et al* (2002) realizou estudos experimentais em um gaseificador de biomassa *downdraft*, com estrutura cônica, sistema de alimentação, sistema de ignição

e sistema de suprimento de ar (figura 12).

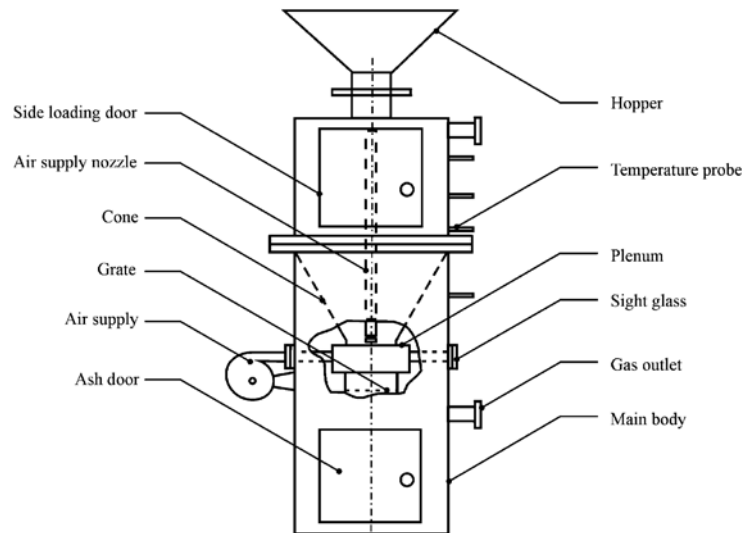


FIGURA 12 – GASEIFICADOR DE BIOMASSA EXPERIMENTAL
 FONTE: ZAINAL *et al.* (2002)

A temperatura foi medida através de termopares nas zonas das quatro fases de conversão termoquímica: secagem, pirólise, combustão e redução. A figura 13 apresenta o gráfico da variação da temperatura durante uma corrida experimental do protótipo de um gaseificador de biomassa *downdraft* de Zainal et al (2002). Constatou-se no referido experimento que devido à alta temperatura da zona de combustão (em torno de 1000 °C), o alcatrão sofre craqueamento facilmente e por isso o biogás produzido tem baixo teor de alcatrão (ZAINAL *et al.*, 2002).

Para reduzir o número de parâmetros de avaliação do desempenho do gaseificador, o referido autor utilizou uma taxa de equivalência, que combina o efeito da taxa do fluxo de ar, taxa de suprimento de combustível e duração da corrida. Ele constatou a produção de gás por unidade de massa do combustível aumenta linearmente com a taxa de equivalência. A concentração de CO no gás produzido ficou em médio 24000 ppm. A eficiência do gaseificador foi em torno de 80%. E o consumo específico de biomassa foi na ordem de 2kg / kWh.

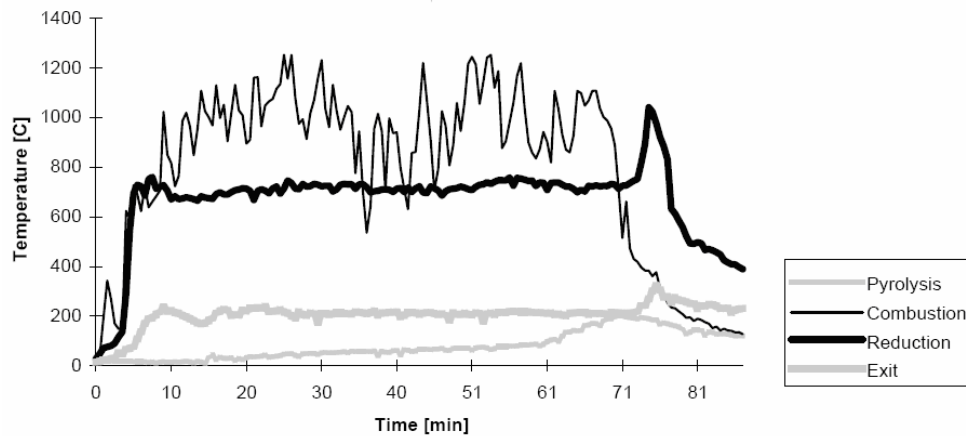


FIGURA 13 – VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DURANTE UMA CORRIDA EXPERIMENTAL EM UM GASEIFICADOR *DOWNDRAFT*
 FONTE: ZAINAL *et al.* (2002)

A queda de temperatura por volta de 35 min de corrida foi devido a retirada do termopar do gaseificador.

Hanaoka *et al.* (2004) estudou sobre a influência da composição da biomassa na gaseificação utilizando um gaseificador de leito fixo *downdraft*, com o reator construído em cerâmica, um controlador de temperatura, um alimentador para fornecer a quantidade desejada de combustível, um compartimento com água para resfriamento, uma coletor e um medidor de gás. A temperatura de gaseificação variou de 800 a 1000°C.

O autor constatou que o teor de concentração de CO foi menor do que o de CO₂ ou H₂, quando o combustível era predominantemente constituído de lignina. Ao contrário do combustível cuja predominância era a celulose.

Silva *et al.* (2006) projetou e construiu um gaseificador para tocos de lenha de fluxo co-corrente e de pequena escala, ao qual foi acoplada uma câmara para combustão do gás produzido visando à geração de ar quente limpo, para ser usado para secagem de produtos agrícolas e no aquecimento de instalações zootécnicas. Com base nos princípios e leis da termodinâmica para um sistema em regime permanente, o autor concluiu que o dimensionamento de gaseificadores de biomassa de fluxo co-corrente, a partir do balanço de massa e energia para o sistema como um

todo e para o gaseificador, combustor e misturador, em particular, mostrou-se tecnicamente viável; o proposto sistema gerador de calor foi de fácil construção, utilizando-se técnicas e materiais simples e de fácil aquisição, não exigindo mão-de-obra especializada. O autor também recomendou para trabalhos futuros, a realização de testes efetivos a fim de avaliar a eficiência, operação e durabilidade do sistema.

2.3.4 Eficiência de uma fornalha

A eficiência de uma fornalha é obtida pela determinação das características de construção da mesma e suas características térmicas de operação. Antes do cálculo, as condições ótimas de operação devem ser especificadas, criando um modelo, onde o balanço térmico da fornalha é otimizado segundo esse modelo. Outra possibilidade de otimização é através de experiências anteriores em fornalhas similares.

Um terceiro método para otimização é a realização de uma série de cálculos para várias versões de operação da fornalha, com variação de alguns parâmetros, e ao final selecionar o que apresentou melhores resultados (GLINKOV, 1980).

As condições térmicas de uma fornalha dependem da produção de energia e suas temperaturas de operação. Segundo Glinkov (1980), o cálculo da eficiência de uma fornalha tem dois estágios: balanço de massa e balanço de energia.

O balanço de massa é realizado pela lei de conservação de massa e determina a massa dos produtos finais do processo de combustão. É medido em unidade de massa do combustível inicial, por unidade de tempo (fornalhas em regime contínuo), ou considerando todo o ciclo de operação (fornalha em regime periódico).

O balanço de energia é baseado na lei de conservação de energia e determina o consumo de energia por todo o processo de combustão e por seus estágios individuais.

2.3.5 Material das fornalhas

Um ponto importante na construção de uma fornalha é a escolha da matéria-prima adequada. Fornalhas podem ser construídas de metal, materiais não metálicos resistentes ao calor, chamados refratários, e também de concreto.

Os fatores que afetam a resistência e a durabilidade das fornalhas são: altas

temperaturas; variações na temperatura; efeito químico dos óxidos, compostos sulfúricos e resíduos de metal; oxigênio ou outros vapores de gases a altas temperaturas; explosões; danos mecânicos causados pelo movimento dos sólidos; vapor e água; carregamento excessivo em telhados e em pavimentos; e vibrações.

Essas causas individuais produzem uma variedade de efeitos em câmaras de combustão.

Metais são usados em fornalha para resistores elétricos, feixes, rolos, trilhos, correntes, silenciadores, *jackets* (cobertura para tubulação de água quente para reduzir a perda de calor), e portas. Ferro e aço de carbono são os materiais metálicos mais baratos com boa resistência, e são usados sempre que possível. Não são duráveis quando expostos à alta temperatura. Primeiro porque a resistência mecânica diminui e segundo porque podem oxidar (TRINKS, 1961).

Refratário é aquele tipo de material, na maioria de características cerâmicas, que são capazes de suportar altas temperaturas sem perder suas propriedades físico-químicas (resistência e baixa condutividade térmica são as principais, seguindo de condutividade elétrica e outros) (TRINKS, 1961).

Esses materiais apresentam algumas vantagens, como auxiliar na homogeneização da mistura ar/combustível, dependendo do seu formato; aumentar a eficiência da queima, graças a sua característica de irradiar o calor absorvido; e evitar o desgaste prematuro das suas paredes.

Os tijolos refratários são capazes de suportar altas temperaturas e também esforços mecânicos, ataques químicos e variações bruscas de temperaturas.

O concreto refratário tem múltiplas aplicações entre as quais se destacam: construções monolíticas, moldagem de peças especiais no próprio local de uso, moldagem em formas de madeira, revestimento de portas de fornalhas, peças entre tubos de caldeiras, arcos, bocas de maçarico e etc. O seu emprego é recomendado para temperatura máxima de utilização, até 1.400 °C.

A argamassa refratária é um produto não-conformado, adequado para assentar, unir ou proteger tijolos refratários conformados. Possui uma consistência fina, cremosa, homogênea e livre de granulações. É de fácil maleabilidade, com a possibilidade de

utilização após 48 horas do assentamento. O seu emprego é recomendado para temperatura máxima de utilização, até 1500 °C.

O isolamento térmico de fornalhas é uma questão essencial. O isolamento em torno do fogo mantêm-no quente, que ajuda reduzir o fumo e emissões prejudiciais.

São vários os materiais para isolamento térmico de fornalhas. Cada um destes materiais incorpora a argila, que age como uma pasta. A argila dá forma a uma matriz em torno de um enchimento, que fornece o isolamento. A argila e o enchimento são misturados com uma quantidade predeterminada de água, que forma uma manta, para cobrir a fornalha (BRYDEN, 2002).

Os principais isolantes térmicos utilizados são: lã de rocha, lã de vidro, vermiculita e manta de fibra cerâmica. Cada um possui densidades específicas de acordo com a temperatura com a qual se deseja trabalhar.

2.3.6 Tiragem

Tiragem é a diferença entre a pressão absoluta do gás em qualquer ponto da passagem dos gases (fornalha, chaminé, aquecedor) e a pressão atmosférica (no mesmo nível). A tiragem é positiva se $P_{atm} < P_{gás}$, e negativa se $P_{atm} > P_{gás}$. A unidade de medida é polegadas da coluna ou milímetros da coluna de água, medidas por um tubo em U ou manômetro indicado. Denominam-se perdas por tiragem as perdas de pressão pela fricção entre dois pontos. E a diferença de pressão entre dois pontos da trajetória do fluxo de gás (soma algébrica das perdas por tiragem e efeito chaminé) é a tiragem diferencial (PERAGALLO TORREIRA, 1995).

A tiragem apropriada é a diferença de pressão suficiente para mover o volume de ar dos gases do ponto de origem para seu ponto de descarga (CRAIG, 1996).

A tiragem pode ser natural ou mecânica. A segunda ainda pode ser classificada em tiragem forçada e induzida

a) Tiragem Natural

A tiragem natural é produzida mediante a chaminé, sendo causada pela diferença de peso específico dos gases quentes da combustão e a do ar atmosférico

que entra no forno. A tiragem varia com as condições climáticas, sendo menor quando a temperatura externa é elevada. Os tipos mais comuns de chaminés são construídos em: tijolos, aço e concreto (PERGALLO TORREIRA, 1995).

A tiragem de uma chaminé é usada para extrair ar da câmara de combustão da fornalha, após parte do calor de combustão ter sido utilizado, e conduzir o gás de combustão resultante para o ambiente (VERHAART, 1990).

Na tiragem natural, a câmara de combustão sempre opera em depressão, garantindo-se suprimento adequado de ar e remoção dos gases, unicamente por aspiração da chaminé (BAZZO, 1995).

Os gases internos da chaminé são mais quentes e menos densos que o ar em volta dela. Estes ascendem através da chaminé, uma corrente de convecção natural é formada, criando um gradiente de pressão através da chaminé, dos dutos e da fornalha. Esse gradiente de pressão faz com que os gases de combustão sejam succionados pela chaminé e o ar da combustão extraído da fornalha (SIEMENS ENERGY, 2005).

A altura da chaminé é quase sempre maior do que a requerida, devido à necessidade da diluição dos gases nocivos ao ambiente. Na prática, o principal requerimento para a altura da chaminé é a diluição dos gases nocivos (CRAIG, 1996). A construção de grandes chaminés é uma solução parcial, não elimina o problema, mas minimiza os prejuízos ecológicos, preservando a saúde e o conforto das comunidades vizinhas.

A figura 14 apresenta um esquema da tiragem natural.

b) Tiragem Mecânica

De forma a reduzir a altura necessária da chaminé e ao mesmo tempo obter uma tiragem independente das condições climáticas, bem como realizar um controle fácil e efetivo, são usados ventiladores e exaustores, e o controle é acompanhado pela regulação da velocidade dos mesmos ou com um *damper*. Existe a tiragem forçada e a induzida.

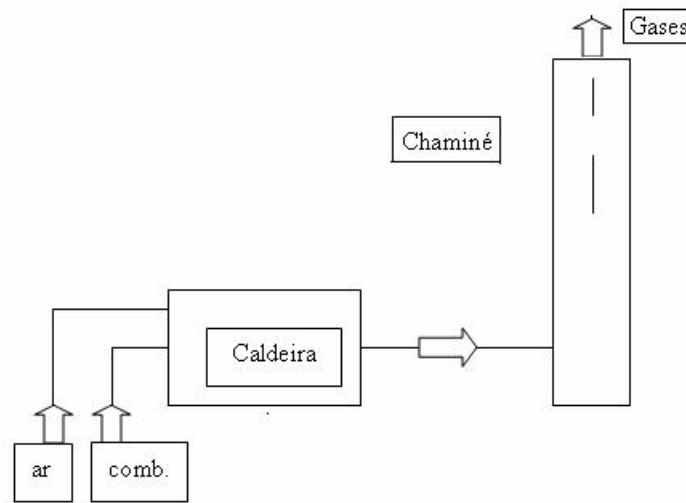


FIGURA 14 – TIRAGEM NATURAL
 FONTE: BAZZO (1995)

As unidades adaptadas com tiragem forçada operam com um ou mais ventiladores, gerando pressões positivas no interior da câmara de combustão, de modo a superar as perdas de carga e forçar os gases a se deslocar no sentido da chaminé (BAZZO, 1995). Uma fornalha com tiragem forçada opera acima da pressão atmosférica (SIEMENS ENERGY, 2005). Um esquema da tiragem forçada é apresentado na figura 15.

Os ventiladores reduzem a altura necessária de chaminé para produzir uma tiragem adequada (PERAGALLO TORREIRA, 1995). São dimensionados com base na vazão e nas perdas de carga. Os ventiladores, devem operar ininterruptamente, por longos períodos e de acordo com as características fluidodinâmicas do circuito de ar ou gases (perda de carga e vazão) (BAZZO, 1995).

Na tiragem induzida, ar sob pressão é forçado a circular seja através da camada de combustível existente sobre os carregadores ou grelhas, sendo os gases retirados da fornalha através da chaminé ou por ventiladores de tiragem induzida (exaustores) (PERAGALLO TORREIRA, 1995). É operada abaixo da pressão atmosférica (SIEMENS ENERGY, 2005).

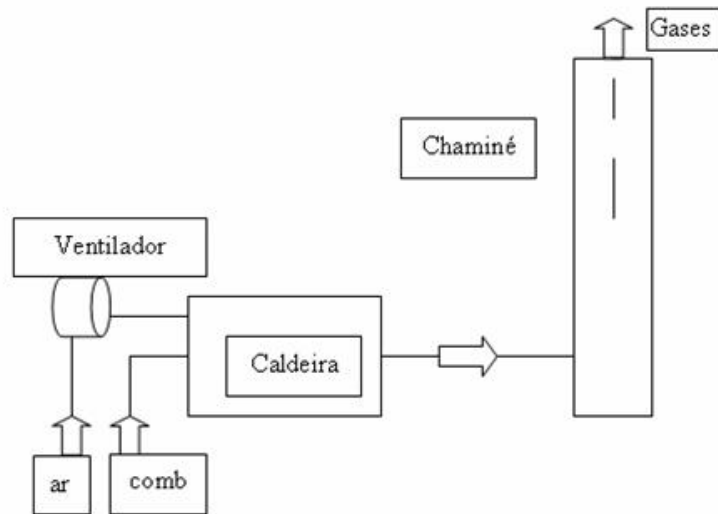


FIGURA 15 – TIRAGEM FORÇADA
 FONTE: BAZZO (1995)

Existem ainda as unidades adaptadas com sistemas de tiragem balanceada, as quais dispõem de um ou mais ventiladores e de um ou mais exaustores, estes também localizados junto à base da chaminé, como mostra a figura 16.

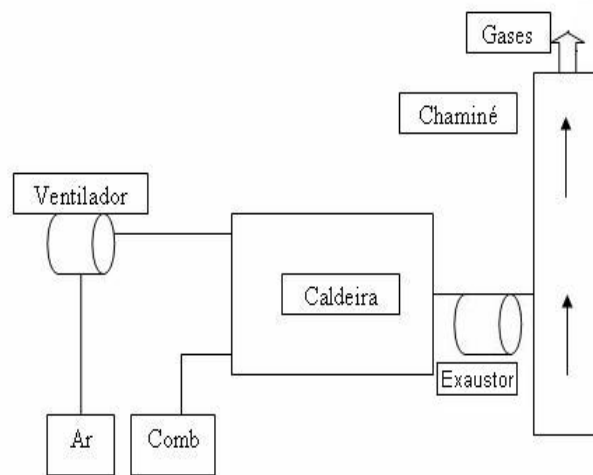


FIGURA 16 - TIRAGEM BALANCEADA
 FONTE: Adaptado de BAZZO (1995)

Em sistemas de tiragem balanceada, as tiragens forçada e induzida trabalham juntas, para mover o ar de combustão e os gases através da fornalha. O ventilador da tiragem forçada é usado para regular o fluxo de ar da combustão, e o ventilador de tiragem induzida é usado para regular a pressão da fornalha. As fornalhas com tiragem balanceada são normalmente operadas abaixo da pressão atmosférica (SIEMENS ENERGY, 2005).

c) Efeitos de uma alta tiragem na combustão

Quando a alta velocidade dos gases de combustão é devido a uma alta tiragem, a chama fica longa e mais forte, e a taxa de liberação de calor diminui. A raiz da chama vai abandonar a garganta do queimador e se tornar instável devido ao baixo calor específico da chama.

A altas velocidades de combustão, a mistura ar combustível fica “compactada” no final da fornalha e pode queimar a parede da câmara de combustão.

Quando a chama é longa e forte, o ar que não é imediatamente requerido para a combustão tende a esfriar, interferindo nas reações de combustão (CRAIG, 1996)

Sob essas mesmas condições, a turbulência, relacionada com a mistura entre ar e combustível, ocorre mais perto da garganta do queimador e reduz a densidade da chama (CRAIG, 1996).

d) Tipos de controles de tiragem

- Coifas

São pequenos queimadores atmosféricos sem suprimento de ar forçado. Não podem ser usados para controlar o consumo de combustível porque permitem o gás fluir fora de sua entrada de ar durante a inversão da temperatura em taxas de consumo de combustível abaixo do máximo. São mais mitigadores de tiragem do que controladores de tiragem (CRAIG, 1996).

- *Dampers*

São dispositivos, geralmente com o aspecto de portinholas, que servem para

controlar a tiragem. Os *dampers* normalmente são localizados no topo da chaminé, pois este local os protege contra destruição por gases quentes ou chamas. Entretanto, a oxidação das juntas e as mudanças de temperatura fazem o controle automático próximo da pressão da fornalha impossível. Por essa razão, as fornalhas são equipadas agora com *dampers* de conduto, os chamados *flue dampers*.

Um *flue damper* é uma placa cujos lados de baixo e de cima atravessam o fluxo horizontal. O *desing* e o material do equipamento devem ser adaptados à máxima temperatura dos gases perdidos que os *dampers* alcançam (TRINKS, 1961).

Se a temperatura dos gases não exceder 700 °C, é utilizado o *ribbed damper*, que é feito de ferro. Para temperaturas maiores que 870 °C, as carcaças de liga de aço são preferidas (TRINKS, 1961).

Dampers com ar refrigerado foram testados. Porém, a radiação proveniente dos gases e da alvenaria são tão intensos que a refrigeração do ar não protege o *damper*, a menos que este seja coberto com algum material isolante.

Para temperaturas até 1430 °C, são utilizados *dampers* com superfície de água refrigerada, onde a refrigeração de água é moderada. Fornalhas com descargas de gases à temperaturas que excedem 1400 °C são equipadas com *dampers* totalmente de água refrigerada (TRINKS, 1961).

Os *dampers* barométricos são próprios para os casos em que a pressão diferencial entre o ar e o gás excede o peso da lâmina do *damper*. Funcionam reduzindo a temperatura da chaminé devido à mistura do ar frio com o gás quente. Em muitas ocasiões, uma grande quantidade de ar precisa ser suprido através de um *damper* barométrico assim como é necessário reduzir a temperatura do gás da chaminé o suficiente para garantir o controle da tiragem da fornalha. Em fornalhas com chaminés de altura de aproximadamente 15 metros ou caldeiras onde o vapor é usado para resfriamento, o uso de *dampers* barométricos não é indicado. A necessidade de manter a pressão do ar próximo a da atmosfera requer aberturas muito grandes do ar da entrada da câmara da fornalha para satisfazer condições de temperaturas ambientais elevadas do ar da carga elevada (CRAIG, 1996).

Após a revisão da literatura sobre fornalhas, será apresentada a seguir uma

breve discussão sobre a secagem de grãos, seus aspectos fundamentais e sobre a qualidade do ar de secagem, visto que o objeto de estudo deste trabalho destina-se a fornecer ar quente para a secagem de grãos.

2.4 SECAGEM DE GRÃOS

A produção de grãos tem sofrido, nos últimos anos, grandes pressões por aumento de produtividade. Em função destas pressões, as práticas culturais, de manuseio e de armazenagem estão em acelerado processo de evolução.

Dentre todos os processos que se aplicam para o trato pós-colheita, conservação e armazenagem adequada de grãos, a secagem é o de maior consumo energético. Água deve ser evaporada para que os grãos reduzam sua umidade a níveis que possibilitem armazenamento seguro; e a termodinâmica nos dá muito pouca margem de manobra no que se refere a quanta energia temos que aplicar para que esta água se evapore.

O estado da técnica conhece uma série de maneiras de secagem que podem ser aplicadas para secar diferentes produtos. As de aplicação prática sempre utilizam o ar como meio secante, ainda que existam outras formas de proceder a secagem. O ar é usado, na maior parte dos sistemas de secagem, como elemento que entrega calor aos grãos ao mesmo tempo em que extrai a umidade. Assim sendo, as diferentes estratégias diferem apenas na forma como o ar e a energia transitam pelo sistema de secagem (GROFF, 2002).

2.4.1 Qualidade do ar de secagem

Grãos e sementes são produtos higroscópicos, portanto podem passar ou receber vapor de água do ar que os circunvizinham. Por outro lado, esse ar que os circunvizinham também possui sua umidade relativa, relacionada à quantidade de vapor diluída no ar. Para reduzir a umidade relativa do ar de secagem é recomendável aquece-lo. Isto pode acontecer naturalmente, por meio da radiação solar, ou artificialmente, utilizando fornalhas a lenha ou queimadores a gás. Assim o ar de secagem tem seu potencial de secagem aumentado, o que traduz em maior capacidade

de: transferir calor ao produto, e transportar o vapor proveniente do produto (SILVA, 2005).

A escolha do combustível ou fonte térmica é importante. Deve-se levar em conta disponibilidade e custo e qualidade do ar de secagem produzido. Cada região e cada aplicação têm a fonte mais adequada, não existindo, portanto, uma fonte de calor ideal.

Na maioria dos casos, a combustão de biomassa ainda é a opção mais conveniente. Nestes casos, um cuidado a ser tomado é quanto à capacidade de combustão das fornalhas. De maneira geral, a biomassa (madeira, cascas e resíduos) tem queima difícil e requer altas temperaturas e câmaras de combustão amplas para que possam queimar de forma completa, evitando a geração de gases combustíveis e poluentes, além da quantidade de calor necessária para o bom funcionamento dos secadores. Além disto, as fornalhas de biomassa não devem produzir fagulhas, que são as potenciais causadoras de incêndio (GROFF, 2006).

A lenha libera, durante o processo de combustão em fornalhas convencionais (fluxo contra-corrente), uma quantidade muito grande de produtos químicos, alguns de periculosidade comprovada. Esses produtos, entre os quais estão os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), indicadores da presença de hidrocarbonetos pesados (C_xH_y), são potenciais contaminantes dos grãos. Além disso, os HPAs são famílias de produtos com características mutagênicas e carcinogênicas comprovadas.

Dimensionamentos incorretos, associados a uma inadequada operação, principalmente com uso de lenha verde ou úmida, ou a falta de regularidade no abastecimento da câmara de combustão, resultam em excesso de velocidade do ar na fornalha e combustão incompleta. Esses fatores cem acompanhados por altas contaminações de grãos (MARTINS *et al.*, 2002)

O ar produzido por uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente, seria ideal para fornecimento direto para o secador de grãos. O baixo índice de CO, material particulados e HPAs proporcionariam uma melhor qualidade dos grãos, visto que esse último componente é o principal responsável pela contaminação dos mesmos. Ainda há o fato de que com fornalha de fluxo co-corrente, a pirólise é dosada, evitando fagulhas que comprometem o desempenho do secador e podem causar incêndios.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para estudar a viabilidade da utilização de uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente para produção de ar quente e fornecimento direto para a secagem de grãos, foram necessárias algumas etapas.

Inicialmente, foi feita uma revisão bibliográfica sobre a caracterização e composição energética da biomassa, os principais processos de conversão energética, dando ênfase à combustão, e sobre a construção e funcionamento de fornalhas a lenha.

Com base em experimentos anteriores que utilizaram fornalhas de fluxo co-corrente foi construído um protótipo.

Foi realizado um planejamento experimental para estudar e comparar o efeito conjunto de combinações de determinadas variáveis na configuração da fornalha, a fim de se obter a resposta de interesse. E para a medição de todos os parâmetros necessários foi montada uma instrumentação no protótipo.

Foi calculada a eficiência e o balanço de energia da fornalha, de acordo com os dados medidos.

3.1 CONSTRUÇÃO DA FORNALHA

3.1.1 Dimensionamento

O dimensionamento da fornalha partiu da equação básica de potência. Partindo de uma potência nominal estimada de 40kW e uma taxa de combustão de 110 kg/h.m², valor utilizado para fornalha a lenha de grelha fixa (BAZZO, 1995), foram calculadas a vazão mássica de lenha e a área de grelha. As equações encontram-se no apêndice 01.

As dimensões da fornalha foram adaptadas do protótipo construído por Verhaart (1990), tendo como ponto de referência a área de grelha calculada. Nas figuras 17 e 18 são apresentadas as dimensões do protótipo construído.

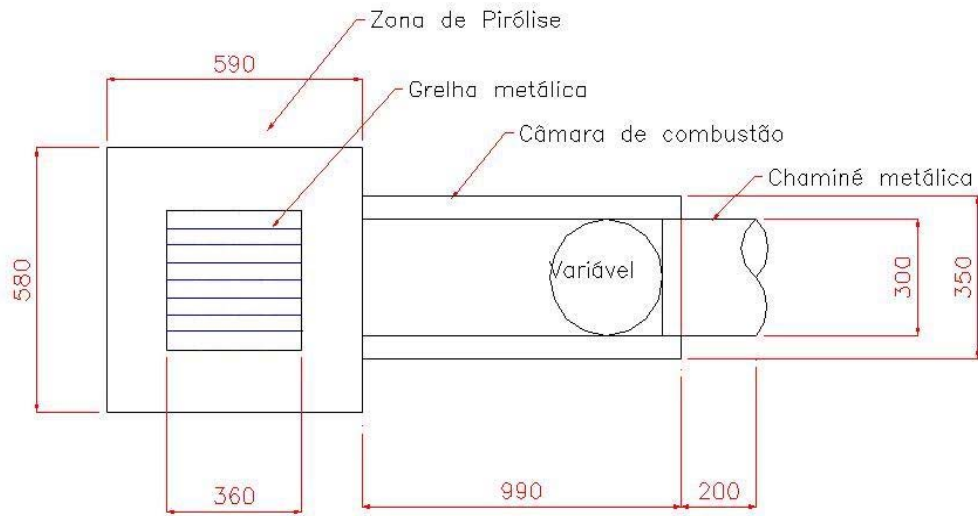


FIGURA 17 – VISÃO SUPERIOR DA FORNALHA (dimensões em mm)

FONTE: O autor (2007)

* Diâmetro da Chaminé variável

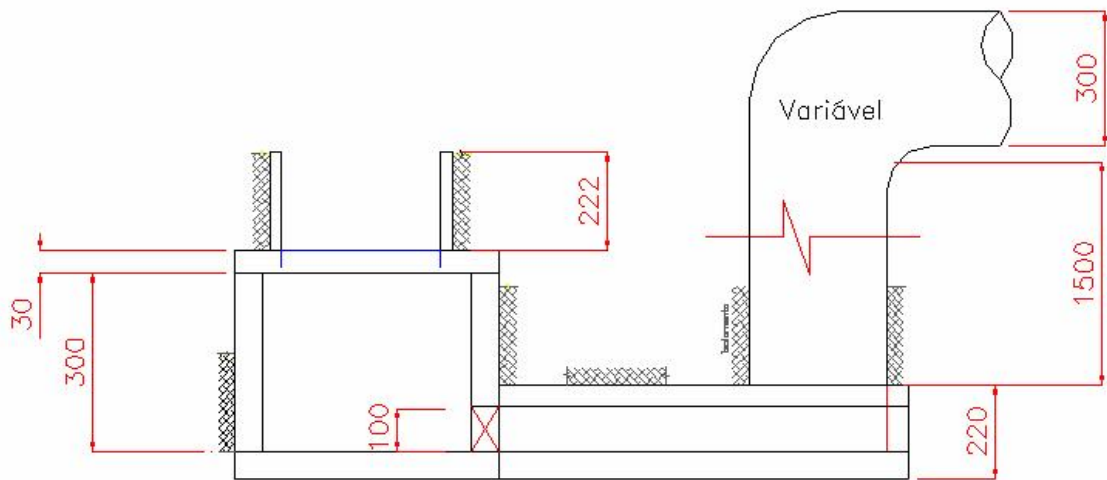


FIGURA 18 –VISÃO LATERAL DA FORNALHA (dimensões em mm)

FONTE: O autor (2007)

As figuras 19 e 20 apresentam uma visão em perspectiva e um corte longitudinal da fornalha.

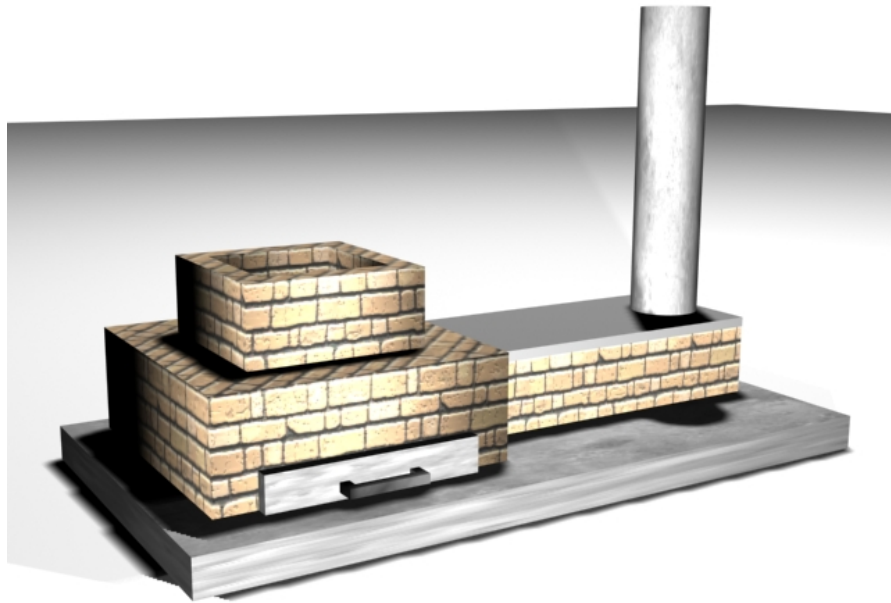


FIGURA19 – VISÃO EM PERSPECTIVA DA FORNALHA
FONTE:O autor(2008)

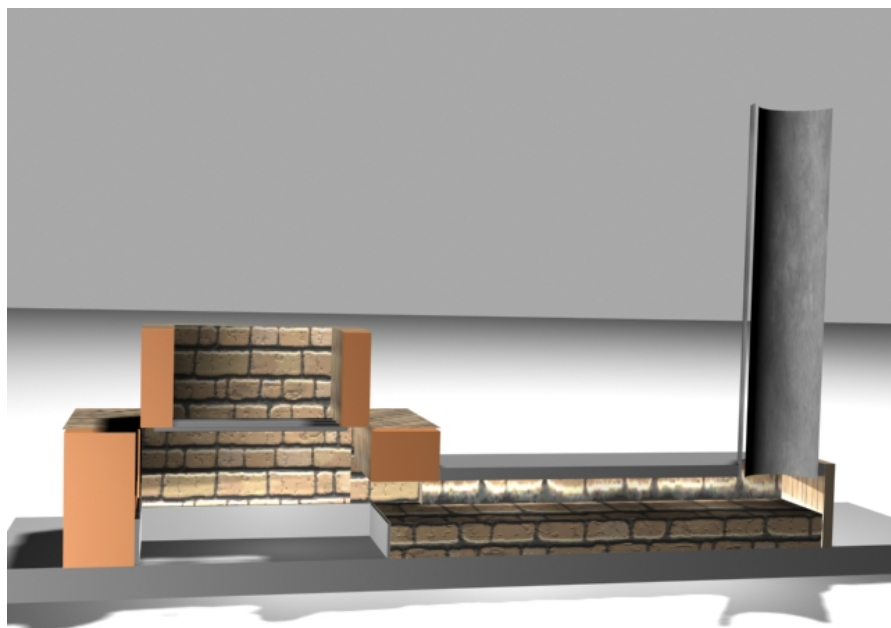


FIGURA 20 – CORTE LONGITUDINAL DA FORNALHA
FONTE: O autor(2008)

Os detalhes do dimensionamento da fornalha encontram-se no apêndice 01.

3.1.2 Material de construção

A fornalha foi construída em plaquetas e tijolos refratários e rejunte em argamassa refratária, que são materiais capazes de suportar elevadas temperaturas, sem deformar ou fundir. A tampa da câmara de combustão foi construída em cimento refratário em peça úmida.

A câmara de combustão foi revestida internamente com papel de fibra cerâmica, um isolante térmico para altas temperaturas (até 1200 °C), para minimizar a perda de calor pelas paredes da fornalha e proteger os tijolos refratários contra possíveis trincas.

Como isolamento térmico externo foi utilizado manta de fibra cerâmica, um material composto pela eletrofusão da alumina e da sílica com temperatura aproximadamente de 2000°C, suporta diversas faixas de temperaturas até 1440°C, além de um baixo coeficiente de condutividade térmica, de 0,45W/mK à 1000°C (FDT IBAR).

A manta de fibra cerâmica ainda foi revestida com chapa de alumínio corrugado, para a proteção mecânica do isolamento térmico.

Foram utilizadas duas chaminés, uma com 1m de comprimento e diâmetro 18cm para tiragem natural, e outra com 1,5m de comprimento e 30cm de diâmetro, para tiragem induzida. Ambas são de chapa 26, galvanizadas.

Na figura 21 é apresentada a fornalha construída, ainda sem o isolamento.

No anexo 01 encontram-se fotos das etapas de construção da fornalha.

As características técnicas dos materiais utilizados na construção da fornalha encontram-se no anexo 2.

Na câmara de combustão, mesmo revestida com a manta cerâmica, verificou-se que a manta ficava muito quente durante os experimentos, o que significa uma grande perda térmica. Por este motivo a câmara de combustão foi revestida com mais uma camada de manta cerâmica.

Devido às altas temperaturas alcançadas durante os experimentos, algumas partes da fornalha trincaram, e por isso ela teve que ser reforçada em determinadas partes com mais uma camada de plaqueta refratária.

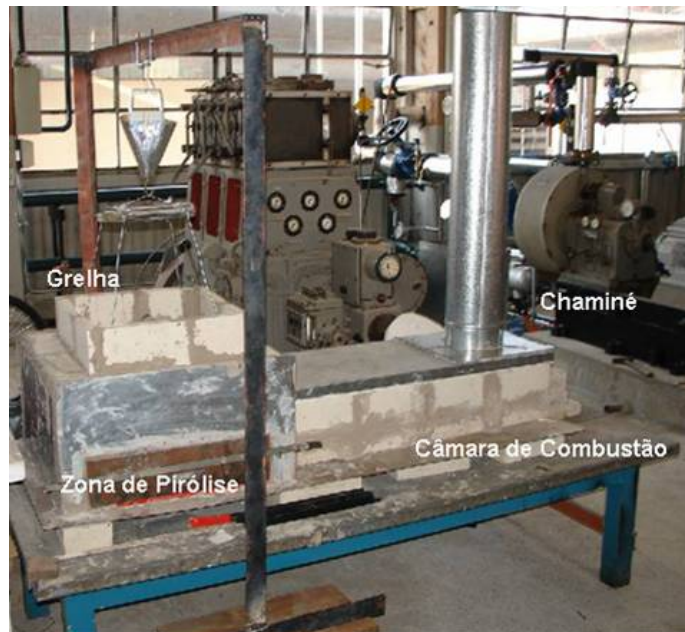


FIGURA 21 – FOTO DA FORNALHA CONSTRUÍDA
 FONTE: O autor (2008)

3.2 COMBUSTÍVEL

O combustível utilizado na fornalha foi lenha de Eucalipto. E devido à quantidade de S e N presentes no combustível não chegar a 0,5% de sua composição, esses elementos não foram considerados.

Para lenha de eucalipto, adotou-se a composição média, em base seca, segundo Sulitato (1985, *apud* MARTINS 1989 e BORGES 1994), apresentada na tabela 04.

TABELA 04 – COMPOSIÇÃO DA LENHA

Elemento	Quantidade (%)
C	52
O	41
H	6
Cinzas	1

FONTE: SULITATO⁷ (1989, *apud* MARTINS 1989 e BORGES 1994)

⁷ SULITATO, W.F. **Danger Signals to Human Health** – Design to Cooking: Some Studies on Cookstoves. C.E.Krist-Spit and D.J van der Heeden (eds.) WSG, Eindhoven University of Tec. The Netherlands.

3.2.1 Umidade

A umidade da lenha foi determinada em estufa a $\pm 103\text{ }^{\circ}\text{C}$. O procedimento da determinação da umidade encontra-se no apêndice 2.

3.2.2 Granulometria da lenha

Foram utilizados pedaços de lenha de aspecto retangular, de $12 \pm 1,2\text{ cm}$ de comprimento em média e de espessura $2 \pm 0,2\text{ cm}$. A figura 22 apresenta 5 amostras aleatórias dos pedaços de lenha utilizados para alimentação da fornalha.

A relação média entre o volume e área da superfície externa da lenha utilizada é um parâmetro que exerce influência sobre a qualidade da combustão limpa (KHAN & VERHAART, 1989 apud BORGES, 1994). No presente trabalho a relação V/A da lenha utilizada foi em média $0,8 \pm 0,06$.



FIGURA 22 – GRANULOMETRIA DA LENHA UTILIZADA
FONTE: O autor (2008)

3.2.3 Cinzas

Como apresentado na tabela 04, na composição adotada para a lenha de eucalipto, as cinzas representam 1%.

O teor de cinzas influencia no PCS, e conseqüentemente no PCI. O valor utilizado para cálculos foi 1%, para fechar o balanço da composição do combustível.

Em todas as corridas as cinzas foram pesadas e comparadas com o total de lenha utilizada na corrida, e os valores variaram de 0,85 a 1,13%, ou seja, aproximados do valor utilizado.

3.3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O planejamento de experimentos é uma metodologia usada com o objetivo de descobrir alguma propriedade particular a um fenômeno ou para comparar o efeito de diversas condições no fenômeno. No planejamento experimental, busca-se a otimização do número de ensaios a ser realizado (e.g. BOX *et al.*, 1978).

No planejamento de qualquer experimento, o primeiro passo é decidir quais são os fatores e as respostas de interesse. Os fatores, em geral, são as variáveis que o experimentador tem condições de controlar. Podem ser qualitativos ou quantitativos (e.g. BARROS NETO *et al.*, 2002).

Uma das técnicas mais conhecidas é o experimento fatorial, no qual estão envolvidos k fatores (ou variáveis) cada um deles presente em diferentes níveis. Assim, na existência de k fatores, cada um com e níveis tem-se e^k corridas válidas a serem realizadas.

O planejamento fatorial é indicado quando se deseja estudar os efeitos de duas ou mais variáveis de influência, pois o número de corridas é alto quando se têm muitos fatores. Em cada tentativa ou réplica, todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável, e^k , são investigadas. Quando o efeito de um fator depende do nível de outro fator, diz-se que há interação entre estes fatores. No caso do presente trabalho, há interação entre todos os fatores, pois a eficiência, que é a resposta de interesse, será afetada de acordo com o nível dos 3 fatores.

Os níveis ($e=3$) e fatores ($k=3$) do planejamento experimental no presente trabalho são apresentados na tabela 05. Partindo da área de grelha calculada no dimensionamento da fornalha, foram escolhidas duas variações de áreas de grelha, de acordo com as possibilidades de construção. As variações da carga de lenha foram escolhidas partindo da carga mais rica, determinada pelas corridas preliminares.

TABELA 05– DADOS DO PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

Níveis (e)	-1	0	1
Área de Grelha	0,05m ²	0,08 m ²	0,13 m ²
Carga de Lenha	500g / 4min	400g / 3min	300g / 2min
Tiragem	Natural		Induzida

FONTE: O autor (2008)

A figura 23 apresenta as áreas de grelha utilizadas nas corridas experimentais



FIGURA 23 – VARIAÇÃO DE ÁREA DE GRELHA UTILIZADA NAS CORRIDAS EXPERIMENTAIS

FONTE: O autor (2008)

a) 0,13 m², b) 0,08 m² e c) 0,05 m²

Nas corridas com tiragem natural foi utilizada uma chaminé de 1 m de altura e 18 cm de diâmetro. E nas corridas com tiragem induzida foi utilizada uma chaminé de 1,5m de altura e 30 cm de diâmetro, integrada ao sistema de exaustão com sucção de 3mmH₂O, medida durante uma corrida experimental pelo analisador de gases.

As chaminés são apresentadas nas figuras 24 e 25.

3.3.1 Variáveis de controle

As variáveis de controle são as variáveis fixas, aquelas que o pesquisador tem condições de controlar. As variáveis de controle utilizadas nesta dissertação são as que apresentam a configuração **1** da tabela 05. As configurações **0** e **-1** são as modificações

das variáveis de controle utilizadas a fim de se obter as respostas de interesse e descobrir como essas respostas dependem das respectivas variáveis.



FIGURA 24 – CHAMINÉ DE TIRAGEM NATURAL
FONTE: O autor (2008)



FIGURA 25 – CHAMINÉ DE TIRAGEM INDUZIDA
FONTE: O autor (2008)

3.3.2 Variáveis de Monitoramento

As variáveis de monitoramento são as variáveis de saída do sistema cujas respostas interessam ao pesquisador. São assim chamadas por estarem em constante monitoramento durante o experimento.

Nesta dissertação as variáveis de monitoramento utilizadas são apresentadas na tabela 06.

TABELA 06– VARIÁVEIS DE MONITORAMENTO

Variável	Resposta	Justificativa
Chama invertida	Fluxo co-corrente	Ao conseguir inverter a chama, o fluxo co-corrente foi obtido.
Carvão na grelha	Pirólise	O desaparecimento gradual do carvão na grelha, é um indicador de boa pirólise.
Temperatura	Reações de combustão	As reações de combustão só se completam à altas temperaturas, principalmente em relação ao CO, que só queima após 650 °C.
Concentração de CO	Grau de combustão	Quanto menor a concentração de CO nos gases de combustão na saída da chaminé, mais completa é a combustão
	Cor da Chama	A cor da chama dá informação sobre a combustão. Para a biomassa, quanto mais próximo do amarelo claro for a chama, mais completa é a combustão.
Rendimento	Temperatura	A temperatura na base e no topo da chaminé é um dos indicadores de um bom rendimento da combustão, possível de ser monitorada durante as corridas experimentais.

FONTE: O autor (2008)

3.3.3 Resposta de interesse

A resposta de interesse neste trabalho é a eficiência térmica. É a variável com que se podem comparar os resultados e alcançar o objetivo do planejamento de experimentos. No presente caso, o objetivo é criar correlação entre as variáveis estudadas e a eficiência da fornalha, para futuramente, dimensionar fornalhas de fluxo co-corrente em escala industrial.

3.3.4 Matriz de Planejamento

Para a organização dos experimentos é preparada uma matriz de planejamento, onde são listadas todas as combinações realizadas entre as variáveis, juntamente com a resposta de interesse.

A tabela 07 apresenta a matriz de planejamento do presente trabalho.

TABELA 07 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO

TABELA 07 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO				
Variáveis		-1	0	1
Área de Grelha (m ²)		0,05	0,08	0,13
Alimentação		500 g / 4min	400 g / 3min	300 g / 2min
Tiragem		Natural		Induzida
Corridas	Área de Grelha	Alimentação	Tiragem	Resposta de Interesse - η (%)
1	1	-1	-1	
2	1	0	-1	
3	1	1	-1	
4	0	-1	-1	
5	0	1	-1	
6	0	0	-1	
7	-1	1	-1	
8	-1	0	-1	
9	-1	-1	-1	
10	-1	1	1	
11	-1	0	1	
12	-1	-1	1	
13	0	-1	1	
14	0	0	1	
15	0	1	1	
16	1	-1	1	
17	1	0	1	
18	1	1	1	

3.3.5 Erros e Incertezas

Em todos os trabalhos experimentais, os resultados obtidos estão sujeitos a erros, que podem ou não influenciar no resultado final. Esses erros podem ser divididos em duas categorias: sistemáticos ou estatísticos.

Os erros sistemáticos são os que afetam o resultado sempre na mesma direção,

seja para mais, seja para menos (BARROS NETO *et al.*, 2002). Estão relacionados à equipamentos incorretamente ajustados e/ou calibrados, ao uso do procedimento incorreto pelo experimentador ou a uma falha conceitual (HELENE, 1981).

Os erros estatísticos são aqueles causados por variações incontrolláveis e aleatórias dos instrumentos de medidas e de condições externas (HELENE, 1981).

Uma vez eliminados (ou reduzidos ao mínimo) os erros sistemáticos, restam os erros estatísticos, que devem sempre ser apresentados nos resultados. Aos desvios evidenciados pela dispersão dos resultados chama-se incerteza da medida, e ao desvio do valor real, quando conhecido, chama-se erro.

a) Medidas Diretas

São aquelas cujo resultado é obtido diretamente pela leitura do painel de um instrumento de medida. Numa medição direta, o valor mais próximo de uma grandeza é a média aritmética das várias medições efetuadas, como mostrado na equação 10.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (10)$$

Onde n representa o número de medições. As várias medições distribuem-se em torno do valor médio. Cada valor possui um desvio absoluto $\Delta x = x_i - \bar{x}$. Assim pode-se definir o desvio relativo, dividindo o desvio absoluto pelo desvio médio (equação 11).

$$\Delta_r x = \frac{x_i - \bar{x}}{\bar{x}} \quad (11)$$

A incerteza é calculada a partir do desvio médio, dado pela média aritmética do valor absoluto dos diversos desvios (equação 12).

$$\Delta x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |\Delta x_i| \quad (12)$$

O valor final deverá ser apresentado na forma $\bar{x} \pm \Delta x$.

É importante ressaltar que se o erro associado ao instrumento de medição for superior aos desvios, a incerteza absoluta deverá ser esse valor.

Para um número de medições elevado, os resultados distribuem-se em torno do valor médio segundo uma curva em forma de sino, denominada *curva de Gauss*, gaussiana ou distribuição normal (Figura 26). Quanto mais larga for essa curva, mais dispersos serão os resultados e menor será a precisão. Ao contrário, se a curva for estreita, a maioria dos resultados fica próxima do valor médio, indicando uma grande precisão.

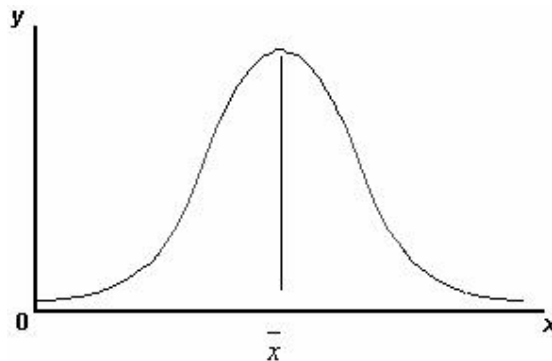


FIGURA 26 – CURVA DE GAUSS
FONTE: HELENE (1981)

A grandeza que indica a forma da curva de Gauss é o desvio padrão σ , definindo como a raiz quadrada da variância (média quadrada dos desvios) (equação 13).

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (13)$$

b) Medidas Indiretas

No caso de uma grandeza depender de outras grandezas cada uma com sua incerteza, o cálculo da incerteza final é diferente,

Considerando uma grandeza X , que é função de n outras grandezas, $X = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. O desvio máximo de X é dado pela equação (14).

$$\Delta X = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial X}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (14)$$

É necessário tomar o valor absoluto das derivadas parciais. Caso contrário, quando estas forem negativas, um desvio elevado reduziria o erro no resultado final. Esta expressão dá o valor máximo da incerteza absoluta da grandeza X . É a expressão

indicada quando dispomos de um número muito reduzido de medições ($n < 10$).

Contudo, quando este número é maior ($n > 10$), utiliza-se a equação (15) abaixo para o cálculo da incerteza mais provável (HELENE, 1981).

$$\Delta X = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial X}{\partial x_i} \right)^2 (\Delta x_i)^2} \quad (15)$$

3.4 INSTRUMENTAÇÃO

3.4.1 Pesagem da Lenha

A pesagem da lenha foi feita com uma balança tipo gancho, da marca KERN , modelo CH15K20. Com faixa de medição até 15 kg e divisão de 20g, com erro de 10g.

Foi construído um aparato de metal para pendurar a balança, e assim medir o consumo contínuo de lenha (Figura 27).

O certificado de calibração da balança é apresentado no apêndice 03.

Ocorreram problemas com o aparato construído para a balança. Apesar de ter sido montada uma proteção com lã de rocha, o calor irradiado pela chama na grelha foi muito alto, e a balança esquentava demais, interferindo na medição. Então se optou por trabalhar com cargas de lenha previamente pesadas com ritmos de alimentação pré-estabelecidos.

3.4.2 Medição da Temperatura

É necessário o monitoramento da temperatura em pontos determinados da fornalha para verificar o desempenho de cada etapa da combustão e ao final poder calcular a variação de energia interna da fornalha.

A temperatura da fornalha foi medida através de termopares tipo K (até 1260 °C) e S (até 1600°C). A figura 28 mostra a localização dos termopares na fornalha. A figura 29 apresenta os termopares utilizados na instrumentação.

Na tabela 08 encontra-se a especificação e justificativa da localização dos termopares.



FIGURA 27 – APARATO PARA A BALANÇA

Nas primeiras corridas, observou-se que a chama proveniente da zona de pirólise interferia na medição do termopar nº 2, e por isso foi colocada uma proteção de tijolo refratário na frente da ponta do termopar, onde fica localizada a sonda (Figura 30).

A aquisição dos dados de temperatura foi feita pelo sistema de controle Compact Fiel Point (cFP) da National Instruments (Figura 31), com o software LABVIEW (Figura 32).

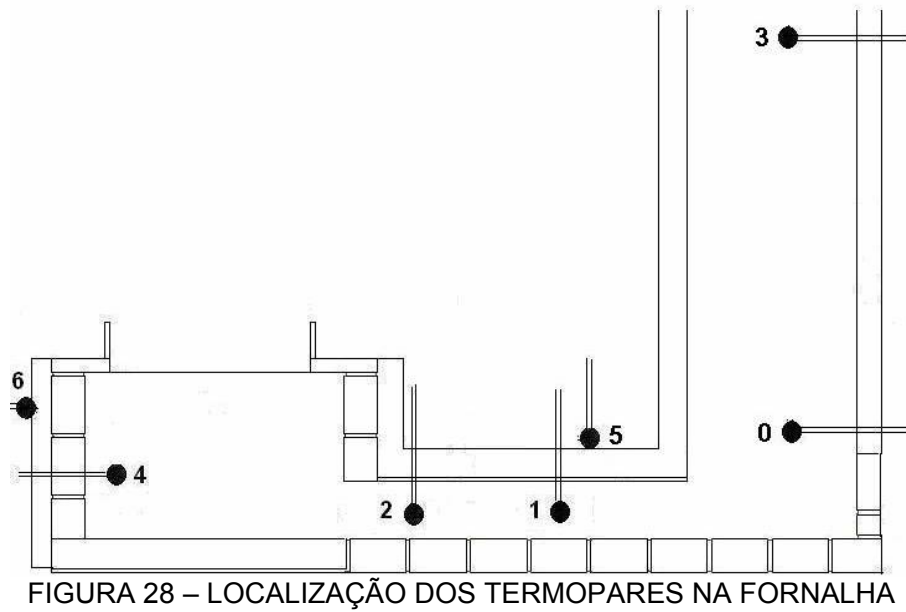


FIGURA 28 – LOCALIZAÇÃO DOS TERMOPARES NA FORNALHA



(a) tipo K



(b) Tipo K



(c) Tipo S

FIGURA 29 – TERMOPARES UTILIZADOS NA INSTRUMENTAÇÃO



FIGURA 30 – INTERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO

TABELA 08 – ESPECIFICAÇÃO E JUSTIFICATIVA DOS TERMOPARES

Canal do Termopar	Tipo	Localização	Justificativa	Erro
0	K	Base da chaminé	Temperatura dos produtos finais da combustão	$\pm 2,2$ °C
1	S	Meio da Câmara de combustão	Temperatura média das reações de combustão	$\pm 1,5$ °C
2	S	Início da Câmara de combustão	Temperatura do início das reações de combustão	$\pm 1,5$ °C
3	K	Topo da Chaminé	Temperatura do ar que entrará no secador	$\pm 2,2$ °C
4	K	Zona de pirólise	Temperatura da pirólise da lenha	$\pm 2,2$ °C
5	K	Câmara de combustão	Temperatura de pele da câmara de combustão	$\pm 2,2$ °C
6	K	Zona de Pirólise	Temperatura de pele da zona de pirólise	$\pm 2,2$ °C

FONTE: O autor (2008)

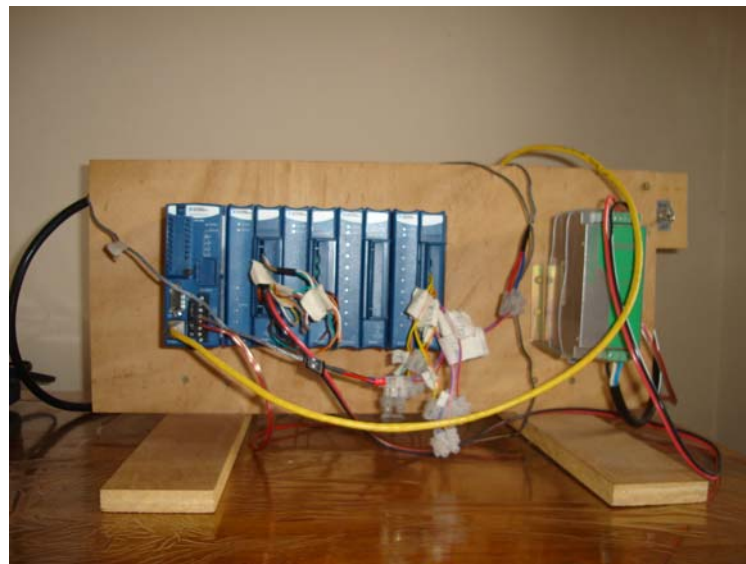


FIGURA 31 – SISTEMA DE CONTROLE COMPACT FIELD POINT DA N.I (CFP)

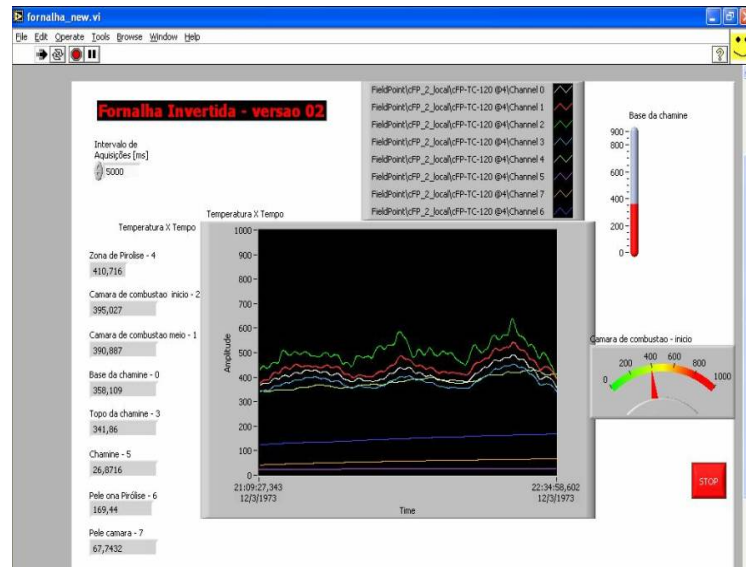


FIGURA 32 – VISÃO DO ARQUIVO.VI DO SOFTWARE LABVIEW UTILIZADO PARA AQUISIÇÃO DOS DADOS DE TEMPERATURA

3.4.3 Análise dos gases

Para a análise dos gases emitidos foi utilizado um analisador de gases do modelo TEC-GA 12, marca MADUR.

Na figura 33 é mostrado o analisador de gases utilizado no presente trabalho.

A sonda do analisador foi posicionada no topo da chaminé (Figura 34). Na chaminé maior, com tiragem induzida, a sonda foi posicionada na mesma altura da chaminé de tiragem natural, para comparação de resultados, e por este ser o local indicado para a medição dos gases, segundo fabricante de analisadores, pois o fluxo de gases nesse ponto não interfere na medição.

As Figuras 35 e 36 apresentam a localização da sonda do analisador nas duas chaminés utilizadas no presente trabalho.

Os gases analisados são O_2 (%) e CO (ppm), pelo princípio eletroquímico. Com precisão de 0,01% e 1 ppm, respectivamente. O CO_2 é calculado com base no CO_2 máximo dado na composição do combustível e o NO_x é calculado como a soma do NO medido e as concentrações de NO_2 .



FIGURA 33 – ANALISADOR DE GASES DE COMBUSTÃO TEC-GA12

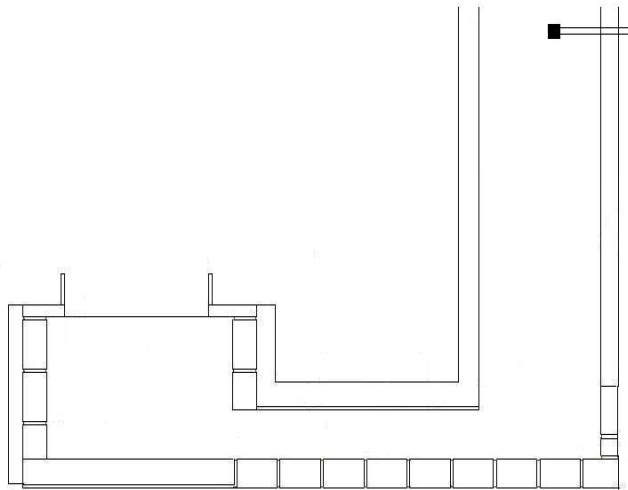


FIGURA 34 – ESQUEMA DA POSIÇÃO DA SONDA DO ANALISADOR DE GASES



FIGURA 35 – POSIÇÃO DA SONDA DO ANALISADOR DE GASES NA CHAMINÉ DE TIRAGEM NATURAL



FIGURA 36 - POSIÇÃO DA SONDA DO ANALISADOR DE GASES NA CHAMINÉ DE TIRAGEM INDUZIDA

Os sensores eletroquímicos operam reagindo com o gás a ser detectado, produzindo um sinal elétrico proporcional à concentração do gás. Um sensor eletroquímico típico consiste em um eletrodo de detecção e um eletrodo reagente

separados por uma fina camada de eletrólito.

O gás que entra em contato com o sensor, primeiramente atravessa uma pequena abertura do tipo capilar e então se difunde por uma barreira hidrofóbica e eventualmente alcança a superfície do eletrodo, a qual reage com o gás, estas reações são catalisadas pelos materiais do eletrodo desenvolvidos especificamente para o gás a ser detectado, envolvendo uma oxidação ou redução no mecanismo.

Neste processo de detecção de gás, um resistor conectado aos eletrodos gera uma corrente proporcional à taxa de concentração do gás, a corrente pode ser medida para determinar esta concentração (REGINATO, 2002).

A concentração de NO_x , expressa em ppm, é calculada com a soma das concentrações de NO e NO_2 , medidos diretamente pelo equipamento.

O fator de excesso de ar (E) é um parâmetro calculado pelo analisador. O sistema calcula o E com base no valor de $\text{CO}_{2\text{máx}}$ conhecido, dado pela composição adotada para o combustível, e a concentração medida de CO_2 na combustão dos gases, utilizando a seguinte fórmula:

$$E = \frac{20,95\%}{20,95\% - O_2\text{calc.}(\%)}$$

Onde 20,95% é a concentração de O_2 no ar ambiente, em concentração volumétrica.

Os únicos dados utilizados dos resultados do analisador de gases foram as concentrações de O_2 em %, e CO em ppm. A concentração dos demais gases assim como o fator excesso de ar foram obtidos segundo cálculos estequiométricos, apresentados no item 4.5 deste capítulo.

a) Procedimento experimental com o analisador

Foi utilizado um tempo médio de 30 segundos de amostragem, ou seja, a partir do momento que a sonda era colocada na chaminé, contava-se 1 minuto e meio para o equipamento estabilizar, e a partir daí eram gravados manualmente os relatórios, que calculavam a média das concentrações dos gases nos últimos 30 segundos. Eram feitos 3 relatórios com o ritmo de 3 em 3 minutos em média, para as medidas não ficarem contaminadas, e a sonda era retirada da chaminé, e recolocada por volta de 30

minutos depois, até atingir o regime de temperatura. Após iniciado o regime, a sonda era colocada de 15 em 15 minutos em média.

Cabe ressaltar que não era sempre possível seguir rigorosamente esses passos, devido ao procedimento operacional com a fornalha.

3.5 EFICIÊNCIA

A eficiência energética da fornalha (η), ou também chamada de eficiência da 1ª lei, que é a lei de conservação de energia aplicada a processos térmicos, foi calculada pela relação entre a energia útil ($Q_{\text{útil}}$), liberada pelos gases de combustão, durante o período em regime, e a energia nominal (Q_{nominal}), fornecida pelo combustível, conforme a equação (16). É importante ressaltar que a eficiência é média temporal. O detalhamento das equações da eficiência encontra-se no apêndice 04.

$$\eta = \frac{\dot{Q}_{\text{útil}}}{\dot{Q}_{\text{nominal}}} \quad (16)$$

A energia útil é calculada pela equação (17).

$$\dot{Q}_{\text{útil}} = \bar{m}_{\text{gás_comb}} \overline{\Delta h}_{\text{gás_comb}} \quad (17)$$

Onde,

$\bar{m}_{\text{gás_comb}}$: vazão mássica média dos gases de combustão na saída da chaminé (kg/s);

$\overline{\Delta h}_{\text{gás_comb}}$: variação de entalpia média dos gases de combustão (kJ/kg). A energia nominal é calculada pela equação (18).

$$\dot{Q}_{\text{nominal}} = \bar{m}_{\text{lenha}} PCI_{\text{lenha}} \quad (18)$$

Onde,

\bar{m}_{lenha} : vazão mássica média de lenha (kg/s);

PCI_{lenha} : Poder calorífico interior da lenha (kJ/kg), calculado pela equação (5).

3.6 BALANÇO ENERGIA

Para realizar o balanço de energia da fornalha, foi antes calculado o balanço de massa, considerando a fornalha em regime permanente e com saídas específicas.

A equação (19) apresenta o balanço de massa médio temporal.

$$\bar{m} = \sum_{entrada} \bar{m}_e - \sum_{saída} \bar{m}_s \quad (19)$$

A equação (20) é a equação estendida do balanço de massa.

$$\bar{m}_{ar} + \bar{m}_{lenha} = \bar{m}_{gás_comb} + \bar{m}_{cinzas} + \bar{m}_{carvão} \quad (20)$$

Onde:

\bar{m}_{ar} : vazão mássica média de ar primário (kg/s)

\bar{m}_{lenha} : vazão mássica média de lenha (kg/s);

$\bar{m}_{gás_comb}$: vazão mássica média dos gases de combustão na saída da chaminé (kg/s);

\bar{m}_{cinzas} : vazão mássica média de cinzas (kg/s);

$\bar{m}_{carvão}$: vazão mássica média de carvão (kg/s);

A equação (21) representa o balanço de energia médio temporal da fornalha.

$$\dot{Q} = \sum_{entrada} \dot{Q}_e - \sum_{saída} \dot{Q}_s \quad (21)$$

A equação (22) é a equação estendida do balanço de energia.

$$\dot{Q}_{ar_primário} + \dot{Q}_{lenha} = \dot{Q}_{gás_comb} + \dot{Q}_{cinzas} + \dot{Q}_{carvão} + \dot{Q}_{paredes} \quad (22)$$

Onde:

$\dot{Q}_{ar_primário}$: energia fornecida pelo ar primário (kW);

\dot{Q}_{lenha} : energia fornecida pela lenha (kW);

$\dot{Q}_{gás_comb}$: energia dos gases produtos da combustão (kW);

\dot{Q}_{cinzas} : energia contida nas cinzas (kW);

$\dot{Q}_{carvão}$: energia contida no carvão do cinzeiro (kW);

$\dot{Q}_{paredes}$: energia perdida pelas paredes da fornalha (kW).

As equações utilizadas para o cálculo de cada um desses parâmetros encontram-se no apêndice 05.

3.7 CONDIÇÕES DE CORRIDA VÁLIDA

Para uma corrida ser considerada válida, foram estabelecidas as seguintes condições:

a) Fluxo *downdraft* (para baixo)

Ao inverter a chama, significa que o fluxo *downdraft* foi obtido, ou seja, os gases e o ar estão em sentido co-corrente, portanto essa é a primeira condição para uma corrida ser considerada válida.

b) Temperatura em regime:

Será considerado período em regime quando a variação de temperatura da fornalha permanecer em média superior a 700°C, com desvio padrão (σ) de no máximo 40°C, por no mínimo 30 minutos.

Esse desvio padrão foi considerado devido ser característico da queima de lenha uma grande variação da temperatura. Um exemplo é o experimento em um gaseificador *downdraft* realizado por Zainal *et al*, 2002, onde a amplitude de variação de temperatura na combustão da lenha foi de 100 a 200°C.

Foi considerada uma temperatura de 700°C, pois para uma melhor queima dos gases da combustão, a temperatura da câmara de combustão deve ser a partir de 600°C. E para queima do CO a temperatura ideal é acima dos 650° C, pois segundo cálculos através de equações da literatura (VAN WYLEN, 1998), a partir dessa temperatura a constante de equilíbrio da reação de formação do CO é praticamente nula.

3.8 CORRIDAS PRELIMINARES

Foram realizadas cinco corridas preliminares com a fornalha com os seguintes

objetivos: verificar as possíveis irregularidades na construção, a praticidade de operação da fornalha, a operação dos aparelhos eletrônicos, a organização da área do experimento e possíveis riscos operacionais.

Também foram testados alguns regimes de alimentação para a sessão de corridas com tiragem natural, para definir as variáveis do planejamento experimental. E para a sessão de corridas com tiragem induzida, foi feita uma corrida preliminar para definir a tiragem utilizada nas corridas.

Com essas corridas a fornalha pôde ser preparada para iniciar as corridas em batelada.

A rotina de corrida experimental da fornalha encontra-se no apêndice 06.

4 RESULTADOS

Os resultados desta dissertação são apresentados em partes. Primeiramente é mostrado que o fluxo co-corrente foi obtido. O item seguinte do capítulo apresenta os resultados de cada corrida, através dos gráficos de variação de temperatura e de CO. Após essa apresentação, são reportados os resultados sobre a eficiência da fornalha, e analisados separadamente cada fator que a influenciou. Em seguida serão apresentados os resultados das concentrações dos gases obtidos. E por último é discutido sobre balanço energético da fornalha.

4.1 FLUXO CO-CORRENTE

O primeiro resultado obtido nesta dissertação foi o fluxo co-corrente, logo na primeira corrida experimental. Nas primeiras corridas, com tiragem natural, demorava muito tempo para a ignição da fornalha. Esse problema foi resolvido utilizando-se uma lata de alumínio pequena com uma pastilha de álcool sólido na chaminé. Assim a chaminé esquentava e forçava o fluxo de gases a inverter, invertendo também a chama, como se pode perceber na figura 37.



FIGURA 37 – FLUXO DOWNDRAFT

Em todas as corridas o fluxo co-corrente foi alcançado.

4.2 TEMPERATURA E CONCENTRAÇÃO DE CO

A seguir serão apresentados os gráficos dos resultados da variação de

temperatura na base da chaminé e teor de CO dos gases emitidos pela fornalha.

O termopar do canal 0, localizado na base da chaminé, foi adotado como referência para o cálculo da potência útil da fornalha, devido estar localizado o mais próximo possível do final da câmara de combustão e apresentar a temperatura dos produtos finais da combustão (PERAGALLO TORREIRA, 1995).

A linha tracejada em azul representa a variação de temperatura e a variação do teor de CO durante o período em regime. Nos gráficos de temperatura, a aquisição de valores foi de 5 em 5 segundos, e por isso contém muitos dados, apresentando assim o aspecto de linha contínua. Já nos gráficos de teor de CO, como o analisador de gases não é contínuo, a aquisição de valores foi de 30 em 30 minutos até atingir o regime, e após iniciado o regime, passava a ser de 15 em 15 minutos. Porém, devido à dificuldades operacionais os intervalos de aquisição de dados de CO não eram seguidos rigorosamente.

A linha em vermelho representa a temperatura média e o teor de CO médio durante o período em regime.

Nas corridas com tiragem natural, após a ignição, alimentava-se a fornalha com gravetos até atingir 200°C em média na base da chaminé, e a partir desse ponto, começava o regime de alimentação determinado. Com exceção da corrida 01, todas as corridas com tiragem natural atingiram os requisitos básicos para uma corrida válida.

Nas corridas com tiragem induzida de 3mmH₂O (10 a 18), devido ao alto consumo de combustível, após a ignição da fornalha, a mesma era alimentada continuamente, até atingir em média 600° C na base da chaminé, e a partir daí era iniciado a alimentação em regime. As corridas com tiragem induzida não atingiram os requisitos básicos para uma corrida válida, pois a temperatura no período em regime não alcançou 700°C.

A medição de CO iniciava por volta de 0,5 a 1 hora de corrida em média, por isso não existem dados antes disso nos gráficos apresentados.

4.2.1 Corrida 01

A corrida 01 possui a configuração (1, -1, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha 0,13 m², alimentação 0,5kg / 4min e tiragem natural.

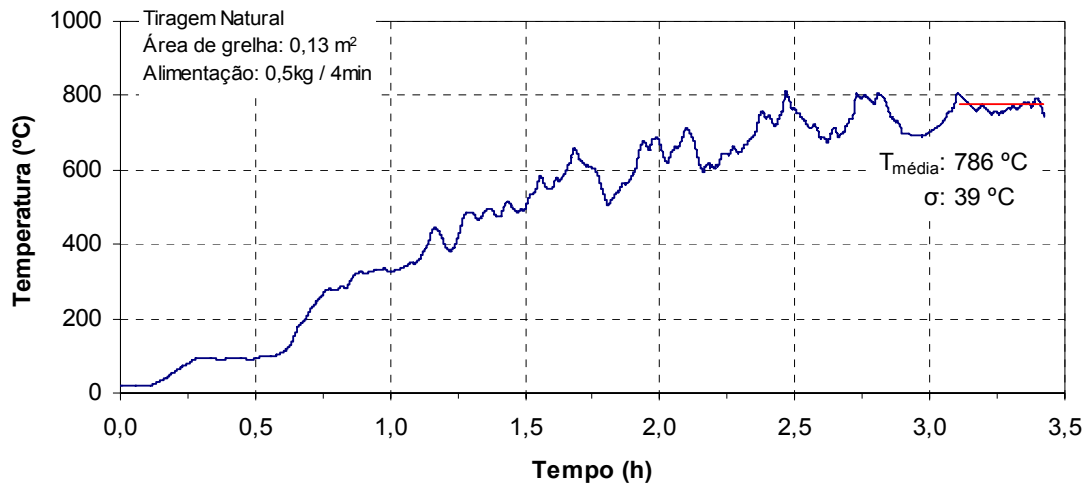


FIGURA 38 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA NA BASE DA CHAMINÉ DURANTE A CORRIDA 01

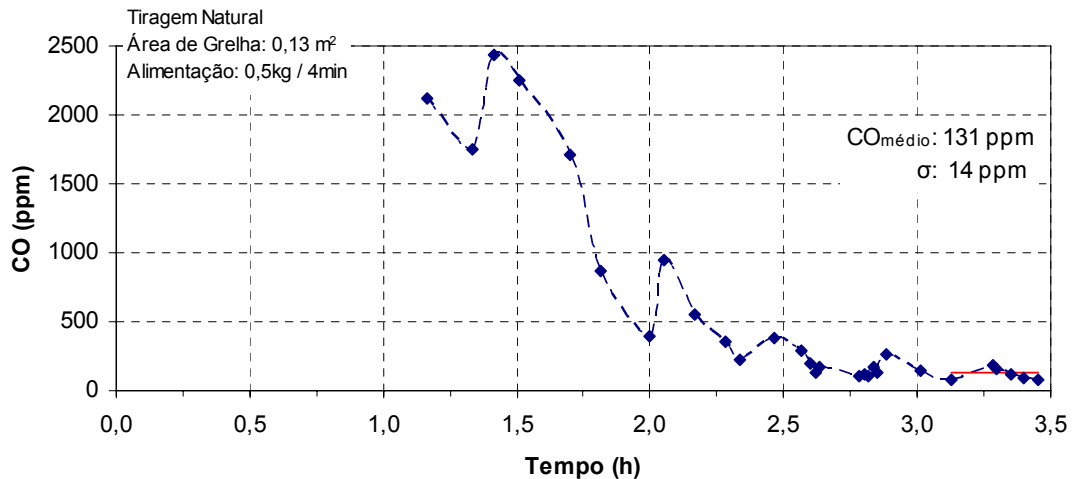


FIGURA 39 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 01

Com temperatura média de 786 ° C na base da chaminé por 17 minutos em regime, a corrida 01 não foi considerada válida. Com a maior área de grelha e alimentação mais pobre, obteve o maior excesso de ar (1,93) com 10,04 % de O₂, fato que explica a temperatura mais baixa em relação às outras corridas, com um teor médio de CO de 131 ppm. A umidade média da lenha foi de 13,5% (Ws) e 11,5% (Wu).

4.2.2 Corrida 02

A corrida 02 possui a configuração (1, 0, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,13 \text{ m}^2$, alimentação $0,4\text{kg} / 3\text{min}$ e tiragem natural.

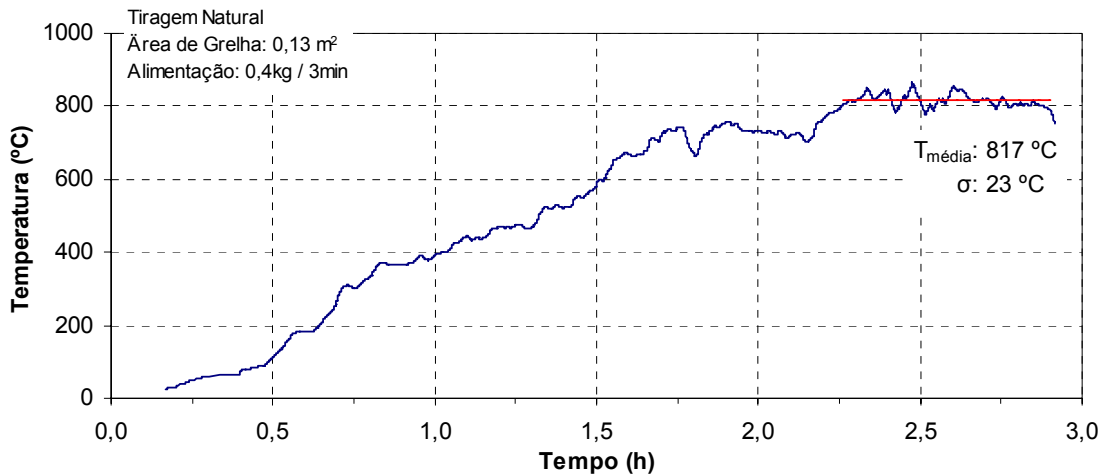


FIGURA 40 – VARIACÃO DA TEMPERATURA NA BASE DA CHAMINÉ DURANTE A CORRIDA 02

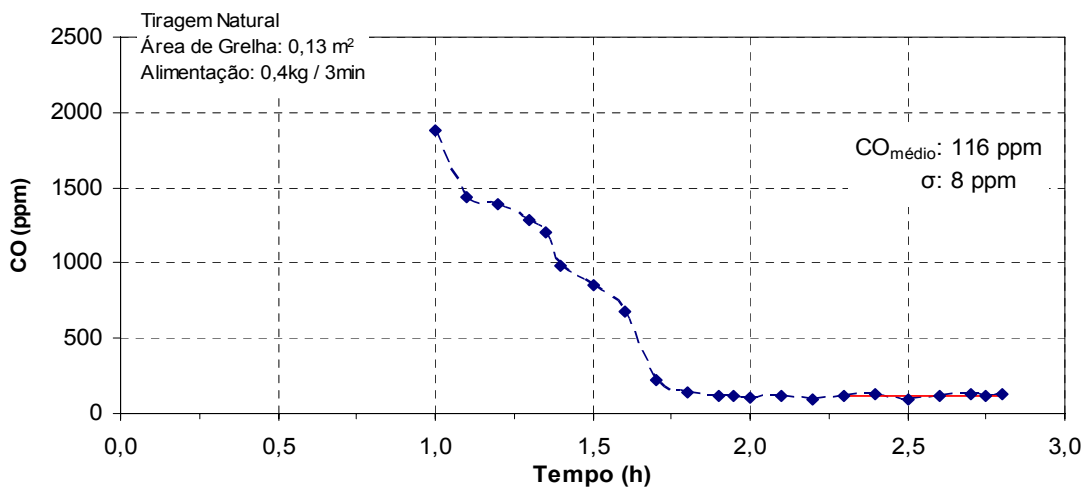


FIGURA 41 – VARIACÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 02

A corrida 02 atingiu uma temperatura de $817 \text{ }^\circ\text{C}$ em média em um período em regime de 36 minutos, atendendo todos os requisitos para uma corrida válida. Com concentração média de O_2 nos gases de combustão de $9,67 \%$, obteve um excesso de ar médio de $1,85$. O teor de CO foi de 116 ppm . A umidade média da lenha foi de $13,2\% (W_s)$ e $11,6\% (W_u)$.

4.2.3 Corrida 03

A corrida 03 possui a configuração (1, 1, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha 0,13 m², alimentação 0,3kg / 2min e tiragem natural.

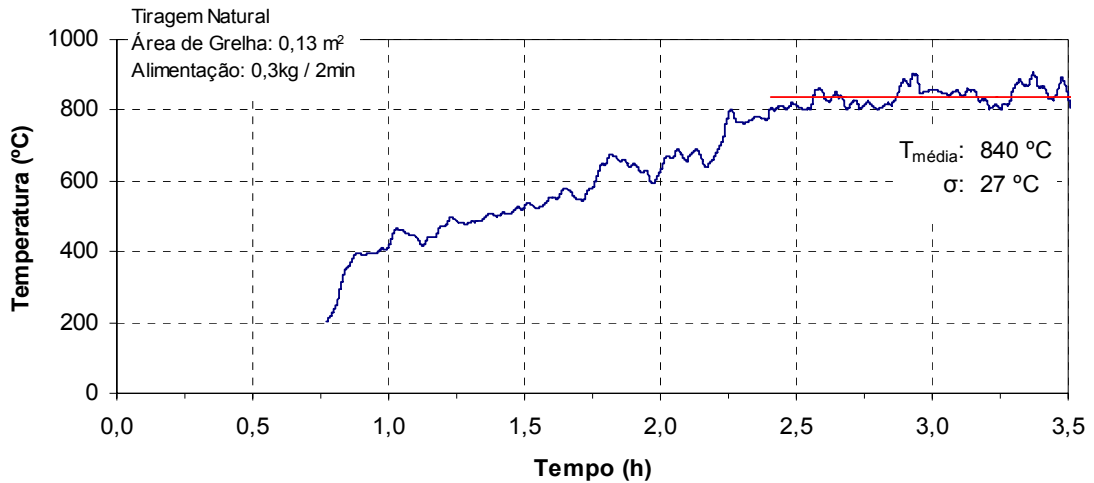


FIGURA 42 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 03

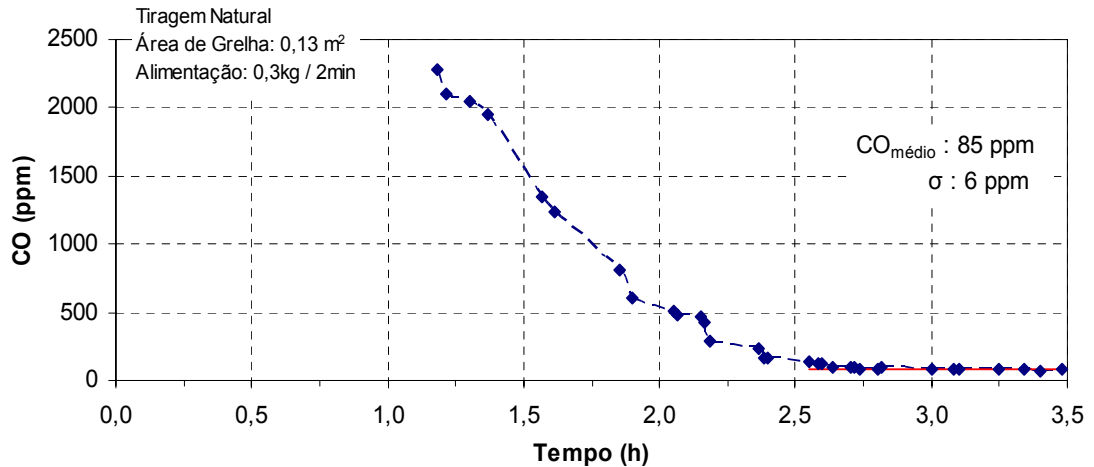


FIGURA 43 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 03

Na corrida 03 obteve-se um regime de 67 min com a temperatura média de 840°C na base da chaminé. A umidade da lenha foi de 13,5% (Ws) e 11,8% (Wu). A concentração média de O₂ nos produtos da combustão foi de 9,31 % e o excesso de ar médio foi de 1,80. O teor médio de CO foi de 85 ppm.

4.2.4 Corrida 04

A corrida 04 possui a configuração (0, -1, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha 0,08 m², alimentação 0,5kg / 4min e tiragem natural.

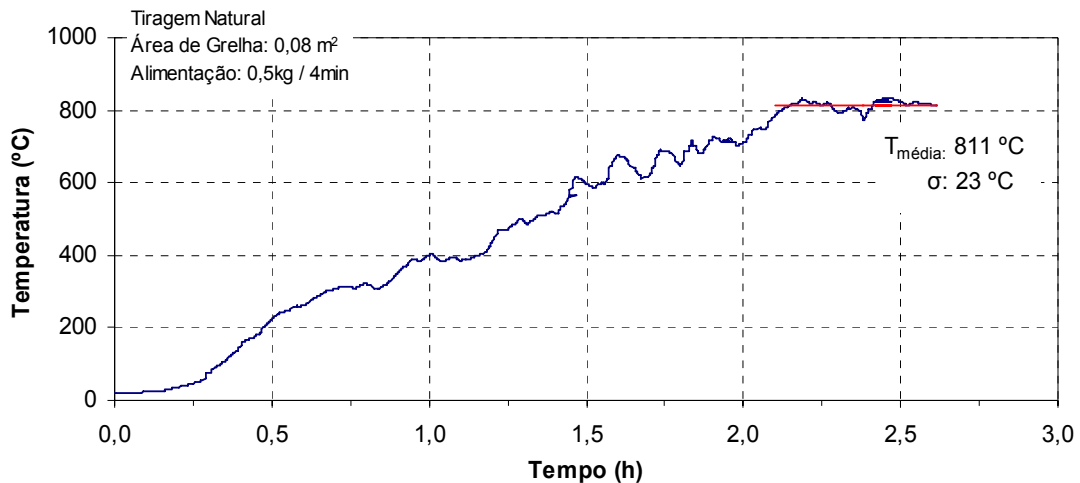


FIGURA 44 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 04

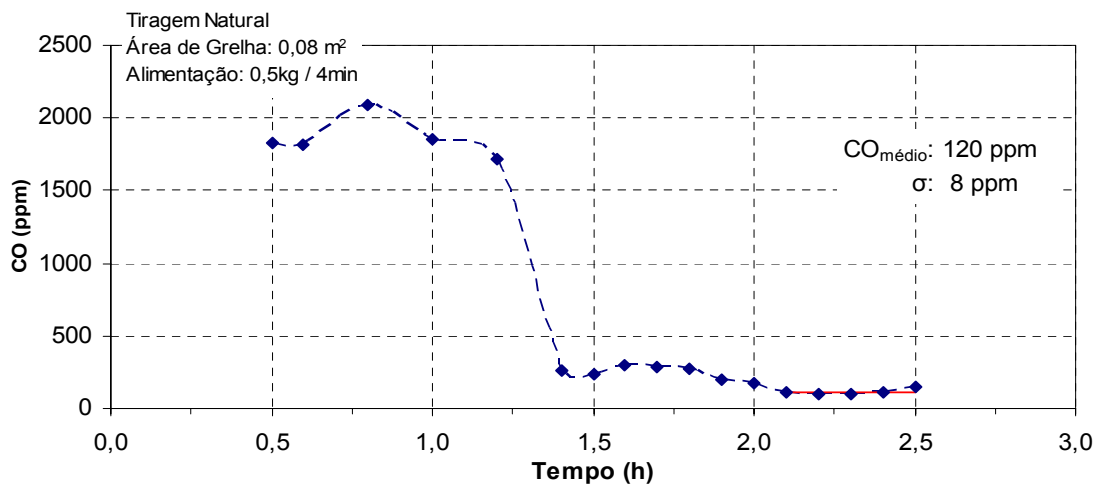


FIGURA 45 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 04

Na corrida 04 obteve-se um regime de 30 minutos, com temperatura média de 811 °C. A umidade média da lenha foi 14,5 % (Ws) e 12,6% (Wu). O teor médio de O₂ foi de 9,65 %, o maior para essa área de grelha, o que levou a um excesso de ar médio de 1,85. O teor médio de CO foi de 120 ppm. Esta corrida durou menos tempo do que as outras em média, devido a um problema ocorrido com os termopares.

4.2.5 Corrida 05

A corrida 05 possui a configuração (0, 1, -1) da matriz de planejamento com área de grelha $0,08 \text{ m}^2$, alimentação $0,3\text{kg} / 2\text{min}$ e tiragem natural.

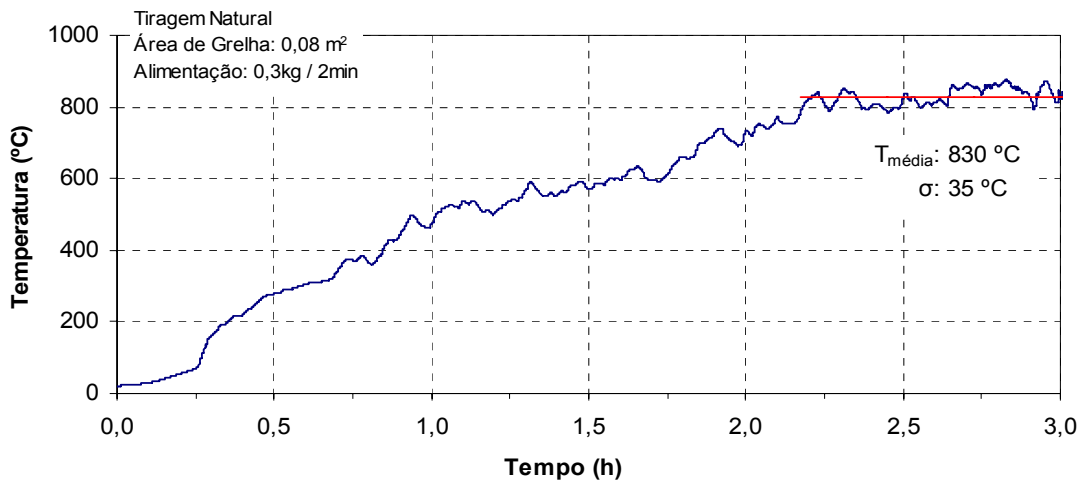


FIGURA 46 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 05

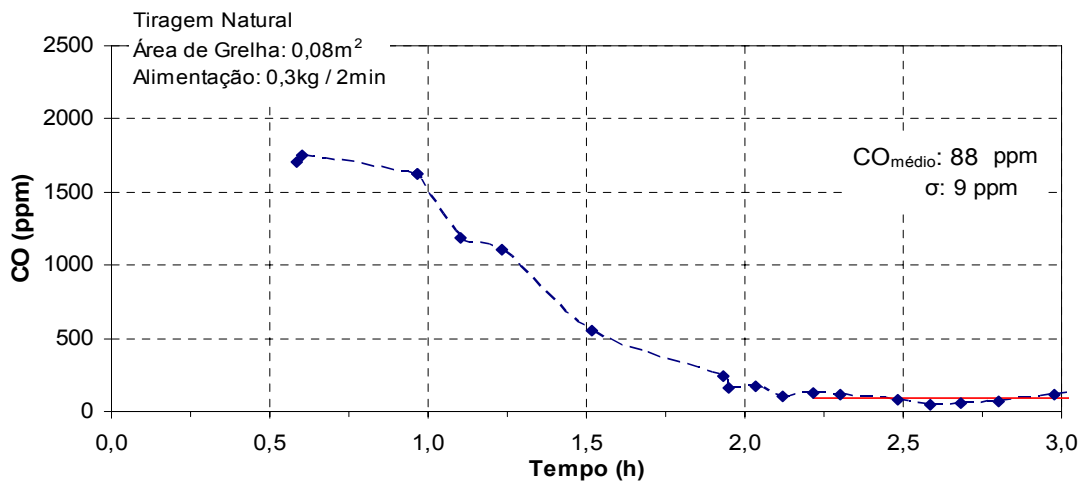


FIGURA 47 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 05

A corrida 05 alcançou um regime de 55 minutos à temperatura média de 830 °C , atingindo todos os requisitos para uma corrida válida. A concentração de O_2 nos produtos da combustão foi de $8,75 \%$, o menor dessa área de grelha, com um excesso de ar de $1,71$. A umidade da lenha foi $13,5 \%$ (W_s) e $11,8 \%$ (W_u). O teor de CO foi de 88 ppm .

4.2.6 Corrida 06

A corrida 06 possui a configuração (0, 0, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha 0,08 m², alimentação 0,4kg / 3min e tiragem natural.

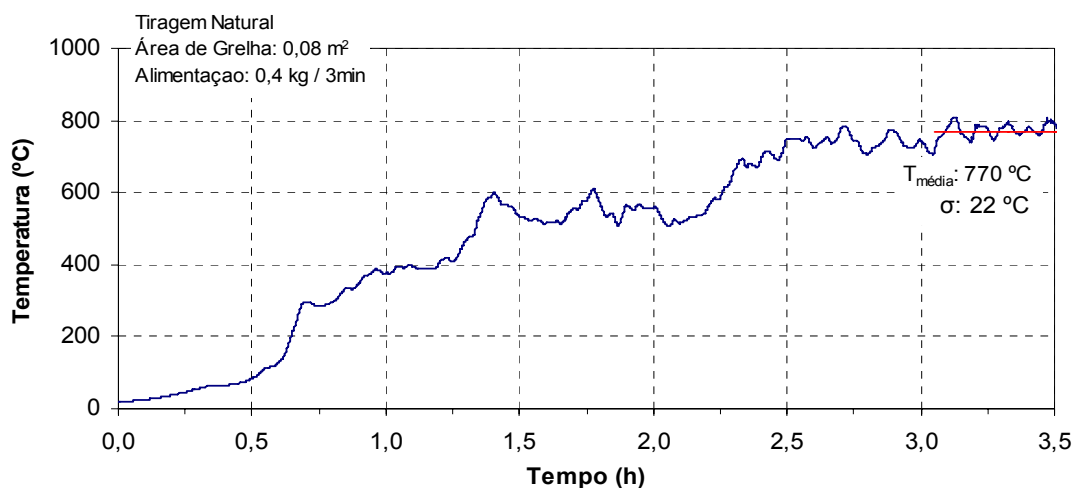


FIGURA 48 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 06

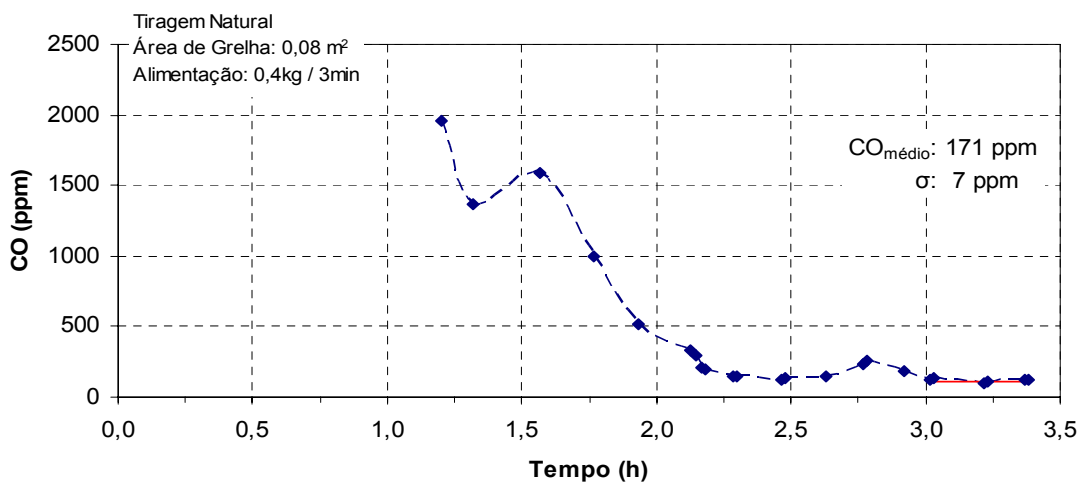


FIGURA 49 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 06

Com um regime de 40 minutos a uma temperatura média de 770°C. Foi a menor temperatura em regime dentre as corridas com tiragem natural, devido à maior umidade média da lenha, com 20,6% (Ws) e 16,6% (Wu). Devido à temperatura mais baixa de todas as corridas, foi o maior teor de CO, de 171 ppm. A concentração média de O₂ nos produtos da combustão foi de 9,40 %, com um excesso de ar médio de 1,81.

4.2.7 Corrida 07

A corrida 07 possui a configuração (-1, 1, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,05 \text{ m}^2$, alimentação $0,3\text{kg} / 2\text{min}$ e tiragem natural.

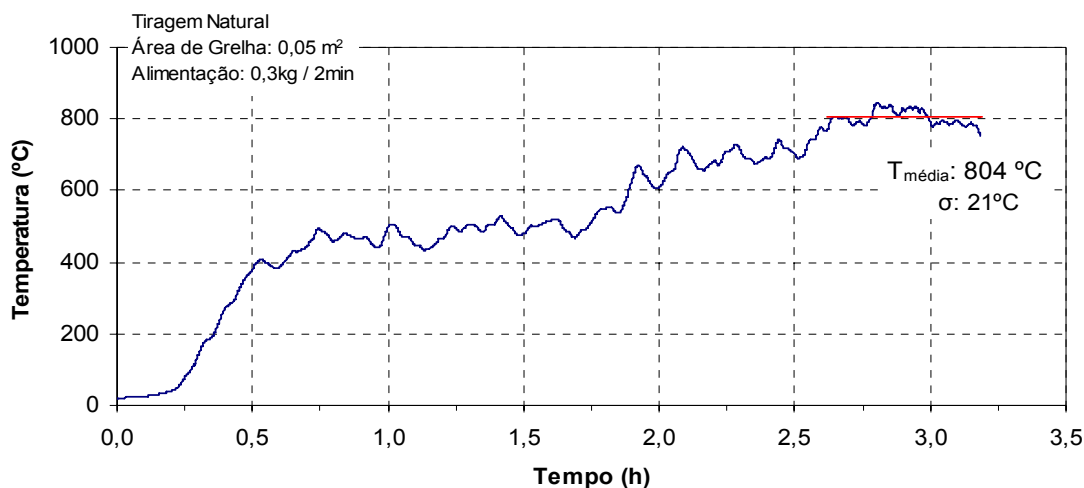


FIGURA 50 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 07

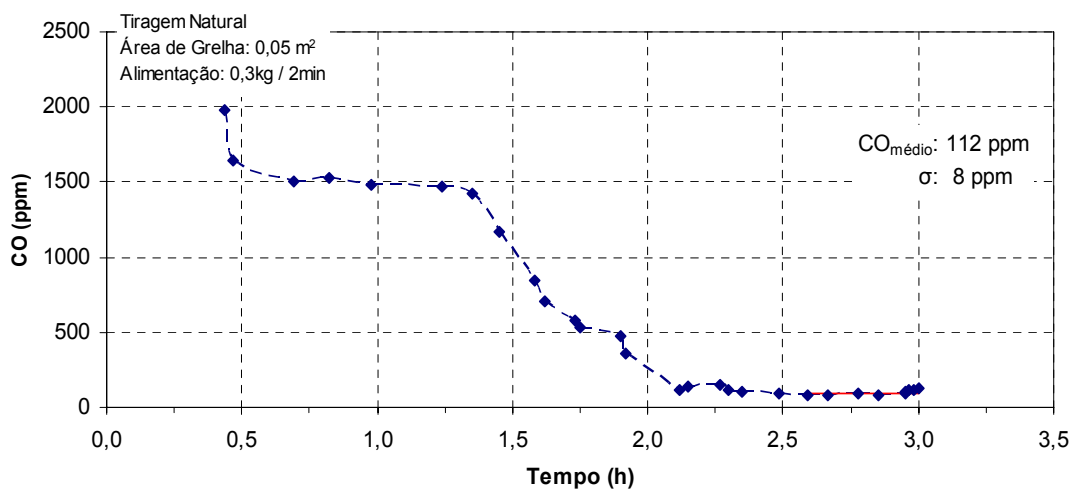


FIGURA 51 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 07

Esta corrida obteve um regime de 32 minutos à temperatura de 804 °C em média. Devido ser a corrida de menor área de grelha com alimentação mais rica, a concentração média de O_2 nos gases de combustão foi de $8,73 \%$, com excesso de ar médio de $1,71$, o menor de todas as corridas. O teor médio de CO foi de 112 ppm . A umidade média da lenha foi $13,6 \%$ (Ws) e $11,9\%$ (Wu).

4.2.8 Corrida 08

A corrida 08 possui a configuração (-1, 0, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,05 \text{ m}^2$, alimentação $0,4\text{kg} / 3\text{min}$ e tiragem natural.

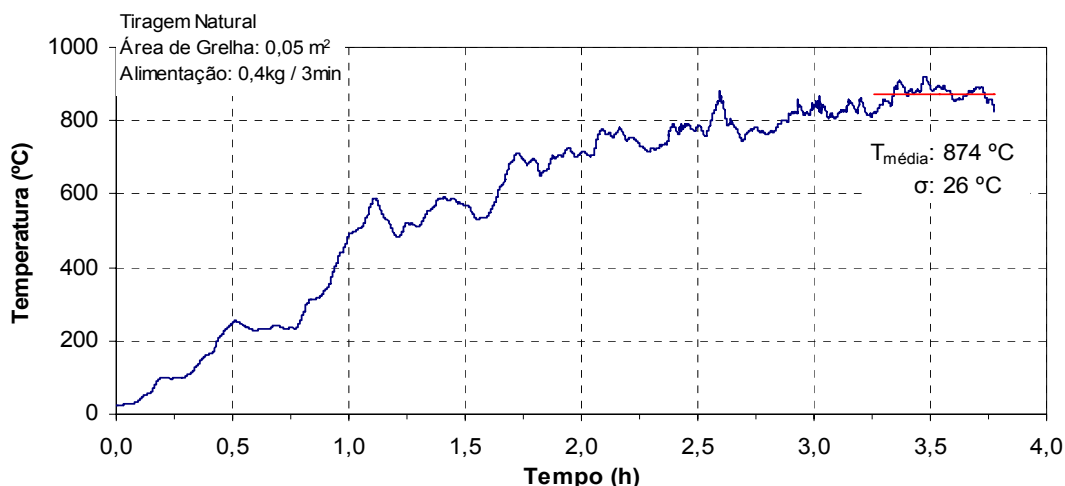


FIGURA 52 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 08

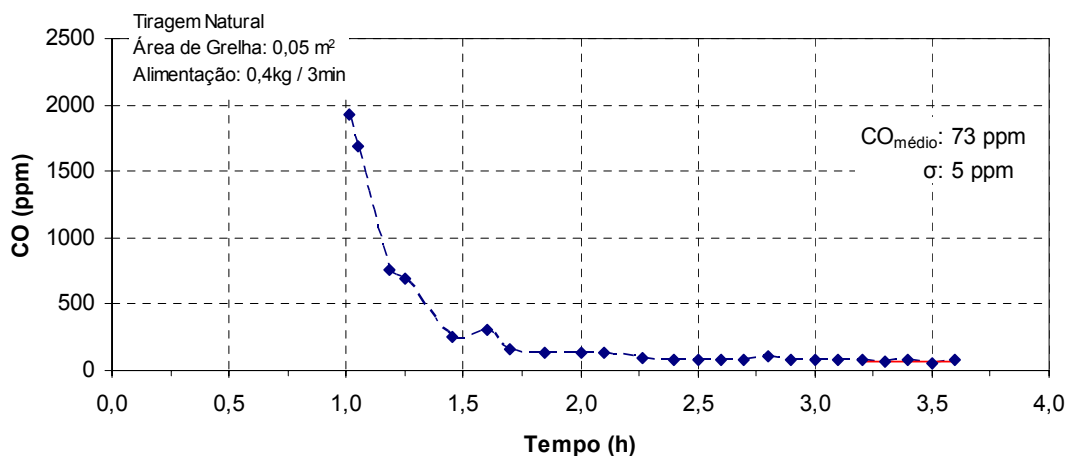


FIGURA 53 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 08

O período em regime desta corrida foi de 31 minutos à temperatura de $874 \text{ }^\circ\text{C}$ em. Obteve um teor médio de CO de 73 ppm. Atingiu a maior temperatura e o menor teor de CO de todas as corridas. Com uma concentração volumétrica de O_2 de 8,92 % nos gases de combustão e um excesso de ar de 1,74. A umidade média da lenha foi 13,7 % (Ws) e 11,9% (Wu).

4.2.9 Corrida 09

A corrida 09 possui a configuração (-1, -1, -1) da matriz de planejamento, com área de grelha 0,05 m², alimentação 0,5kg / 4min e tiragem natural.

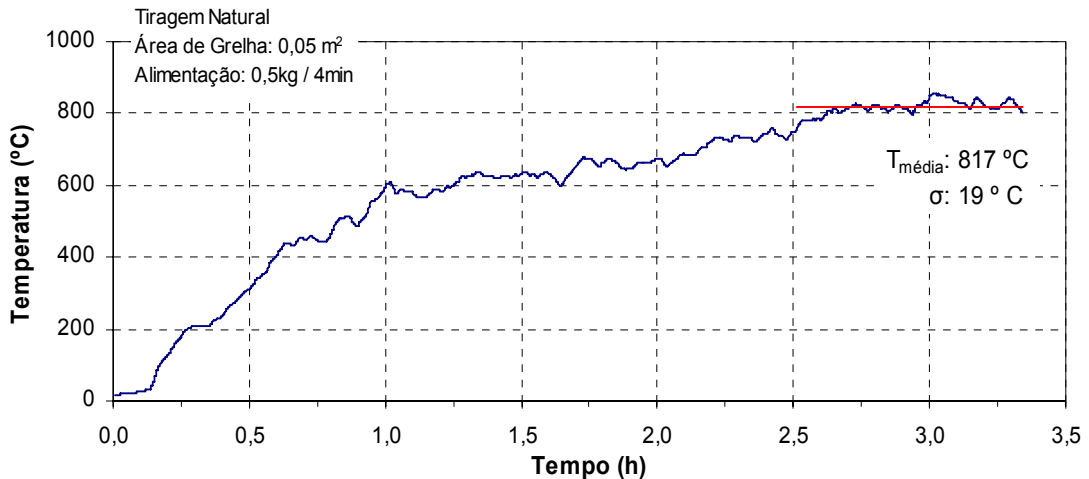


FIGURA 54 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 09

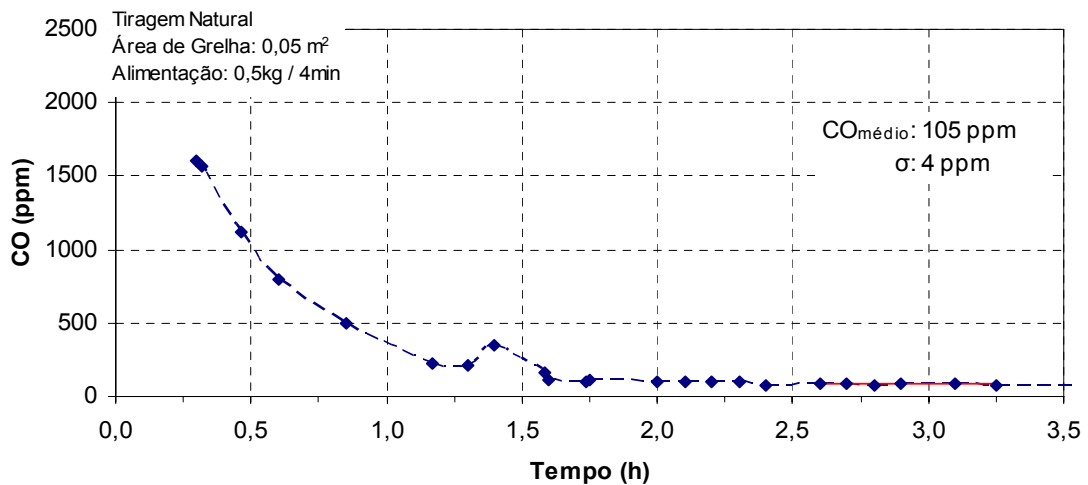


FIGURA 55 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 09

Esta corrida alcançou uma temperatura média de 817 °C, com período em regime de 50 minutos. A concentração média de O₂ nos produtos da combustão foi de 9,24% e excesso de ar médio 1,78, alto para essa área de grelha, em comparação com as outras. O teor médio de CO foi de 105 ppm. A umidade média da lenha foi 13,5 % (Ws) e 11,5% (Wu).

Antes de iniciar a apresentação dos resultados das corridas com tiragem induzida, cabe aqui ressaltar que as condições para uma corrida válida descritas no item *material e métodos*, não foram atingidas em nenhuma corrida com tiragem induzida. Pois mesmo utilizando a mínima tiragem possível nas instalações, o excesso de ar era muito alto e a alimentação programada não foi suficiente, pois a tiragem exigia um consumo maior.

Porém, a fim de se obter resultados que tornem possível uma correlação para dimensionamento de uma fornalha em escala industrial, as variáveis de controle e monitoramento utilizadas nas corridas com tiragem natural foram mantidas.

4.2.10 Corrida 10

A corrida 10 possui a configuração (1, -1, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,05 \text{ m}^2$, alimentação $0,3\text{kg} / 2\text{min}$ e tiragem induzida.

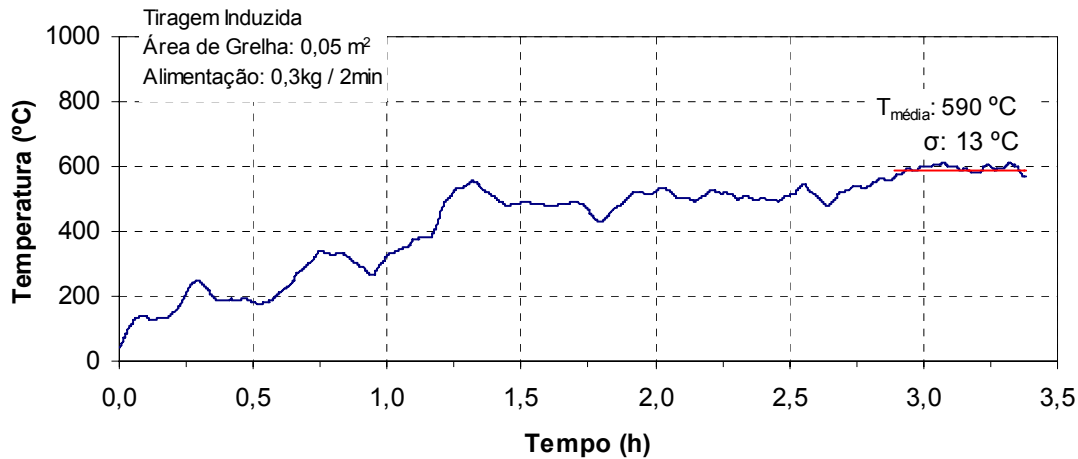


FIGURA 56 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 10

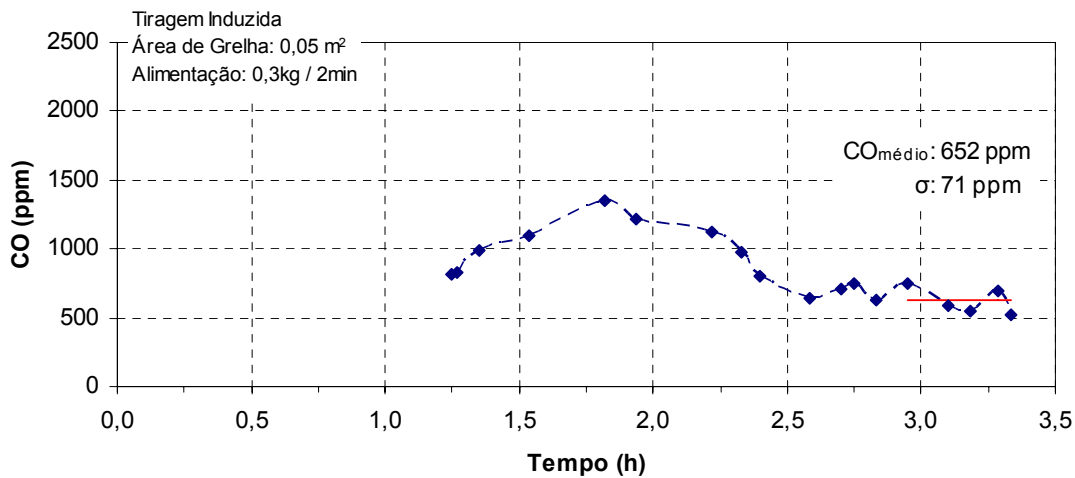


FIGURA 57 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 10

Com regime de 35 minutos à temperatura de $590 \text{ }^\circ\text{C}$ em média, o teor médio de O_2 nos gases de combustão foi de $14,26 \%$, e o teor médio de CO, 652 ppm , levando a um excesso de ar médio de $3,10$. Com a menor área de grelha e alimentação mais rica, foi o menor excesso de ar das corridas com tiragem induzida, e conseqüentemente, a maior temperatura. A umidade média da lenha foi $14,3 \%$ (W_s) e $12,4\%$ (W_u).

4.2.11 Corrida 11

A corrida 11 possui a configuração (-1, 0, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,05 \text{ m}^2$, alimentação $0,2\text{kg} / 3\text{min}$ e tiragem induzida.

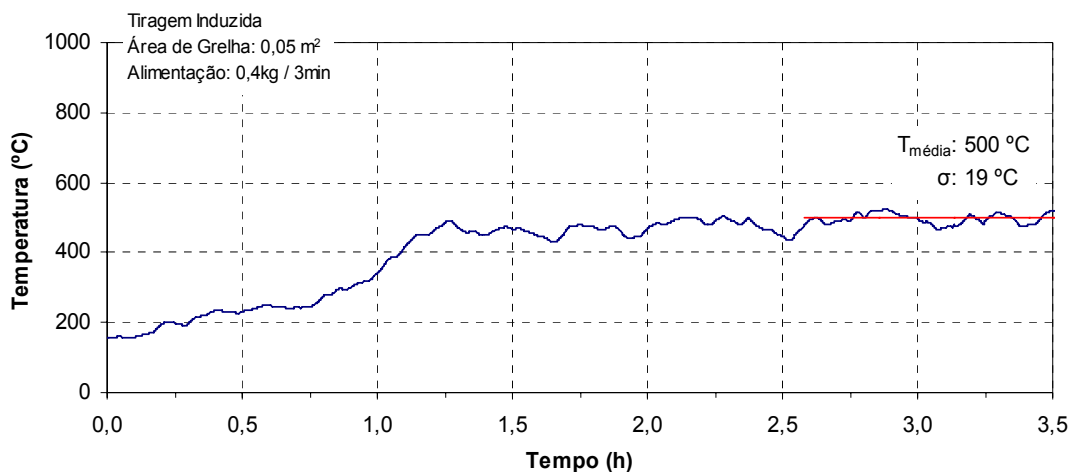


FIGURA 58 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 11

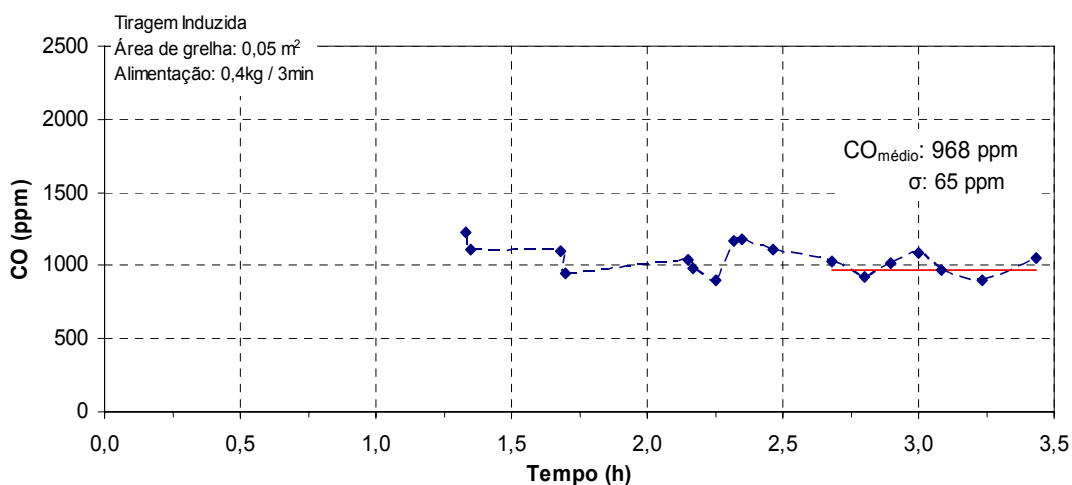


FIGURA 59 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 11

Esta corrida obteve um regime de 75 minutos à temperatura média de $500 \text{ }^\circ\text{C}$. O teor médio de O_2 nos gases de combustão foi de $15,50 \%$, e o teor médio de CO 968 ppm , levando a um excesso de ar médio de $3,79$. A umidade média da lenha foi $13,6 \%$ (W_s) e $11,9\%$ (W_u).

4.2.12 Corrida 12

A corrida 12 possui a configuração (-1, -1, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,05 \text{ m}^2$, alimentação $0,5 \text{ kg} / 4 \text{ min}$ e tiragem induzida.

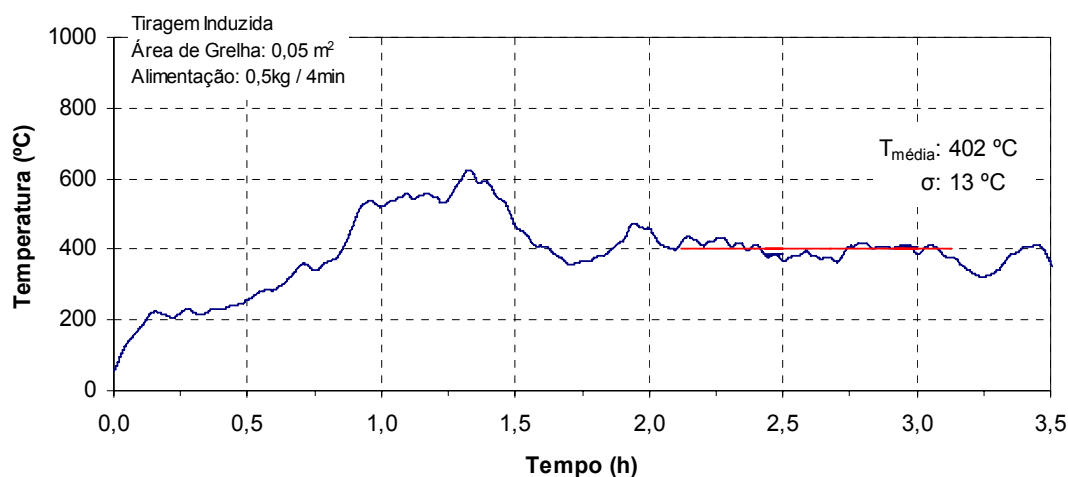


FIGURA 60 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 12

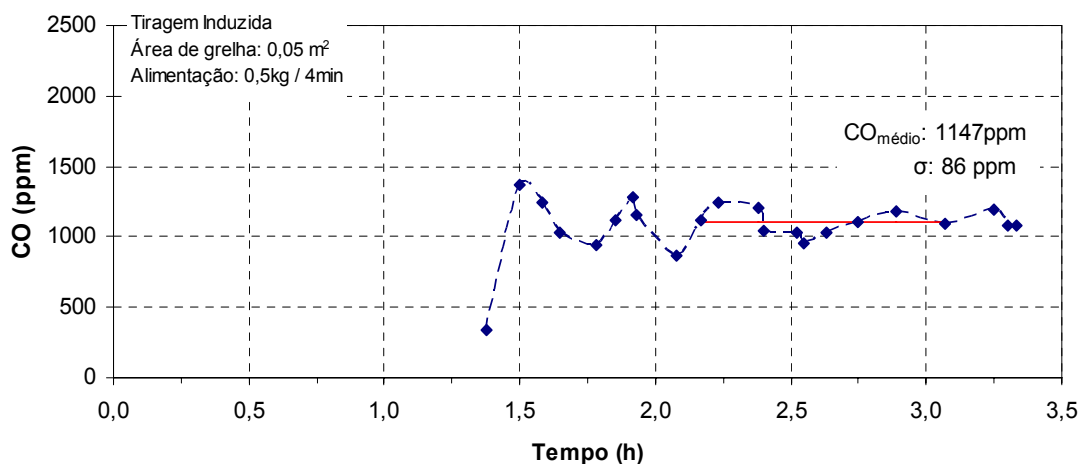


FIGURA 61 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 12

Esta corrida alcançou 402°C em médio por um período de 60 minutos à. O teor médio de O_2 nos gases de combustão foi de $16,52 \%$, e o teor médio de CO 1147 ppm , levando a um excesso de ar médio de $4,60$. A umidade média da lenha foi $14,4 \%$ (W_s) e $12,6\%$ (W_u).

4.2.13 Corrida 13

A corrida 13 possui a configuração (0, -1, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,08 \text{ m}^2$, alimentação $0,5 \text{ kg} / 4 \text{ min}$ e tiragem induzida.

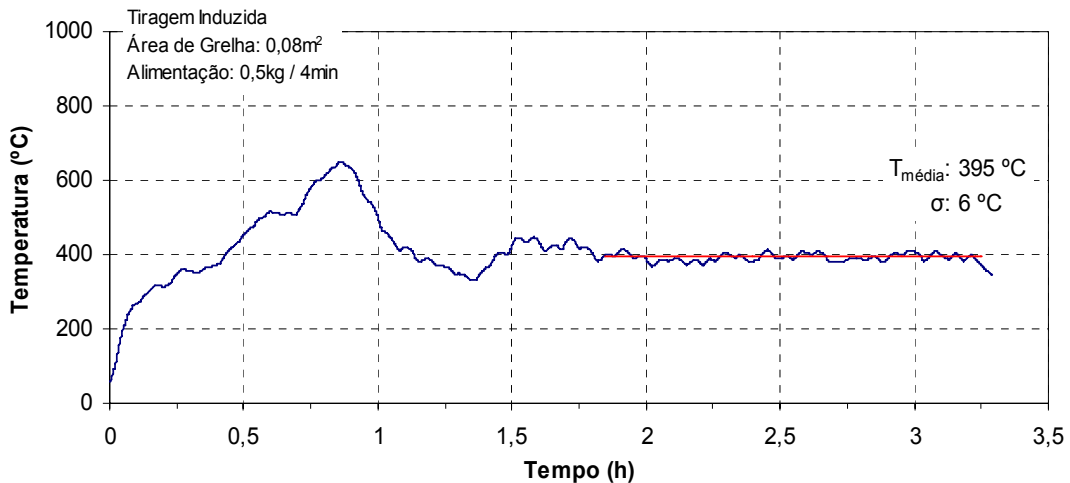


FIGURA 62 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 13

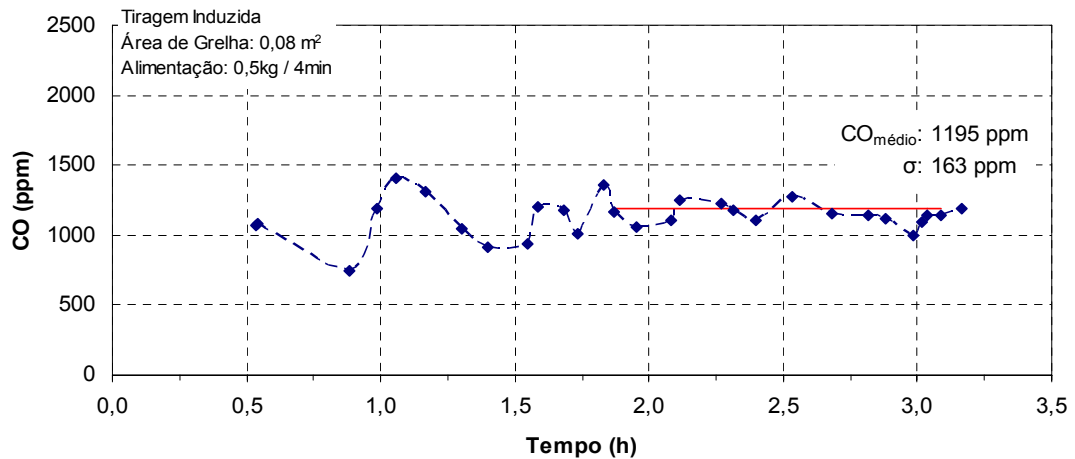


FIGURA 63 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 13

Esta corrida obteve um regime de 92 minutos à temperatura de $395 \text{ }^\circ\text{C}$ em média. O teor médio de O_2 nos gases de combustão foi de $16,66 \%$, e o teor médio de CO 1195 ppm , levando a um excesso de ar médio de $4,78$. A umidade média da lenha foi $14,1 \%$ (W_s) e $12,3\%$ (W_u).

4.2.14 Corrida 14

A corrida 14 possui a configuração (0, 0, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,08 \text{ m}^2$, alimentação $0,4 \text{ kg} / 3 \text{ min}$ e tiragem induzida.

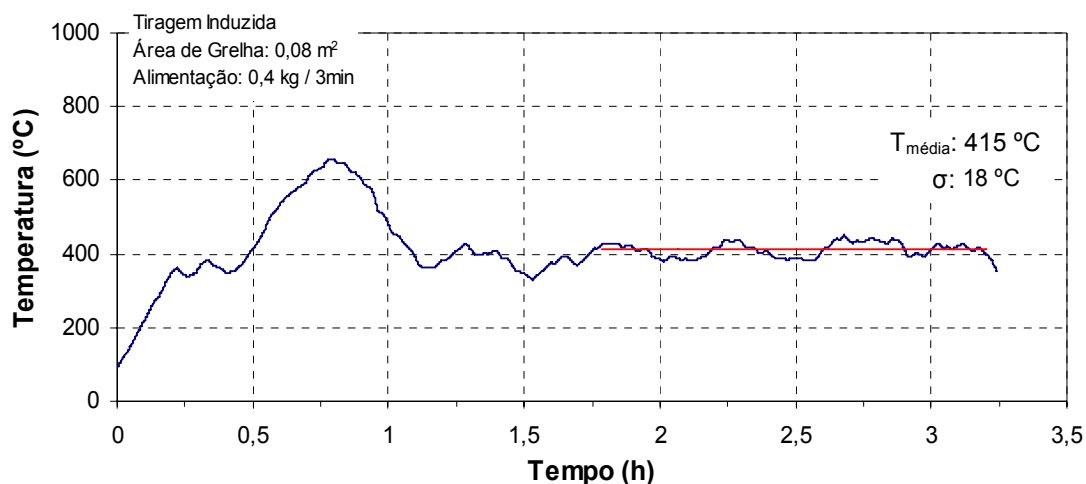


FIGURA 64 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 14

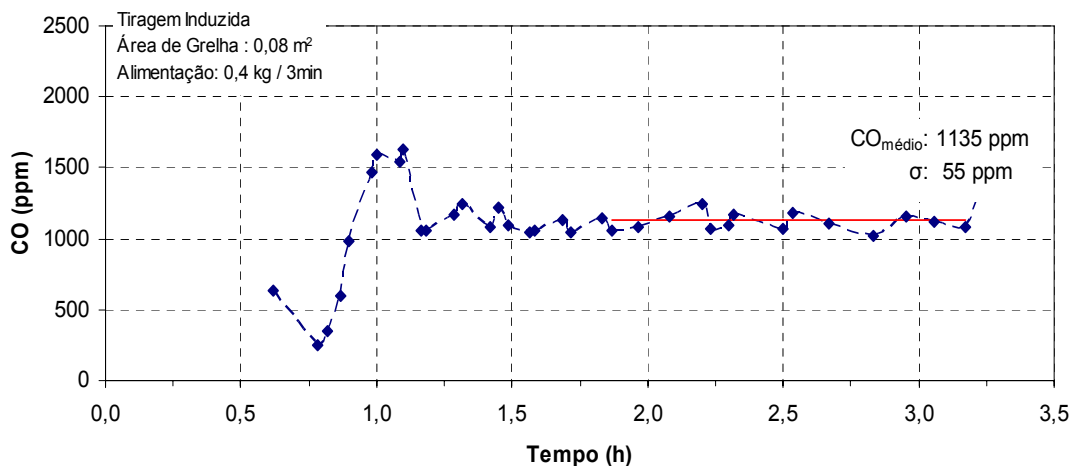


FIGURA 65 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 14

Esta corrida obteve um regime de 80 minutos à temperatura de $415 \text{ }^\circ\text{C}$ em média. A concentração média de O_2 nos gases de combustão foi de $15,86 \%$, e o teor médio de CO 1135 ppm , levando a um excesso de ar médio de $4,04$. A umidade média da lenha foi $13,9 \%$ (W_s) e $12,2\%$ (W_u).

4.2.15) Corrida 15

A corrida 15 possui a configuração (0, 1, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,08 \text{ m}^2$, alimentação $0,3 \text{ kg} / 2 \text{ min}$ e tiragem induzida.

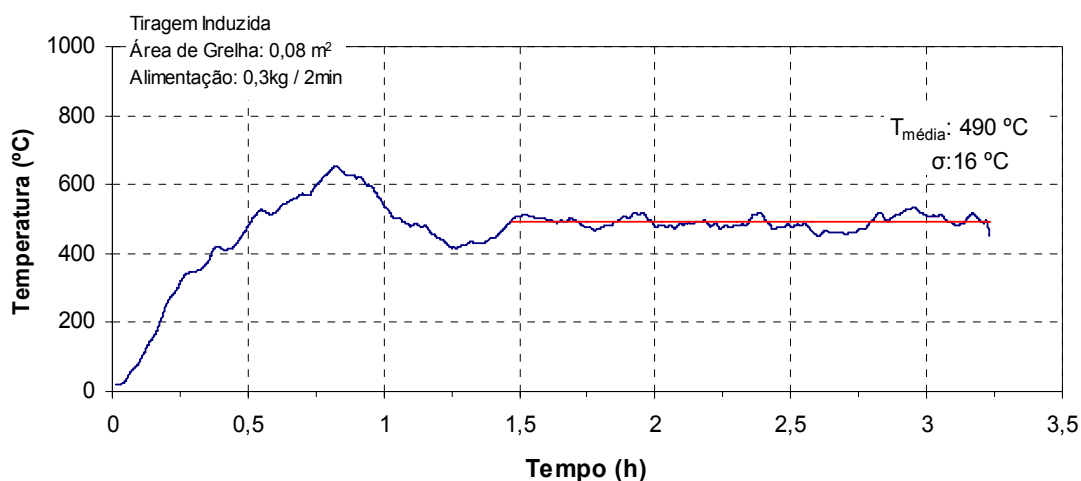


FIGURA 66 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 15

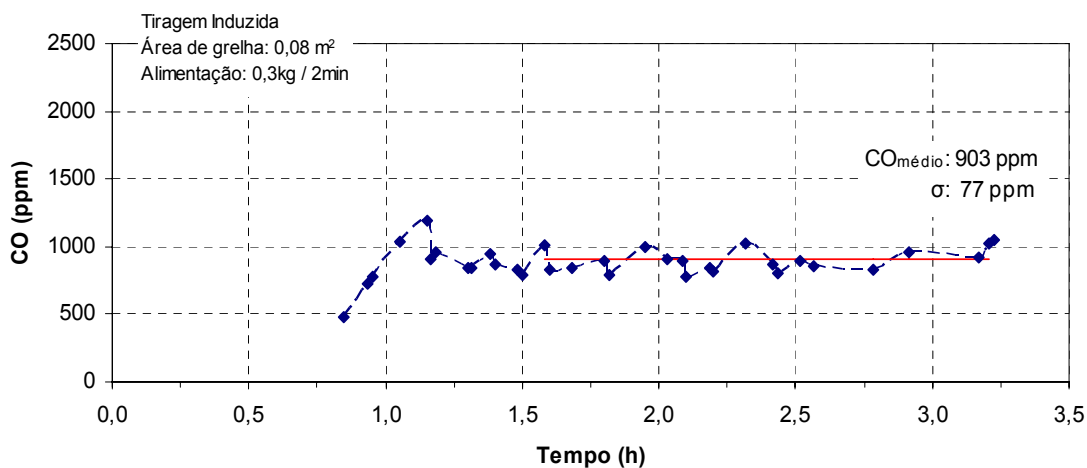


FIGURA 67 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 15

Esta corrida obteve um regime de 100 minutos à temperatura de $490 \text{ }^\circ\text{C}$ em média. O teor médio de O_2 nos gases de combustão foi de $14,90 \%$, e o teor médio de CO 903 ppm , levando a um excesso de ar médio de $3,42$. A umidade média da lenha foi $14,0 \%$ (W_s) e $12,3\%$ (W_u).

4.2.16 Corrida 16

A corrida 16 possui a configuração (1, -1, 1) da matriz de planeamento, com área de grelha $0,13 \text{ m}^2$, alimentação $0,5 \text{ kg} / 4 \text{ min}$ e tiragem induzida.

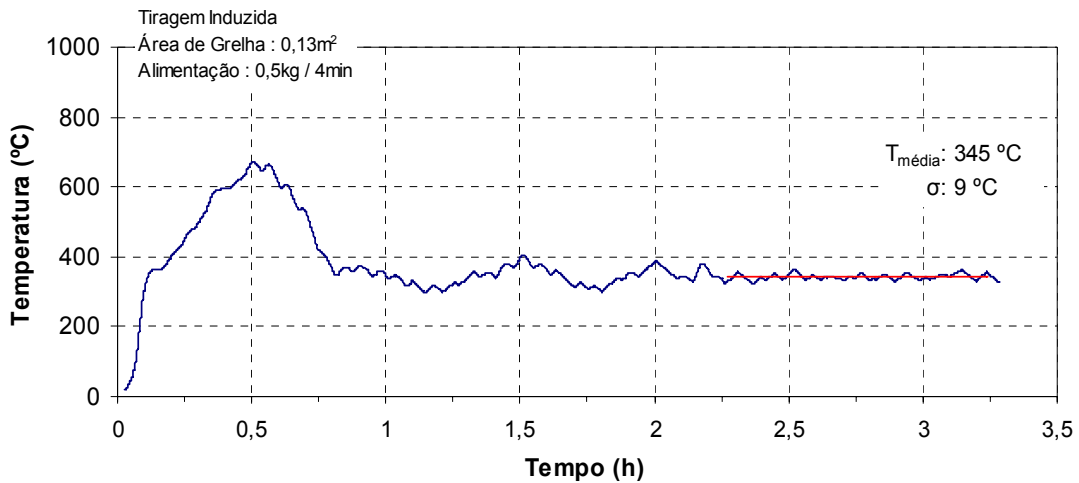


FIGURA 68 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 16

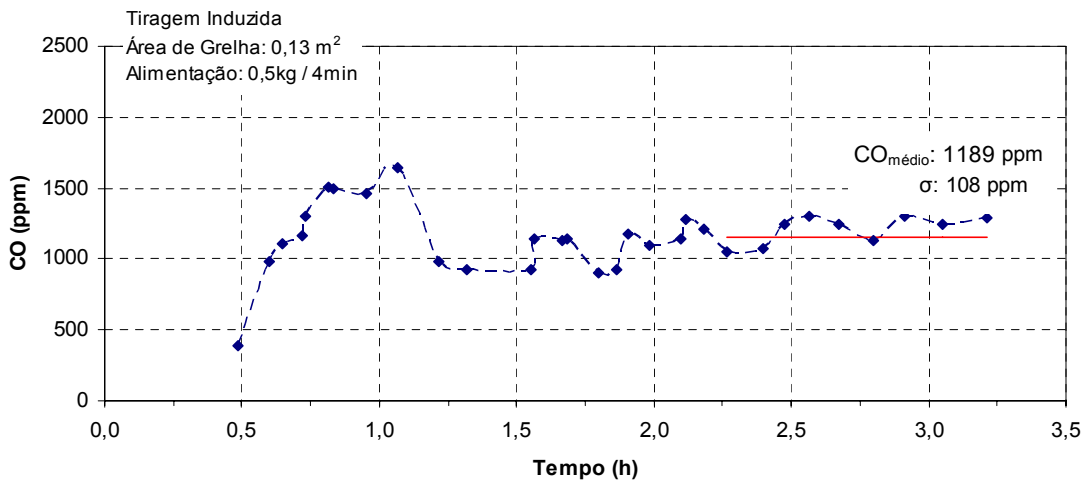


FIGURA 69 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 16

Com um regime de 60 minutos à temperatura média de $345 \text{ }^\circ\text{C}$, o teor médio de O_2 nos gases de combustão foi de $17,19 \%$, e o teor médio de CO 1189 ppm , levando a um excesso de ar médio de $5,42$. Com a maior área de grelha e a alimentação mais pobre, foi o maior excesso de ar entre todas as corridas, e conseqüentemente, a menor temperatura. A umidade média da lenha foi $13,6 \%$ (W_s) e $11,9\%$ (W_u).

4.2.17 Corrida 17

A corrida 17 possui a configuração (1, 0, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha $0,13 \text{ m}^2$, alimentação $0,4 \text{ kg} / 3 \text{ min}$ e tiragem induzida.

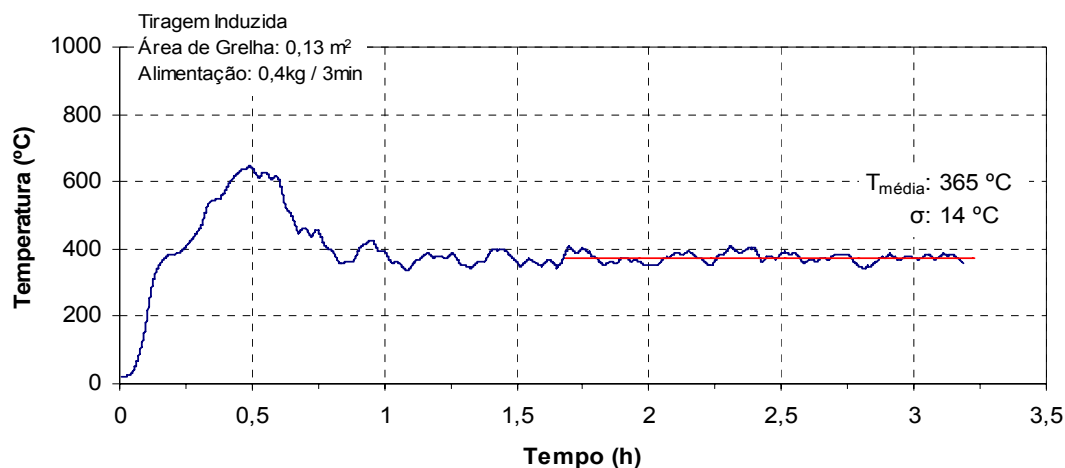


FIGURA 70 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 17

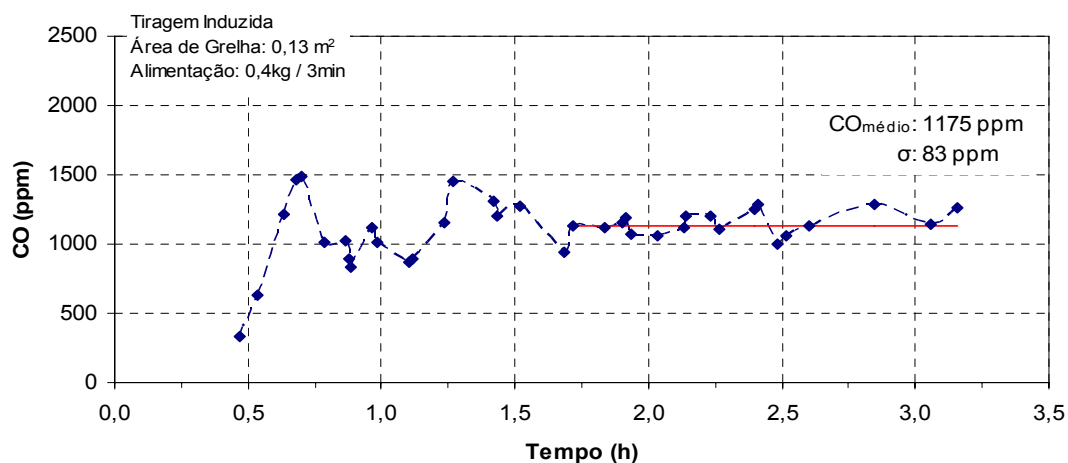


FIGURA 71 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 17

Esta corrida obteve um regime de 90 minutos à temperatura de 365 °C em média. A concentração média de O_2 nos gases de combustão foi de $16,65 \%$, levando a um excesso de ar médio de $4,77$. O teor médio de CO foi 1175 ppm . A umidade média da lenha foi $13,8 \%$ (W_s) e $12,1\%$ (W_u).

4.2.18 Corrida 18

A corrida 18 possui a configuração (1, 1, 1) da matriz de planejamento, com área de grelha 0,13 m², alimentação 0,3 kg / 2 min e tiragem induzida.

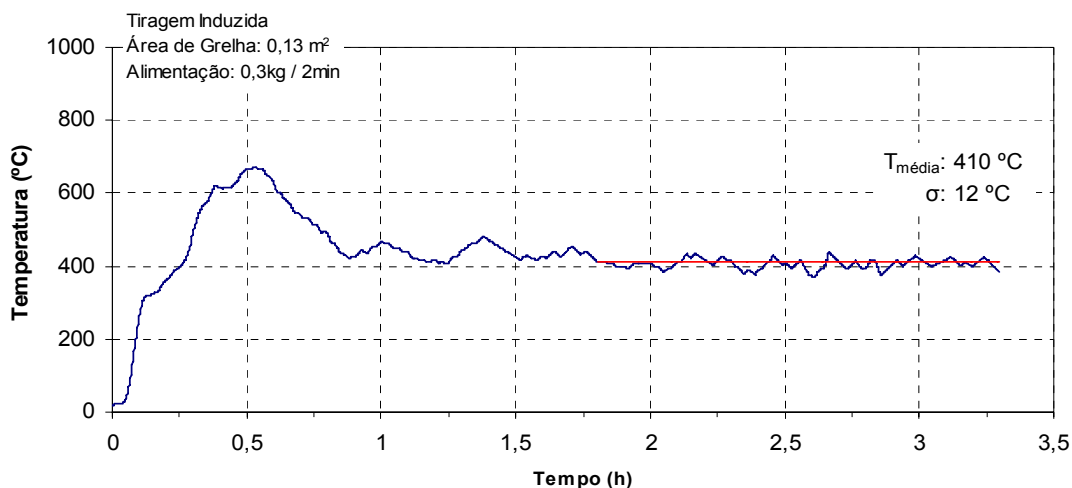


FIGURA 72 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 18

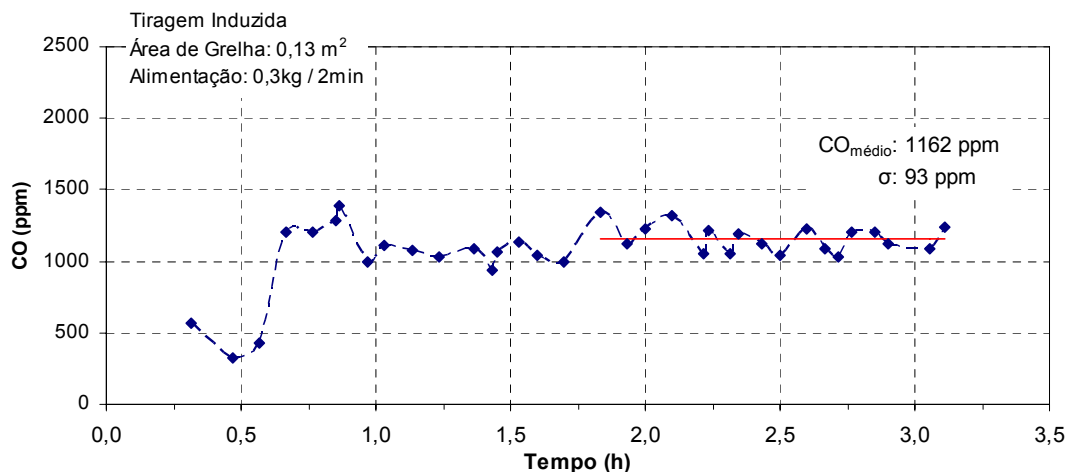


FIGURA 73 – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 18

Esta corrida obteve um regime de 97 minutos à temperatura de 410 °C em média. O teor médio de O₂ nos gases de combustão foi de 16,38 %, levando a um excesso de ar médio de 4,48. O teor médio de CO foi 1162 ppm. A umidade média da lenha foi 14,0 % (Ws) e 12,3% (Wu).

4.3 EFICIÊNCIA

A eficiência média das corridas com tiragem natural variou de 70 a 78 %. Nas corridas com tiragem induzida os valores foram de 64 a 83 %. As primeiras atingiram maiores temperaturas e obtiveram menores excessos de ar do que nas corridas com tiragem induzida, entretanto, o elevado excesso de ar das corridas com tiragem induzida levou a uma alta eficiência, pois o alto volume de gases compensou a baixa temperatura.

Na tabela 09 encontra-se a matriz de planejamento apresentada no item material e métodos, já com os valores das eficiências de cada corrida e suas respectivas incertezas. Foi acrescentada uma coluna com o teor de CO médio e o desvio padrão.

A tabela geral apresentando todos os resultados das 18 corridas encontra-se no apêndice 07. As tabelas de eficiência de cada corrida encontram-se no apêndice 08. O método de cálculo de incertezas é apresentado no apêndice 09.

Os principais fatores que influenciaram na eficiência da fornalha foram: a umidade da lenha, a temperatura dos gases de combustão e o excesso de ar obtido durante as corridas. Estes serão apresentados e discutidos nos subitens a seguir.

4.3.1 Umidade

A umidade do combustível utilizado não apresentou uma amplitude muito grande de variação. O método de cálculo da umidade encontra-se no apêndice 02.

Durante as corridas com tiragem natural (1 a 9), a umidade média foi de 13,6 % (σ : 0,25 %) em base seca e 11,9 % (σ : 0,22 %) em base úmida. A única discrepância foi na corrida 6, com umidade 20,2 % base seca e 16,6% base úmida.

A umidade da lenha na corrida 6 foi mais alta, pois na corrida em questão adquiriu-se um novo lote de lenha, e verificada sua umidade e desempenho na corrida, esse lote foi descartado, adquirindo-se outro para as próximas corridas. Entretanto, a corrida 6 atingiu todos os requisitos para uma corrida válida e portanto não foi descartada.

Nas corridas com tiragem induzida (10 a 18), a umidade média foi de 14,0% (σ : 0,22 %) em base seca e 12,3 % (σ :0,16 %) em base úmida.

TABELA 09 – MATRIZ DE PLANEJAMENTO COMPLETA

Variáveis		-1	0	1		
Área de Grelha (m ²)		0,05	0,08	0,13		
Alimentação		500 g / 4min	400 g / 3min	300 g / 2min		
Tiragem		Natural		Induzida		
Corridas	Área de Grelha	Alimentação	Tiragem	Resposta de Interesse η (%)	CO médio (ppm)	σ
1	1	-1	-1	75,2 ± 2,8	131	14
2	1	0	-1	75,6 ± 2,6	116	8
3	1	1	-1	76,2 ± 2,4	85	6
4	0	-1	-1	76,1 ± 2,7	120	8
5	0	1	-1	72,3 ± 2,2	88	9
6	0	0	-1	74,8 ± 2,6	171	7
7	-1	1	-1	70,2 ± 2,1	112	8
8	-1	0	-1	77,8 ± 2,6	73	5
9	-1	-1	-1	73,6 ± 2,7	105	4
10	-1	1	1	82,8 ± 2,3	652	71
11	-1	0	1	75,0 ± 2,2	968	65
12	-1	-1	1	80,3 ± 2,5	1147	86
13	0	-1	1	71,5 ± 2,2	1195	163
14	0	0	1	64,7 ± 2,0	1135	55
15	0	1	1	75,5 ± 2,1	903	77
16	1	-1	1	77,7 ± 2,5	1189	108
17	1	0	1	73,5 ± 2,1	1175	83
18	1	1	1	79,8 ± 2,2	1162	93

FONTE: O autor (2008).

A tabela 10 apresenta a umidade média da lenha utilizada durante os testes.

TABELA 10 – UMIDADE DO COMBUSTÍVEL

Corrida	W_s (%)	W_u (%)
1	13,2	11,6
2	13,2	11,6
3	13,5	11,8
4	14,5	12,6
5	13,5	11,8
6	20,2	16,6
7	13,6	11,9
8	13,7	11,9
9	13,8	12,1
10	14,3	12,4
11	13,6	11,9
12	14,4	12,6
13	14,1	12,3
14	13,9	12,2
15	14,0	12,3
16	13,6	11,9
17	13,8	12,1
18	14,0	12,3

NOTA: - Os erros da medição da umidade foram menores que 0,01%, portanto foram desconsiderados.

- W_s é a umidade base seca, e W_u a umidade base úmida do combustível.

FONTE: O autor (2008)

Verificou-se que, um alto teor de umidade leva à temperaturas de combustão mais baixas do que quanto utilizado combustível mais seco, como ocorreu na corrida 6, onde a umidade da lenha foi de 20,2 % base seca, alta em comparação às outras corridas. A temperatura média em regime da corrida 6 foi de 770 °C, enquanto nas outras corridas a temperatura média foi maior que 800 °C. As temperaturas das corridas serão apresentadas no item 4.3.2 a seguir.

4.3.2 Temperatura

Um outro fator de influência na eficiência da fornalha foi a temperatura alcançada pelos produtos da combustão.

Para o cálculo da eficiência, como já mencionado, foi considerada a temperatura média temporal dos gases de combustão na base da chaminé (canal 0), por este ser o local mais próximo da saída da câmara de combustão, no período em regime. A temperatura do topo da chaminé não foi utilizada no cálculo da eficiência devido à perda térmica pela chaminé, verificada durante as corridas.

Na tabela 11 são apresentados os valores de temperatura média na base da chaminé com os respectivos desvios padrão, e o tempo em regime das corridas.

Nas corridas de tiragem natural (1 a 9), a média das temperaturas dos gases de combustão na base da chaminé, foi de 817°C com desvio padrão (σ) de 22°C, e o período em regime durou em média 43 min (σ : 12 min). A discrepância foi na corrida 1, em que o regime durou só 17 minutos, e portanto esta corrida foi descartada, por não atingir o tempo mínimo necessário para ser caracterizado um regime e ser considerada uma corrida válida.

Nas corridas de tiragem induzida (10 a 18), a média das temperaturas dos gases de combustão em regime foi de 435°C com desvio padrão (σ) de 63 °C e o período em regime durou em média 85 min (σ : 18 min).

Dentre as corridas com tiragem natural, a maior temperatura em regime na base da chaminé foi na corrida 8, com 874 °C por um período de 31 minutos, com a menor área de grelha (0,05 m²) e alimentação intermediária (0,4kg / 3min), obtendo uma eficiência de 77,8 %, a maior entre as corridas com tiragem natural e, devido à alta temperatura, obteve também o menor teor de CO (73ppm).

A menor temperatura das corridas com tiragem natural ocorreu na corrida 6, que obteve uma média de 770°C por 42 minutos, devido a lenha utilizada nesta corrida apresentar umidade maior em relação às outras, como já reportado anteriormente. Apesar da menor temperatura nos produtos da combustão, a corrida 6 alcançou uma eficiência de 74,8%, enquanto a corrida 7, mesmo com temperatura maior (804°C), alcançou 70,2 % de eficiência, devido ao excesso de ar maior, que leva a um maior volume dos gases.

Agora em se tratando das corridas com tiragem induzida, através da tabela 11 é possível notar que as temperaturas foram menores e com oscilações menores

comparadas às corridas com tiragem natural. Isso aconteceu porque com a tiragem induzida, o fluxo de ar de combustão foi bem maior, isto é, o excesso de ar foi muito alto, o que esfriou os gases, diminuindo a temperatura.

TABELA 11 – TEMPERATURA MÉDIA TEMPORAL DA BASE DA CHAMINÉ NO PERÍODO EM REGIME

Corrida	$T_{\text{média}}(^{\circ}\text{C})$	$\sigma(^{\circ}\text{C})$	Período em regime (min)
1	786	39	17
2	817	23	36
3	840	27	67
4	811	23	30
5	830	35	55
6	770	22	42
7	804	21	32
8	874	26	31
9	817	19	50
10	570	13	30
11	500	19	75
12	402	13	60
13	395	6	92
14	415	18	80
15	490	16	100
16	345	9	60
17	365	14	90
18	410	12	97

NOTA: $T_{\text{média}}$: Temperatura média no período em regime

σ : desvio padrão

FONTE: O autor (2008)

Ao comparar as corridas com tiragem natural e as corridas com tiragem induzida, verificou-se que quanto maior o excesso de ar, menor a temperatura dos gases, comprovando o que alguns autores reportaram (e.g VAN WYLEN, 1998). Entretanto, isso não significa menor eficiência, pois a baixa temperatura em alguns casos é contrabalanceada com o alto volume de gases, como ocorreu nas corridas 10, 11 e 12.

No item 5.3.3, são apresentados gráficos de eficiências relacionando todas as corridas para tiragem natural e para tiragem induzida.

Além da temperatura da base da chaminé (canal 0), foram medidas as temperaturas em outros seis pontos da fornalha, apresentados na figura 28, localizada no item material e métodos. A tabela 12 apresenta a média das temperaturas (°C) de cada termopar durante o período em regime.

As maiores temperaturas de cada corrida foram no termopar do canal 2, do início da câmara de combustão. Apesar de ter sido montada uma proteção para o termopar, como reportado no item material e métodos, a temperatura medida pode ter sofrido influência da chama, já que este termopar se encontrava logo na saída da zona de pirólise. Portanto, a temperatura dos gases dentro da câmara de combustão, durante as reações, reporta ao termopar do canal 1.

Nas corridas com tiragem natural (1 a 9), observa-se temperaturas próximas a 1000 °C na câmara de combustão, fator que indica que as reações de combustão estão ocorrendo bem, e acompanhando o ritmo da liberação de voláteis pela pirólise. Nestas corridas, o CO, formado primeiramente, está oxidando e se transformando em CO₂, características de uma combustão completa, fato comprovado pelos baixos teores de CO medidos pelo analisador.

É possível notar ainda que nas corridas 16, 17 e 18, com tiragem induzida, e onde o excesso de ar foi maior, a temperatura da zona de pirólise é maior do que na câmara de combustão, o que significa que as reações de combustão não estão acompanhando o ritmo de liberação de voláteis da pirólise, o que leva à combustão incompleta, com alto teor de CO nos gases de combustão.

Na coluna dos termopares dos canais 5 e 6, que medem a temperatura da pele da câmara de combustão e da pele da zona de pirólise, respectivamente, são apresentados a máxima temperatura alcançada, pois nesses canais a temperatura não estabilizou, fato somente observado na corrida 07, pois nas corridas anteriores os mesmos não foram utilizados por problemas de atrasos com o fabricante.

Devido a esse fato, após a corrida 07, foi realizada uma corrida teste com maior duração. E verificou-se que mesmo uma corrida mais longa, a temperatura de pele da

câmara de combustão continuou a aumentar, mas a temperatura da base da chaminé manteve o regime, como observado nas figuras 74 e 75.

TABELA 12 – TEMPERATURA MÉDIA EM °C NO PERÍODO EM REGIME DE CADA TERMOPAR

Corridas	Canal do Termopar						
	0	1	2	3	4	5	6
1	786	825	853	702	662	-	-
2	817	871	932	725	645	-	-
3	840	925	987	745	740	-	-
4	811	847	895	723	656	-	-
5	830	892	975	737	696	-	-
6	770	814	866	686	665	-	-
7	804	862	904	715	612	98	193
8	874	957	1015	789	688	132	261
9	817	884	963	720	642	96	246
10	570	623	696	524	568	88	175
11	500	540	601	465	457	87	161
12	402	430	469	378	359	73	118
13	395	426	482	368	401	63	164
14	415	446	506	386	383	68	171
15	490	524	591	454	448	83	229
16	345	356	394	328	392	59	155
17	365	389	432	356	434	62	161
18	410	429	477	388	458	69	144

FONTE: O autor (2008)

NOTA: AS células em branco se referem à corridas em que não havia o termopar indicado.

Dados: 0 – base da chaminé
 1 – meio da câmara de combustão
 2 – início da câmara de combustão
 3 – topo da chaminé
 4 – zona de pirólise
 5 – pele da câmara de combustão
 6 – pele da zona de pirólise

Através da figura 74, observa-se mesmo depois de 5 horas de experimento, pode-se verificar que a temperatura de pele da câmara de combustão ainda não havia

estabilizado por completo, o que significa que a estrutura da fornalha ainda não havia atingido saturação de aquecimento.

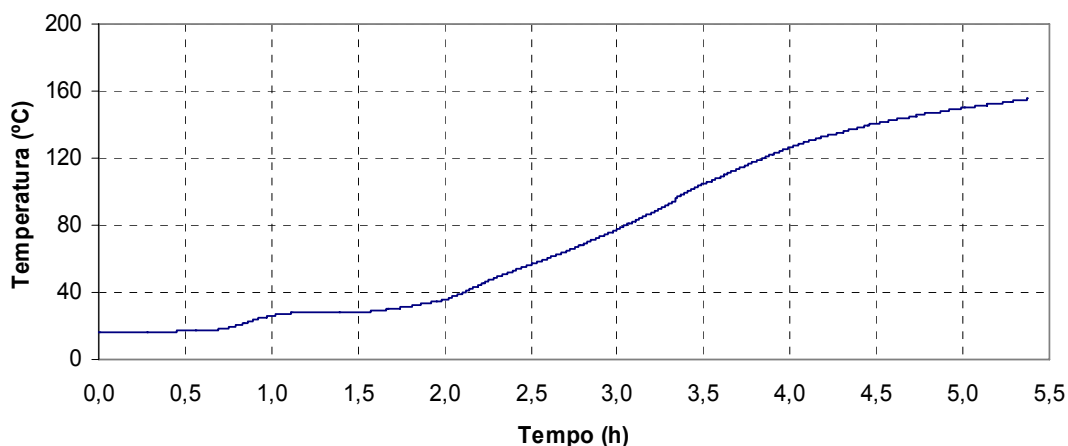


FIGURA 74– VARIAÇÃO DE TEMPERATURA DA PELE DA CÂMARA DE COMBUSTÃO COM O TEMPO NA CORRIDA DE MAIOR DURAÇÃO

Porém, pode-se perceber através da figura 75, que apesar da temperatura de pele da câmara ainda não ter estabilizado, a temperatura da base da chaminé não sofreu alterações significativas após o tempo habitual das corridas experimentais (3 horas e meia). Assim, optou-se por continuar mantendo o tempo médio nas corridas seguintes.

Da análise da temperatura como fator de influência na eficiência da fornalha, é possível concluir que a eficiência das corridas experimentais não foi diretamente proporcional à temperatura, do que se conclui que outros fatores interferem na eficiência, como o excesso de ar, como será apresentado no item 4.3.3 a seguir.

4.3.3 Excesso de ar

Nas corridas com tiragem natural, o fator excesso de ar foi em média 1,8, com desvio padrão (σ) de 0,06. Já nas corridas com tiragem induzida, o fator excesso de ar foi em média 4,27 com desvio padrão (σ) de 0,6.

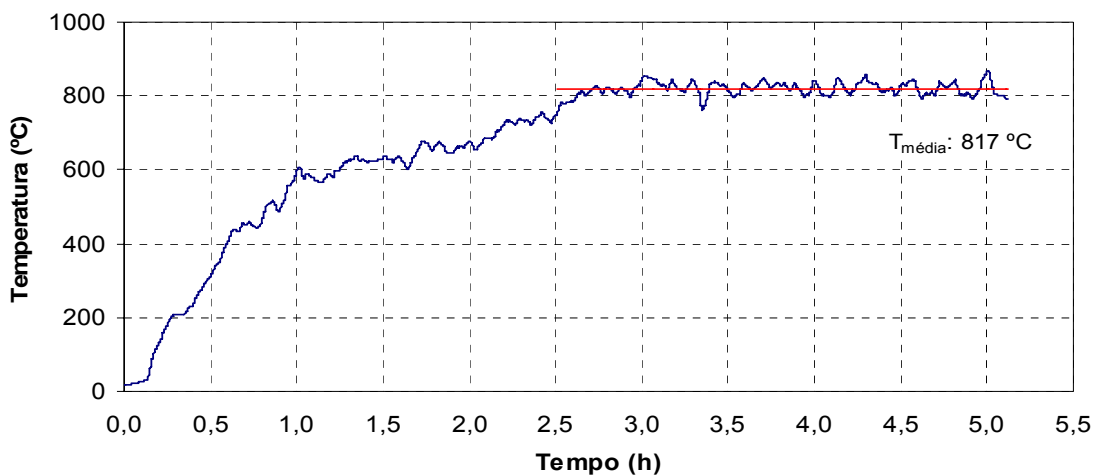


FIGURA 75 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA DA BASE DA CHAMINÉ DURANTE CORRIDA DE MAIOR DURAÇÃO

Verificou-se que nem sempre um menor excesso de ar leva a uma maior eficiência, como observado na figura 76. Em algumas corridas com tiragem induzida, o elevado excesso de ar compensou a baixa temperatura alcançada, contribuindo para o aumento da eficiência, porém o teor médio de CO foi elevado, e conseqüentemente o teor de hidrocarbonetos pesados (C_xH_y) também, já que o CO é um indicativo destes, quanto maior a concentração do primeiro, maior será a do segundo (BUSSMAN 1988 *apud* BORGES 1994), o que comprometeria a qualidade dos grãos durante a secagem. No item 4.5.4 deste capítulo será apresentada a relação entre o teor médio de CO obtido neste trabalho e o teor de C_xH_y estimado.

Como já visto na revisão bibliográfica, o valor ideal do fator excesso de ar para combustão de lenha é na faixa de 1,3 a 1,5. Porém, na prática é difícil alcançar esses valores. Borges (1994), por exemplo, realizou experimentos com um fogão a lenha, também de fluxo co-corrente, e obteve um fator excesso de ar em média 1,73.

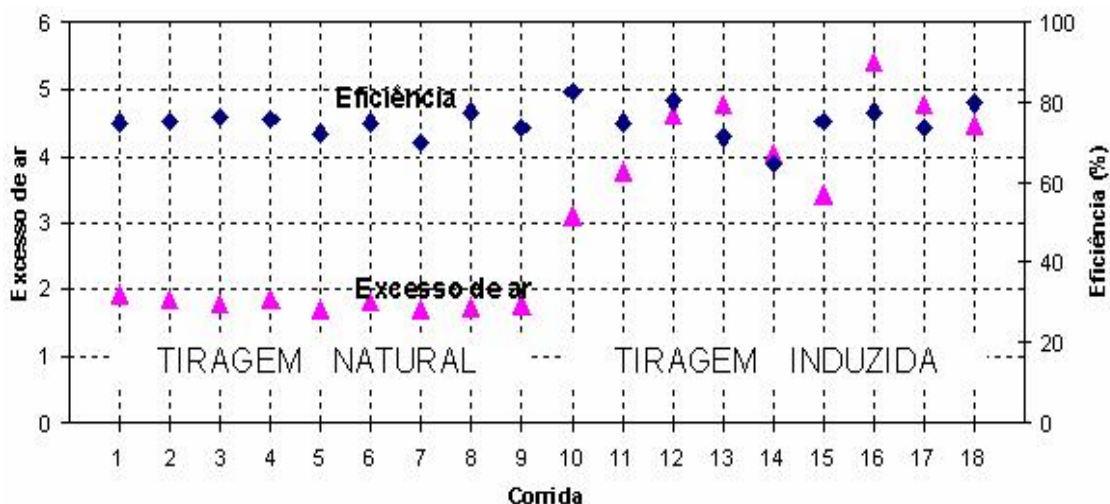


FIGURA 76 – RELAÇÃO DA EFICIÊNCIA COM O EXCESSO DE AR

Depois de apresentados os resultados da temperatura e excesso de ar como fatores que influenciaram na eficiência da fornalha, será analisada no próximo item a relação desses fatores com as variáveis utilizadas no planejamento experimental: área de grelha e carga de lenha, para os dois sistemas de tiragem utilizados, natural e induzida.

4.4 ÁREA DE GRELHA X CARGA DE LENHA

Neste item serão apresentados os resultados da eficiência das fornalhas de acordo com as variáveis do planejamento experimental. Apesar de terem sido utilizadas as mesmas áreas de grelha e os mesmos regimes de alimentação para os dois sistemas de tiragem, constatou-se uma grande diferença nas tendências de eficiência entre os dois sistemas de tiragem, e portanto estes serão analisados separadamente.

a) Tiragem Natural

A figura 77 apresenta o gráfico geral relacionando eficiência, área de grelha e alimentação para as corridas com tiragem natural.

Através dela, percebe-se que para a maior área de grelha ($0,13 \text{ m}^2$), quanto mais rica a alimentação, maior a eficiência. Entretanto, as eficiências foram muito próximas

para os 3 regimes de alimentação com essa área de grelha, e considerando que a incerteza foi em média 2,5 %, as eficiências das corridas com maior área de grelha podem ser consideradas equivalentes.

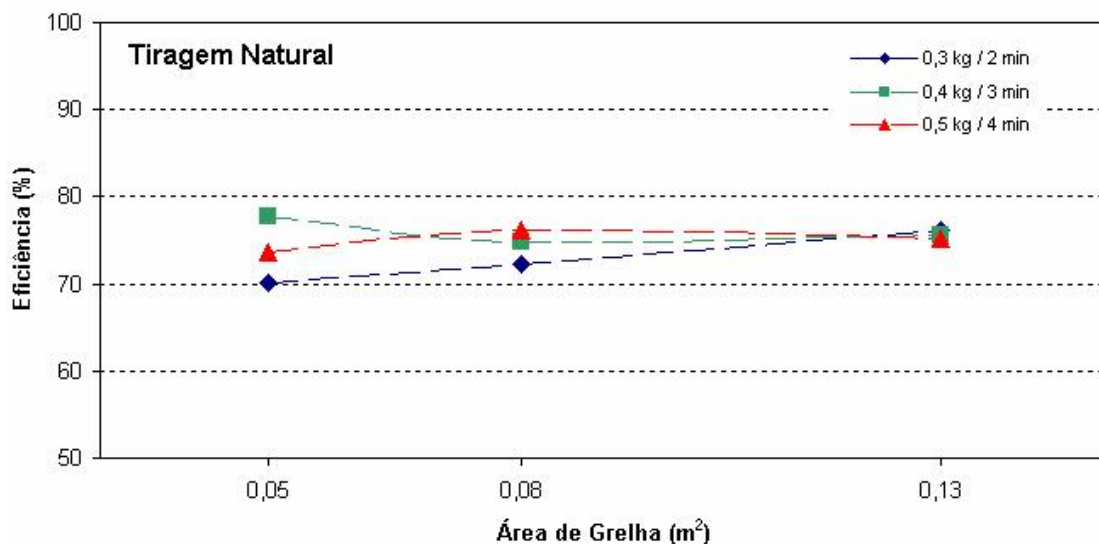


FIGURA 77 - EFICIÊNCIA vs. ÁREA DE GRELHA vs. ALIMENTAÇÃO PARA TIRAGEM NATURAL

Já para as menores áreas de grelha, as maiores eficiências foram com as alimentações mais pobres. Para a área de grelha de 0,08 m², o melhor desempenho foi com a alimentação mais pobre (0,5 kg / 4 min), já para a menor área de grelha (0,05 m²), foi com a alimentação intermediária (0,4 kg / 3min).

A maior eficiência foi observada na corrida 08 (77,8%), com a menor área de grelha e alimentação intermediária (0,4kg / 3min), atingindo a maior temperatura em regime (874°C), com fator excesso de ar 1,74 e concentração de O₂ nos gases de combustão de 8,92 %. Dentre todas as corridas com tiragem natural, nessa corrida ocorreu a melhor distribuição da lenha pelo espaço (grelha), e a melhor utilização do O₂ nas reações de combustão.

Para a área de grelha intermediária (0,08 m²), o melhor desempenho foi na corrida 4, com a alimentação mais pobre (0,5kg / 4min), eficiência de 76,1% e fator excesso de ar 1,85, temperatura média de 811 °C, e um teor médio de CO de 120 ppm. É importante lembrar que a corrida 6, com área de grelha 0,08 m² e alimentação 0,4kg

/ 3min atingiu uma temperatura menor em comparação às outras corridas com tiragem natural (770°C), devido à maior umidade da lenha nesta corrida. Portanto, se a umidade da lenha na corrida 6 estivesse na média das outras corridas, provavelmente a temperatura seria maior, e como consequência, a corrida 6 obteria uma maior eficiência.

Já para a área de grelha de 0,13 m², o melhor desempenho foi a corrida 3, com alimentação mais rica (0,3kg / 2min), que atingiu uma temperatura de 840°C em regime por um período de 67 minutos, o excesso de ar foi 1,80, um pouco menor do que a corrida 4, e o teor de CO foi de 85ppm, atingindo uma eficiência de 76,2%.

O pior desempenho da fornalha durante as corridas com tiragem natural foi na corrida 7, com a menor área de grelha (0,05 m²) e a alimentação mais rica (0,3 kg / 2min), que atingiu uma eficiência de 70,2%. A área de grelha foi pequena para muita lenha, e com isso a temperatura não subiu muito em relação às outras corridas, atingiu 804°C por um período de 32 minutos em regime. A concentração de O₂ nos gases de combustão foi de 8,73%.

Vale ressaltar que as incertezas das eficiências das corridas com tiragem natural foram em torno de 2,5 %, portanto, as eficiências das corridas com maior área de grelha (1, 2 e 3) podem ser consideradas equivalentes, e as corridas com área de grelha intermediária (4, 5 e 6), principalmente as com os regimes alimentação mais pobres, foram muito próximas.

O excesso de ar nas corridas com tiragem natural variou de 1,71 a 1,93. Na literatura, o valor ideal de excesso de ar para queima de combustível sólido varia entre 1,3 e 1,4, para uma fornalha tradicional (fluxo contra-corrente). Contudo, fabricantes de equipamento de análises de gases adotam uma faixa maior de excesso de ar (entre 1,70 e 1,85) para combustão de lenha, devido à prática adquirida.

Em experimentos realizados com fornalhas a lenha relatados na literatura, o excesso de ar obtido não chegou ao ideal, segundo a literatura. Como por exemplo no trabalho de Borges (1994), o excesso de ar ficou em média 1,73.

b) Tiragem Induzida

As corridas com tiragem induzida não atingiram os requisitos de uma corrida válida, devido à temperatura média no período em regime ser inferior à 700° C.

Com o exaustor na saída da chaminé, a quantidade de O₂ que passava pela chaminé foi muito alta, ou seja, um excesso de ar muito alto, e o regime de alimentação não foi suficiente para a tiragem, o que esfriou os gases, diminuindo a temperatura, e interferiu nas reações de combustão. A figura 78 apresenta o gráfico geral relacionando eficiência, área de grelha e alimentação, nas corridas com tiragem induzida.

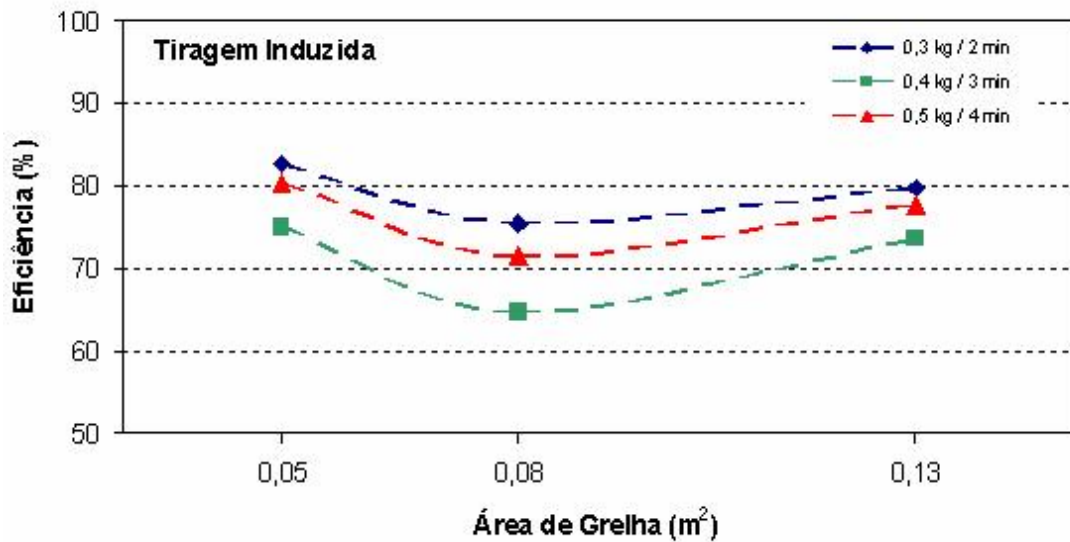


FIGURA 78 - EFICIÊNCIA vs. ÁREA DE GRELHA vs. ALIMENTAÇÃO PARA TIRAGEM INDUZIDA

As maiores eficiências foram com a alimentação mais rica, obtiveram os menores excessos de ar e as maiores temperaturas, entre as corridas com tiragem induzida.

As corridas com alimentação mais pobre, apesar de alcançarem temperaturas mais baixas, obtiveram um alto excesso de ar, que contribuiu para aumentar a eficiência da fornalha, pois o alto volume de gases compensou os baixos valores de entalpia, devido às baixas temperaturas.

Já as corridas com alimentação intermediária, alcançaram baixas temperaturas,

mas o excesso de ar, apesar de alto, não foi suficiente para aumentar a potência útil.

A corrida 10 obteve uma eficiência de 82,8 %, sendo essa a maior eficiência entre as corridas da fornalha. Com a menor área de grelha ($0,05 \text{ m}^2$) e a alimentação mais rica ($0,3 \text{ kg} / 2 \text{ min}$), obteve um excesso de ar de 3,10, o menor entre as corridas com tiragem induzida, e a maior temperatura média em regime (590°C). O teor médio de CO nos gases de combustão foi 652 ppm.

A corrida 14 obteve a menor eficiência, de 64,7 %, com área de grelha de $0,08 \text{ m}^2$ e alimentação $0,4 \text{ kg} / 3 \text{ min}$, com excesso de ar 4,04 e temperatura média 415°C no período em regime. Não foi a menor temperatura, nem o maior excesso de ar, porém, o excesso de ar não foi suficiente para compensar a temperatura. O teor médio de CO foi de 1135 ppm.

A incerteza da eficiência das corridas com tiragem induzida foi em torno de 2,4%, e só interfere nas corridas com alimentação mais rica (linha azul) e com a alimentação mais pobre (linha em vermelho), pois estas ficam muito próximas.

Como já mencionado, devido a alta tiragem, o consumo de combustível foi muito alto, e a alimentação planejada não supriu a necessidade da fornalha. Devido a esses resultados, foi feita uma corrida extra, de caráter exploratório, para determinar o regime de alimentação de lenha ideal para a tiragem induzida disponível para a fornalha. A figura 79 mostra a variação de temperatura com o tempo durante a corrida exploratória.

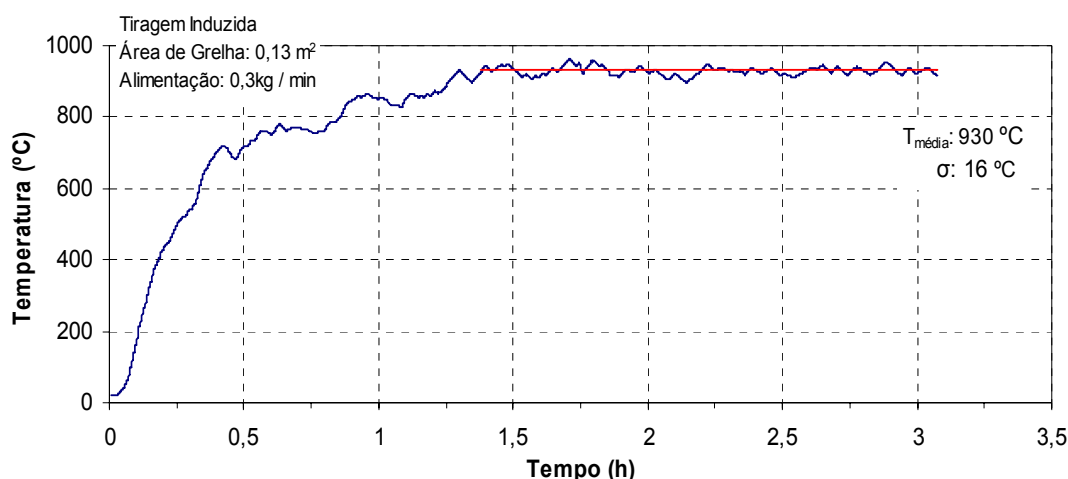


FIGURA 79 – VARIAÇÃO DA TEMPERATURA COM O TEMPO NA CORRIDA EXPLORATÓRIA DE TIRAGEM INDUZIDA

Com a maior área de grelha ($0,013 \text{ m}^2$) e uma alimentação de $0,3 \text{ kg / min}$, o dobro da alimentação mais rica utilizada nos experimentos, foi alcançada uma temperatura média de $930 \text{ }^\circ\text{C}$ por um período de 90 min. O teor de O_2 nos gases de combustão foi de $9,50 \%$, levando a um excesso de ar de $1,82$, que está dentro da faixa de valores de excesso de ar das corridas com tiragem natural. Com alta temperatura na câmara de combustão, o teor de CO foi baixo, na média de 73 ppm , como apresentado na figura 80, e o desvio padrão foi menor, comparado às outras corridas com tiragem induzida.

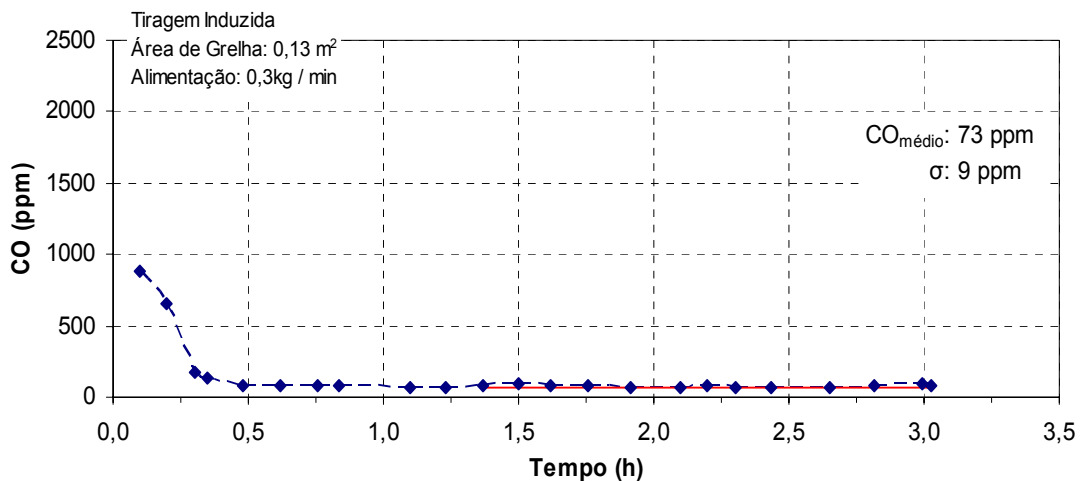


FIGURA 80 – VARIAÇÃO DO CO COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA EXPLORATÓRIA DE TIRAGEM INDUZIDA

Com o dobro da alimentação normalmente utilizada, a energia nominal nessa corrida foi de $79,7 \text{ kW}$ e a energia útil $69,2 \text{ kW}$, levando a uma eficiência de $86,8 \%$.

Além da temperatura e do excesso de ar, calculado através da concentração de O_2 nos gases de combustão, a concentração dos gases, produtos da combustão também foram analisadas neste trabalho.

4.5 CONCENTRAÇÃO DOS GASES

Este item apresenta a análise e discussão sobre a concentração dos gases obtidos no topo da chaminé da fornalha. São eles: CO, medido diretamente pelo analisador em ppm; O_2 , também medido diretamente pelo analisador em % base

volumétrica; CO₂, calculado com base no CO e O₂ medidos pelo analisador, como já reportado no item 4.5 deste trabalho, e NO_x, calculado pelo analisador pela soma do NO medido e as concentrações de NO₂.

4.5.1 CO

O teor de CO nas corridas com tiragem natural foi menor do que nas corridas com tiragem induzida, devido aos níveis térmicos atingidos. E convém ressaltar que, nas corridas com tiragem induzida, a variação de CO foi bem maior que nas corridas com tiragem natural.

O teor de CO nos gases de combustão variou de 73 a 171 ppm para as corridas com tiragem natural, enquanto que em uma fornalha de fluxo contra-corrente essa média chega à 4000 ppm, como reportado por alguns autores na revisão bibliográfica desta dissertação. Nas corridas com tiragem induzida, devido ao alto excesso de ar e consequentemente as temperaturas mais baixas, o CO foi mais alto, variando de 652 a 1195 ppm, com um maior desvio padrão.

Com uma tiragem excessiva para a fornalha, não houve tempo necessário de permanência dos gases na câmara de combustão, e a mistura do o oxigênio com os gases não foi completa, diminuindo a taxa de liberação de calor e interrompendo as reações de combustão. Este fato comprova a afirmação de alguns autores, que mesmo com excesso de ar é possível obter altos teores de CO nos produtos da combustão, devido ao projeto aerodinâmico da fornalha (e.g. VAN WYLEN, 1998; VLASSOV, 2001 ;NOGUEIRA e LORA, 2003).

Além do CO, o O₂ também é um gás medido diretamente pelo analisador, e com esses dois valores foi possível estimar a concentração de CO₂ nos gases de combustão. Os resultados sobre os dois últimos são relatados no próximo item.

4.5.2 O₂ e CO₂

A presença de O₂ nos gases de combustão indica que há excesso de ar de combustão, e o CO₂ é um gás produto da combustão completa.

O ar de combustão é o ar que entra para reagir com os voláteis pirolisados e

para a combustão do coque. Da fração que participa das reações com os voláteis ou seja, o ar de combustão reage formando CO_2 , uma pequena parcela reage formando H_2O e dependendo da combustão, também forma CO . Em uma combustão teórica, não haveria O_2 e CO nos produtos da combustão, somente CO_2 e H_2O . Porém, esta é muito difícil de ser alcançada, e por isso é necessário o excesso de ar, que é calculado através do O_2 presente nos produtos da combustão. Quanto maior o O_2 nos produtos de combustão, menor o CO_2 , e vice-versa. Portanto suas curvas são opostas.

Nas corridas com tiragem natural, a concentração de O_2 foi em média 9,31% (σ : 0,3 %) e a de CO_2 foi de 11,70 % (σ : 0,3 %).

Como mencionado no item 5.3.5, na prática é muito difícil alcançar os valores de excesso de ar dito ideais pela literatura. Os fabricantes de equipamentos térmicos adotam a faixa de 7,5 a 9,5 % para o O_2 nos gases de combustão e de 11 a 13 % para o CO_2 , em fornalhas a lenha.

Nas corridas com tiragem induzida a concentração de O_2 foi em média 16,01% (σ : 0,7 %), e a de CO_2 foi de 4,95 % (σ : 0,7 %).

Nota-se a grande diferença entre os valores das corridas com tiragem natural. Diferença essa que diminuiria ou talvez nem existisse se o regime de alimentação das corridas com tiragem induzida fosse maior, como comprovado na corrida extra com tiragem induzida. Outra possibilidade seria diminuir ainda mais a tiragem.

As figuras 81 e 82 apresentam a relação entre o excesso de ar e concentração de O_2 , CO e CO_2 , das corridas com tiragem natural e induzida, respectivamente.

A tiragem natural, como é possível observar na figura 81, obteve uma concentração de O_2 menor do que a de CO_2 , um baixo excesso de ar e baixo teor de CO , indícios de uma boa combustão, caminhando para uma combustão completa. Já na tiragem induzida, o alto excesso de ar esfriou os gases, diminuindo a temperatura, e conseqüentemente, obteve um teor de CO mais alto do que nas corridas com tiragem natural, como é possível notar na figura 81, concentração de O_2 maior do que de CO_2 , alto excesso de ar e um alto teor de CO .

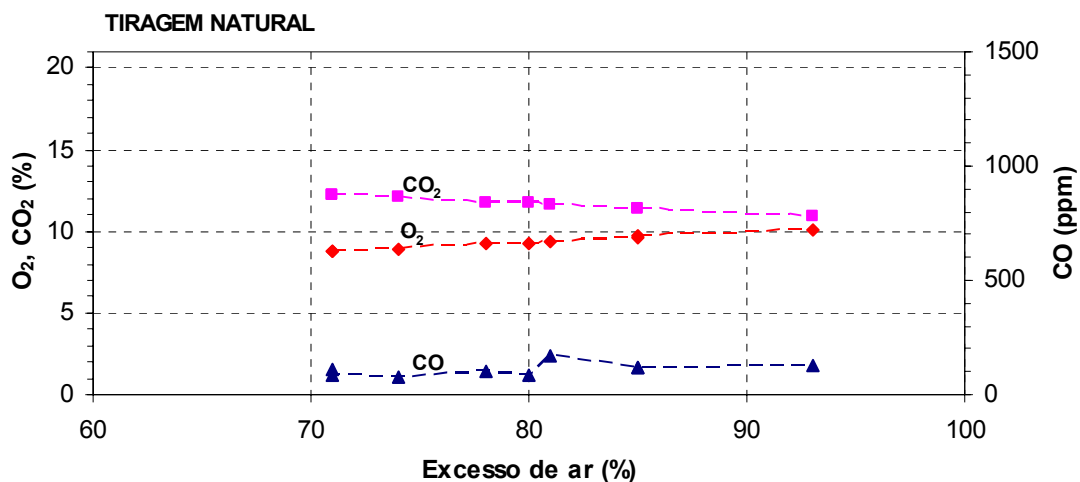


FIGURA 81 – RELAÇÃO EXCESSO DE AR E VARIAÇÃO DE O₂, CO₂ E CO NA TIRAGEM NATURAL

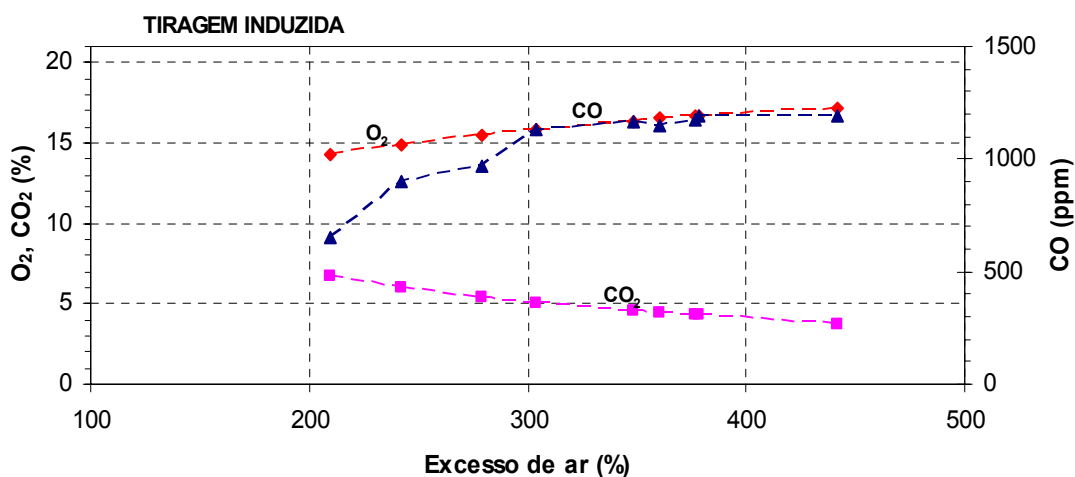


FIGURA 82 – RELAÇÃO EXCESSO DE AR E VARIAÇÃO DE O₂, CO₂ E CO NA TIRAGEM INDUZIDA

Além dos gases já apresentados, o analisador de gases utilizado neste trabalho também calcula a concentração de NO_x nos gases de combustão, através da soma do NO medido e as concentrações de NO₂. No item a seguir será apresentado uma breve discussão sobre as concentrações de NO_x medidas pelo equipamento.

4.5.3 NO_x

O teor de NO_x atinge o máximo a um excesso de ar entre 1,05 e 1,3. Diminuindo o excesso de ar, o NO_x diminui rapidamente porque o teor de O₂ diminui. Com o

aumento do excesso de ar, o teor de NO_x também diminui, devido à diminuição da temperatura da chama.

Nos experimentos realizados nesta pesquisa, pode-se perceber que quanto maior o excesso de ar, menor o teor de NO_x nos gases de combustão. Através das figuras 83 e 84, nota-se que a curva de variação do NO_x é praticamente o inverso da concentração de O_2 .

A figura 83 apresenta a variação da concentração de NO_x e O_2 nos gases de combustão durante uma corrida com tiragem natural (Corrida 03), onde a concentração de O_2 foi bem menor do que nas corridas com tiragem induzida, como apresentado na figura 84, que apresenta a variação da relação da concentração de NO_x e O_2 nos gases de combustão durante uma corrida com tiragem induzida (Corrida 11).

Pode-se perceber, que com tiragem natural, o teor de NO_x não ultrapassou 80 ppm, e com a tiragem induzida, o máximo teor foi de 30 ppm.

Além disso, segundo a Portaria Federal nº 286/93 de 12 de Março, o limite de emissão de NO_x proveniente de combustível sólido é de 320 ppm. Acima dessa concentração o NO_x é considerado prejudicial à saúde humana e ao meio ambiente. E tanto nas corridas com tiragem natural como nas corridas com tiragem induzida, o teor de NO_x não chegou nem à metade do limite máximo de emissão.

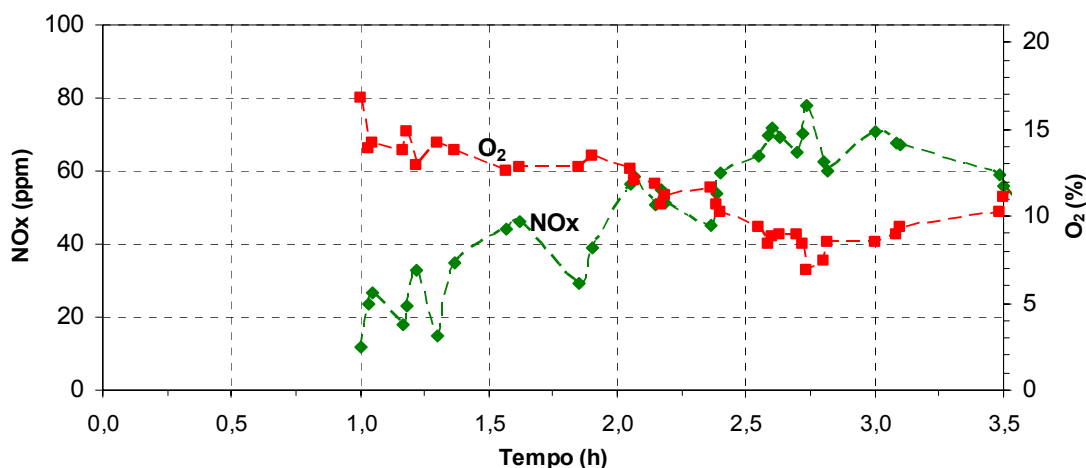


FIGURA 83 – RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NO_x E O_2 COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 3 (TIRAGEM NATURAL)

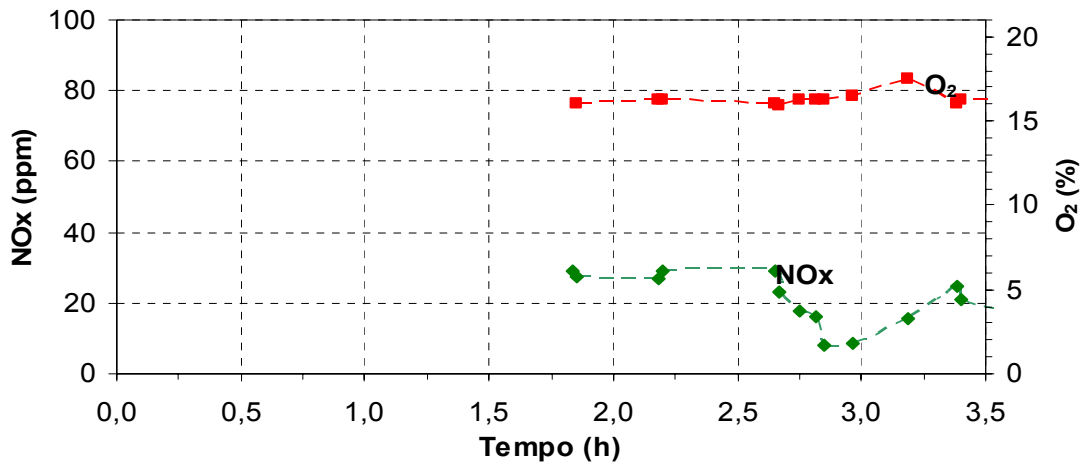


FIGURA 84 – RELAÇÃO DA VARIAÇÃO DO NO_x E O₂ COM O TEMPO DURANTE A CORRIDA 11 (TIRAGEM INDUZIDA)

4.5.4 C_xH_y

O teor de hidrocarbonetos pesados (C_xH_y) nos gases de combustão indicam a presença de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), principais contaminantes dos grãos. Para a análise do teor C_xH_y nos gases de combustão o ideal é utilizar cromatografia gasosa acoplada a espectômetro de massas, porém, não foi possível realizar esse procedimento. Portanto, o teor de C_xH_y nos gases de combustão foi estimado através da relação com a concentração de CO apresentada por Bussman (1988) *apud* Borges (1994), na figura 85.

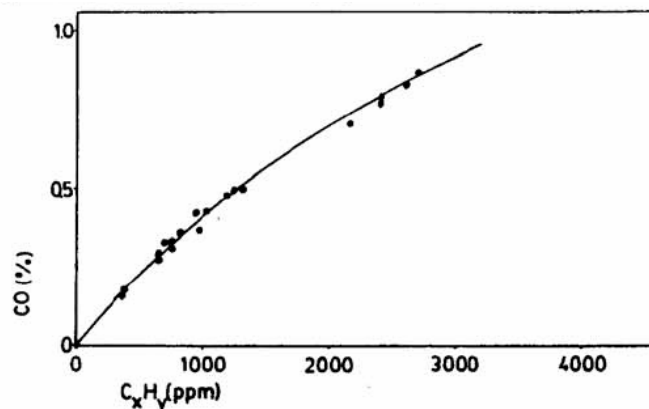


FIGURA 85 - RELAÇÃO ENTRE CONCENTRAÇÕES DE CO E C_xH_y.
 FONTE: BUSSMAN (1988) *apud* BORGES (1994)

De acordo com o gráfico, para concentrações de CO abaixo de 0,5 %, a relação CO/C_xH_y é de 1: 0,25. Portanto, com as concentrações de CO medidas pelo analisador nas corridas experimentais, nas corridas com tiragem natural o teor médio de C_xH_y foi estimado de 42 ppm, e nas corridas com tiragem natural esse valor foi de 270 ppm.

Para efeito de comparação, um estudo experimental realizado por Oanh *et al* (1999) alcançou valores de 780 ppm em média para combustão de lenha de eucalipto em uma fornalha convencional (fluxo contra-corrente).

Como já reportado na revisão bibliográfica, os HPAs são os principais responsáveis pela contaminação nos grãos durante a secagem, além de serem cancerígenos. Com essa relação estimada, é possível perceber que a fornalha de fluxo co-corrente pode emitir gases de combustão com um baixo teor desses contaminantes.

4.5 BALANÇO DE ENERGIA

Para uma análise energética, fundamental para assegurar o melhor aproveitamento da energia térmica do combustível e o bom estado operacional do equipamento, faz-se necessário, entre outras coisas conhecer os fluxos de calor envolvidos no processo. Para isso foi feito um balanço de energia na fornalha. Porém, há incertezas que não foram possíveis de se calcular, como o poder calorífico da lenha, que é calculado através da composição do combustível. Há também o fluxo de gases, que é estimado por cálculos, e não medido.

Na tiragem natural o inbalanço médio no balanço energético é de 7 ± 2 %, enquanto que na tiragem induzida, esse valor é 15 ± 5 %.

A maior perda de energia ocorreu pelas paredes da fornalha, principalmente nas corridas com tiragem natural, onde foram alcançadas as maiores temperaturas.

Na corrida 8, com tiragem natural e a maior temperatura entre todas as corridas, 874°C na base da chaminé, e a temperatura média na câmara de combustão 957 °C, a perda de energia pelas paredes foi de 7,2 kW. Já a corrida 16, com tiragem induzida, obteve a menor temperatura média entre todas as corridas, com 345°C na base da chaminé e 360 °C na câmara de combustão, a perda de energia pelas paredes foi de 3,01 kW.

A perda de energia devido às cinzas e carvão no cinzeiro foi menor que 0,1%, devido a pouca quantidade obtida destes produtos, portanto não foram consideradas significativas no balanço energético.

É possível que o maior percentual de erro do balanço energéticos das corridas com tiragem induzida em relação à tiragem natural seja devido à perda de energia pelo alcatrão produzido, que não pôde ser calculado, apenas estimado indiretamente. E vale ressaltar que nas corridas com tiragem induzida o teor de CO foi maior, o que indica um maior teor de alcatrão.

A tabela geral com o balanço de energia de todas as corridas encontra-se no apêndice 10.

5 CONCLUSÃO

Com os experimentos realizados e os resultados obtidos, concluí-se que, com uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente é possível obter gás de combustão com aproveitamento de 75% de energia em média, temperatura média de 820° C para tiragem natural e 430 °C para tiragem induzida, e um baixo teor de monóxido de carbono (CO), indicando um baixo teor de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), em comparação à emissão das fornalhas convencionais (fluxo contra-corrente) principais contaminantes dos grãos.

A literatura aponta um teor típico de CO de 4000 ppm para combustão da lenha em fornalhas convencionais (fluxo contra-corrente), enquanto que na fornalha utilizada neste trabalho (fluxo co-corrente) alcançou-se valores de CO de até 73 ppm no mínimo e 1200 ppm no máximo. Com estes valores foi possível estimar indiretamente o teor de hidrocarbonetos pesados (C_xH_y), que indicam a presença de HPAs, obtendo-se um mínimo de 18 ppm e máximo de 300 ppm, sendo que na literatura, encontrou-se um valor de 780 ppm para emissão de C_xH_y em fornalhas a lenha tradicionais.

Cabe ressaltar que os gases de combustão emitidos pela chaminé da fornalha ainda serão diluídos até alcançar aproximadamente 100 °C, para entrada no secador, o que diminuirá ainda mais o teor de HPAs.

Além das vantagens mencionadas acima, ainda se pode concluir que, na fornalha de fluxo co-corrente, com a pirólise dosada ao longo da queima, evita-se a emissão de particulados incandescentes, ou fagulhas, que podem levar ao risco de ignição e incêndio, comprometendo o funcionamento do secador.

Este trabalho retomou os estudos sobre o a combustão de fluxo co-corrente, visto que os últimos trabalhos realizados datam de mais de dez anos, pois o dimensionamento do protótipo construído neste trabalho foi baseado em um protótipo construído em 1990.

Não foi possível apresentar uma correlação matemática para fornalhas de fluxo co-corrente em escala industrial, pois para isso seria necessário no mínimo duas réplicas de cada experimento, o que não ocorreu devido à problemas operacionais e por questão de tempo. Entretanto com base nos experimentos realizados, acredita-se

que com algumas modificações no projeto da fornalha, poderão ser alcançadas eficiências energéticas maiores.

Para projetos futuros recomendam-se algumas mudanças no dimensionamento do protótipo.

A primeira recomendação é sobre a câmara de combustão. Com uma câmara em formato cilíndrico horizontal, ao invés de retangular, e uma alimentação tangencial, cria-se uma vorticidade nos gases em combustão, contribuindo para aumentar o tempo de residência dos gases na câmara de combustão, promovendo uma melhor mistura dos gases com o oxigênio, o que contribui para que as reações de combustão se completem, aumentando a eficiência térmica da fornalha e diminuindo a emissão de CO e HPAs.

Ainda sobre a câmara de combustão, recomenda-se uma outra alternativa: manter o formato retangular e construir um caminho sinuoso no interior da câmara, forçando a uma circulação dos gases, proporcionando também um maior tempo de residência. Porém, essa alternativa pode levar ao efeito corta-chama, que criaria zonas com temperaturas diferentes, e algumas abaixo de 650 °C, comprometendo a queima do CO e contribuindo para a formação do alcatrão.

E por último, referindo ao sistema de tiragem, recomenda-se um melhor controle da tiragem, através de um *damp*er na chaminé, assim, pode-se aumentar ou reduzir a tiragem à medida que a fornalha necessitar.

Com as modificações sugeridas acredita-se que será possível obter um melhor desempenho de fornalhas a lenha de fluxo co-corrente, e assim propor uma correlação matemática para fornalhas desse tipo em escala industrial.

REFERÊNCIAS

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S. & BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 2. ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002.

BAZZO, E.; **Geração de Vapor**. Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2ª ed. 1995. 216p.

BEJAN, A.; **Advanced Engineering Thermodynamics**. 2 ed. New York: Wiley-Interscience, 1997. 849p.

BHATT, M.S. **Thermal rating and design of woodstoves: A new approach**. International Journal of Energy Research, vol. 14, 11p. 1990a.

BHATT, M.S. **Towards the design of high efficiency woodstoves**. International Journal of Energy Research, vol. 14, 20p. 1990b.

BORGES, T.P. **Fogão a lenha de combustão limpa**. Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Campinas, SP. 1994.

BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G. & HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis and model building**. New York: John Wiley & Sons, 1978

BRYDEN, M. ;STILL, D.; SCOTT, P.;OGLE, D. **Design Principles for Wood Burning Cook Stoves**. Aprovecho Research Center. Shell Foundation Partnership for Clean Indoor Air. Johannesburg, 2002.

CARVALHO, J.A; LACAVA, P.T. **Emissões em processos de combustão**. São Paulo: Editora Unesp, 2003.

CRAIG, S.J; MCMAHON, J.F. **The effects of draft control on combustion**. Isa Transactions. Vol 35. p.345-349 . Cleveland, USA. 1996.

FDT, **Folha de Dados Técnicos**, IBAR

FRISK, T.; LORA, E. E. S.; NOGUEIRA, L. A. H.; TROSSERO M. A. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Brasília: ANEEL, 2000. 144p p. 12-15.

GLINKOV, M.A., GLINKOV, G.M., **A General Theory of Furnaces**. Moscow: Mir Publishers. 1980.

GOMEZ, E.A, **A Tecnologia de Pirólise no Contexto da Produção Moderna de Biocombustíveis: Uma Visão Perspectiva**. Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético-NIPE Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP, 2000a.

GOMEZ, E.A., CORTEZ, L.A.B., PEREZ, J.M.M., SEYE,O., LINERO, F.A.B., **Projeto de**

pirólise rápida contínua de biomassa com ar em reator de leito fluidizado atmosférico. Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP. Encontro de Energia no Meio Rural, 2000b.

GUARDABASSI, P. M., **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia: perspectivas para países em desenvolvimento.** Dissertação (Mestrado – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia) – EP / FEA / IEE / IF da Universidade de São Paulo. SP, 2006. 123p. : il.; 30cm.

GROFF,R. **Secagem de Grãos.** Revista Seednews, n. 15 março/abril, 2002.

HANAOKA, T.; INOUE, S.; U.S.; O,T.; MINOWA,T.; **Effect of woody biomass components on air-steam gasification.** Biomass and bioenergy 28. p69-76. 2005.

HEDMAN, B.; NASLUND,M.; MARKLUND,S.; **Emission of PCDD/F, PCB, and HCB from Combustion of Firewood and Pellets in Residential Stoves and Boilers.** Environ. Science. Technol.2006, 40,4968-4975

HELENE, O.A.M.; VANIN, V.R.; **Tratamento estatístico de dados.** Edgar Blücher: São Paulo, 1981.

INCROPERA, F.P., DEWITT, D.P., **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** LTC: Rio de Janeiro – RJ, 2003. 5ª Edição.968p.

KLOCK, U.; MUINZ G.; HERNANDEZ, J.A.; ANDRADE, A.L. **Química da Madeira.** Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. UFPR, 2005.

JENKINS, B.M.; BAXTER, L.L.; MILES Jr., T.R.; MILES, T.R.; **Combustion Properties of Biomass.** Fuel Processing Thecnology. Vol 54, p. 17-46, 1998.

LEWANDOWSKI, I.; KICHERER, A.. **Combustion quality of biomass: practical relevance and experiments to modify the biomass quality of *Miscanthus x giganteus*.** European Journal of Agronomy vol. 6 p. 163- 177, 1997.

MARTIN.J.; **Biomassa energética : Combustão de Biomassa.** UCL: Louvain Bélgica. I Escola de combustão. Florianópolis – SC, 2007.

MARTINS, G. **Geladeira de Absorção Acionada por um fogão a lenha** – em estudo teórico experimental. Tese de mestrado, Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP, 187p, 1989.

MARTINS, R.R.; FRANCO,J.B.R.; OLIVEIRA, A.V.; ANGONESE, C.; **Secagem de grãos para propriedade familiar.** Armazenagem de grãos / Irineu Lorini, Lincoln Miike, Vildes Scussel – Campinas: IBG, 2002.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.**

Bioresource Technology vol. 83 37–46, 2002.

NIENHUYS, S.; AMATYA, S.; SHRESTHA, R. **Cooking Stove Improvements**. Sustainable Technology Adaptive Research and Implementation Centre-Nepal. Kathmandu, Nepal, 2005.

NOGUEIRA, L.A.H., LORA, E.E.S.; **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. 2ª edição. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 199p. p 50-80

NOGUEIRA, M.F.M.; **Biomassa energética : Caracterização de Biomassa**. Grupo de Energia, Biomassa e Meio Ambiente. Universidade Federal do Pará. I Escola de combustão. Florianópolis – SC, 2007.

OANH, N.T.; REUTEGARD, L.B; DUNG, N.T.; **Emission of polycyclic aromatic hydrocarbons and particulate matter form domestic combustion of selected fuels**. Environmental Science. Technology. **1999**, 33, 2703-2709

OLSSON, M.; KJALLSTRAND, J. **Chimney emissions from small-scale burning of pellets and fuelwood—examples referring to different combustion appliances**. Biomass and Bioenergy , vol. 27 557–561, 2004

PÊRA, H;. **Geradores de vapor**. Departamento de Engenharia Mecânica. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Fama: São Paulo, 1996.

PERAGALLO TORREIRA, R. **Geradores de Vapor**. São Paulo: Companhia Melhoramentos. 1995, 705p.

PINHEIRO, P.C.C., VALLE, R.M., **Controle de combustão: otimização do excesso de ar**. In: Congresso de equipamentos e automação da indústria química e petroquímica. Rio de Janeiro – RJ. Anais: Automação Industrial São Paulo: Associação Brasileira da Indústria Química e de Produtos Derivados, , p.157-162. 1995

RAGOSSNIG, H.; **Heating up the EU biomass market**. Renewable energy focus. November/December 2007.

REGINATO, A.L., IOSHIMOTO, E. **Tecnologias de detecção e monitoração de gases perigosos e tóxicos**. Revista Gás Brasil 11ª Edição. 2002.

SILVA, L. C. da. **Secagem de grãos**. Boletim Técnico: AG: 04/05. Departamento de Engenharia Rural, UFES. 2005.

SILVA, M., SILVA, J.N., TINOCO, I.F.F., VIEIRA, A.C, ZANATTA, F.L.,MELO,L.D., **Projeto e construção de um gaseificador de biomassa de fluxo concorrente**. Engenharia na Agricultura. V.14, n.4, p238-249., Viçosa-MG, 2006.

SIMPSON, W., TENWOLDE, A.; **Physical properties and moisture relations of wood**. Wood handbook: wood as an engineering material. Madison, WI : USDA Forest

Service, Forest Products Laboratory, 1999. General technical report FPL ; GTR-113: p. 3.1-3.24.

STREZOV, V., PATTERSON, M., ZYMLA, V., FISHER, K., EVANS, T.J., NELSON, P.F., **Fundamental aspects of biomass carbonization**. Journal of analytical and applied pyrolysis. Vol. 79. p 91-100, 2007

STREHLER, A., **Technologies of wood combustion**. Ecological Engineering, vol. 16, p.25 – 40. 2000.

VAN WYLEN. G. J. , SONNTAG. R. E., BORGNAKKE. C. ; **Fundamentos da termodinâmica**. 5ª edição. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1998. 538p. p385-400.

VERHAART, P.; KHAN, A.M.H. **Clean Burning Biomass Cookstoves**. Woodburning Stove Group. Eindhoven University of Technology: Eindhoven, NL. 1990.

VLASSOV, D., **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora UFPR, 2001. 185p.

TRINKS, W.. **Industrial Furnaces**. Vol 1. 5th edition. New York: Mawhinney, 1961.186p.

WARNATZ. J., MASS. U., DIBBLE. R.W.; **Combustion: Physical and chemical fundamentals, modeling and simulation, experiments and pollutant formation**. 3ª edição. Nova York: Springer, 2003. 302p. p33-48.

YANG, H., YAN, R., CHEN, H., HO LEE, D., ZHENG, C., **Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis**. Fuel, vol. 86. p1781-1788. 2007.

ZAINAL, Z.A.; RIFAU., A.; QUADIR, G.A.; SEETHARAMU, K.N. **Experimental investigation of a downdraft biomass gasifier**. Biomass and Bioenergy n 23, p.283-289, 2002.

APÊNDICES

APÊNDICE 01 - Dimensionamento da Fornalha

Partindo de uma potência nominal estimada de 40 kW, um poder calorífico médio da lenha de 16000 kJ/kg, calculado pela equação (5), no capítulo de revisão bibliográfica, a vazão mássica de lenha foi calculada pela equação (1a.1), e obteve um resultado de 1,5 kg / 10min.

$$\dot{m}_{lenha} = \frac{P_n}{PCI} \quad (\text{kg/s}) \quad (1a.1)$$

Com a vazão mássica de lenha, e utilizando uma taxa de combustão (N_c) de 110 kg/h.m², valor utilizado para combustão de lenha em grelha fixa de acordo com BAZZO (1995), foi calculada a área da grelha, pela equação (1a.2), obtendo um resultado de 0,13 m².

$$A_g = \frac{\dot{m}_{lenha}}{N_c} \quad (\text{m}^2) \quad (1a.2)$$

Onde A_g : área da superfície da grelha (m²);

N_c : taxa de combustão (kg/h.m²).

PCI: poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

As dimensões da zona de pirólise e da câmara de combustão foram adaptadas do trabalho experimento de Verhaart (1990), sobre uma fornalha a lenha de fluxo co-corrente. A figura 86 apresenta as dimensões da fornalha construída neste trabalho.

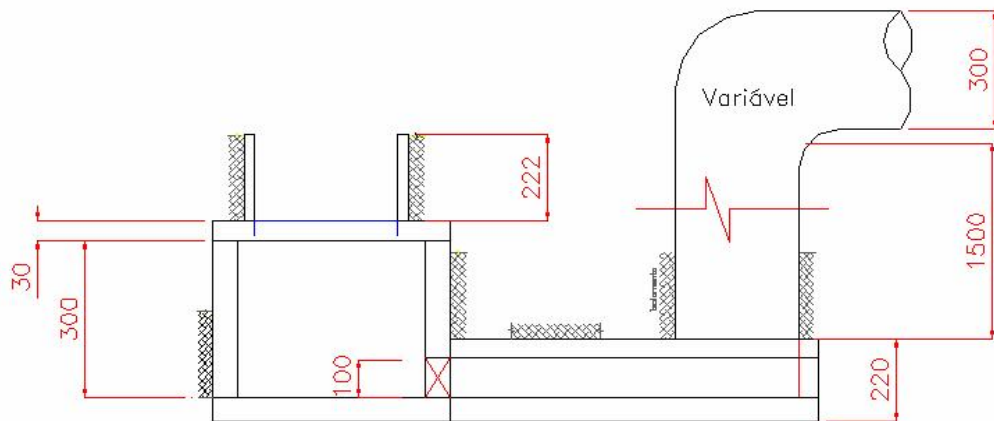
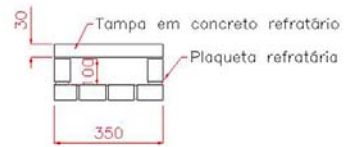
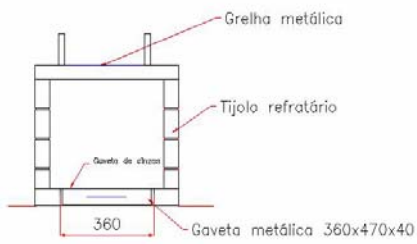
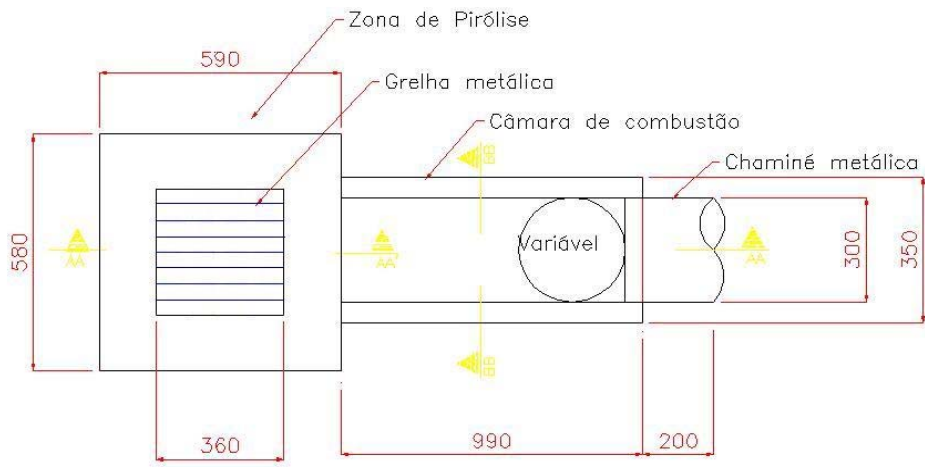


FIGURA 86 – DIMENSIONAMENTO DA FORNALHA
 FONTE: O autor (2008)

APÊNDICE 02 - *Determinação da umidade da lenha*

A determinação da umidade da madeira foi feita através do método da secagem em estufa. Em cada experimento foram colocadas três amostras da lenha utilizada na estufa marca NOVA ÉTICA modelo 400N a ± 103 °C, até atingir peso constante, como determinado pela NBR 7190/97 (KLOCK *et al.*, 2005). A umidade de cada amostra era determinada através das equações 1 e 2. Foi considerada a media da umidade das 3 amostras.

$$W_s = \frac{M_u - M_s}{M_s} \quad (1)$$

$$W_u = \frac{M_u - M_s}{M_u} \quad (2)$$

Onde M_u : massa da amostra úmida ; M_s : massa da amostra seca; $\overline{W_u}$: umidade base úmida média; $\overline{W_s}$: Umidade base seca média.

A balança analítica utilizada foi da marca BIOPRECISA, modelo FA2104N, com precisão de 0,0001 g. A tabela 13 apresenta as massas das amostras de algumas corridas.

TABELA 13 - MASSA DAS AMOSTRAS DE LENHA

Corrida	M_u (g)	M_s (g)	$\overline{W_u}$ (%)	$\overline{W_s}$ (%)
3	79,5262	69,6419	11,8	13,4
	44,5463	39,0807		
	55,4478	49,3875		
6	79,6787	67,9074	16,6	20,6
	42,7658	32,1109		
	38,5569	34,6398		
9	68,4672	59,6934	12,1	13,8
	54,5463	48,5312		
	48,4256	42,2959		
12	55,3579	48,4614	12,2	13,9
	42,3285	37,1457		
	36,1614	31,8715		
15	54,185	47,348	12,3	14,0
	49,149	43,215		
	38,275	33,599		

APÊNDICE 03 - Certificado de Calibração da Balança

1. OBJETIVO

Calibração de uma balança digital “KERN Ch15 k20”, a fim de conhecer suas características metrológicas de funcionamento real.

2. BALANÇA A CALIBRAR

Proprietário: AGROGÁS

Fabricante: KERN

Número de fabricação: WC0623630

Faixa de medição: 20g a 15 kg

Divisão: 20g

Tipo: digital

Estado de conservação: bom

3. SISTEMAS DE MEDIÇÃO PADRÃO

Medidas dos pesos padrão

Grupo 01 : 100g A, 100g B, 200g.

Grupo 02: Tijolo de 3,400 kg, Plaqueta de 1,340 kg

4. PROCEDIMENTO DO ENSAIO

A calibração foi realizada colocando-se os blocos padrão na balança a calibrar. Foi usada a faixa de medição variando de 20g a 5kg, com resolução de 20g.

Foram realizados 2 ciclos de medição, a fim de registrar também a repetitividade da balança.

Condições de ensaio: Temperatura ambiente: 20°C

5. CALIBRAÇÃO

Foi realizada a calibração da balança e constatou-se que a mesma não apresenta erros sistemáticos, conforme observado a seguir.

Ciclo 01

Massa (g)	Leitura (g)
200	200
100 A	100
100 B	100
400	400

Ciclo 02

Material	Leitura (g)
Tijolo	3,400
Tijolo + peso 200	3,600
Tijolo + peso 100A	3,500
Tijolo + peso 100B	3,500
Tijolo + peso 400	3,800
Plaqueta	1,340
Plaqueta + peso 200	1,540
Plaqueta + peso 100A	1,440
Plaqueta + peso 100B	1,440
Plaqueta mais peso 400	1,740

6. CONCLUSÃO

A balança não apresenta erros e portanto possibilita uma medição segura.

APENDICE 04 - Equações de cálculo da Eficiência da fornalha

Como já descrito, a eficiência média temporal da fornalha é calculada pela seguinte equação.

$$\eta = \frac{\bar{Q}_{\text{útil}}}{\bar{Q}_{\text{nominal}}} \quad (4.1)$$

4.1) ENERGIA NOMINAL

A energia nominal é calculada pela equação:

$$\bar{Q}_{\text{nominal}} = \bar{m}_{\text{lenha}} PCI_{\text{lenha}} \quad (4.2)$$

Onde,

\bar{m}_{lenha} : vazão mássica média de lenha (kg/s);

PCI_{lenha} : Poder calorífico interior da lenha (kJ/kg), calculado pela equação (5).

4.2) ENERGIA ÚTIL

A energia útil é calculada por:

$$\bar{Q}_{\text{útil}} = \bar{m}_{\text{gás_comb}} \bar{\Delta h}_{\text{gás_comb}} \quad (4.3)$$

onde,

$\bar{m}_{\text{gás_comb}}$: vazão mássica média dos gases de combustão na saída da chaminé (kg/s), calculada pela equação (4.4)

$\bar{\Delta h}_{\text{gás_comb}}$: variação de entalpia média dos gases de combustão à temperatura da saída da chaminé (kJ/kg);

$$\bar{m}_{\text{gás_comb}} = m_{\text{gás_comb}} \bar{m}_{\text{lenha}} \quad (\text{kg/s}) \quad (4.4)$$

onde:

$m_{\text{gás_comb}}$: razão de massa dos produtos da combustão ($\frac{\text{kg}_{\text{gás_comb}}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$);

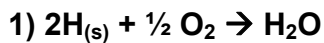
A razão de massa dos produtos da combustão ($m_{\text{gás_comb}}$) foi calculada segundo o cálculo estequiométrico a seguir.

4.2.1) Cálculo estequiométrico dos gases da combustão

Composição do ar

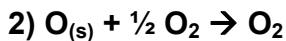
	O₂	N₂
Volumétrica	0,21	0,79
Mássica	0,233	0,767

REAÇÕES DA COMBUSTÃO



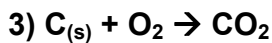
O consumo de ar para esta reação será :

$$\frac{0,5 \text{ kmol } O_2}{2 \text{ kmol } H} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} O_2}{1,008 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} H} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg } O_2} = 34,062 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg } H}$$



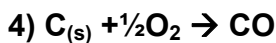
O consumo evitado de ar em decorrência da presença de oxigênio no combustível será:

$$\frac{0,5 \text{ kmol } O_2}{0,5 \text{ kmol } O_2} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} O_2}{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} O_2} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg } O_2} = 4,292 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg } O}$$



O consumo de ar para esta reação será :

$$\frac{1 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } C} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} O_2}{12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} C} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg } O_2} = 11,445 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg } C_{CO_2}}$$



O consumo de ar para esta reação será :

$$\frac{0,5 \text{ kmol } O_2}{1 \text{ kmol } C} \frac{32 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} O_2}{12 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}} C} \frac{1 \text{ kg ar}}{0,233 \text{ kg } O_2} = 5,722 \frac{\text{kg ar}}{\text{kg } C_{CO}}$$

Define-se aqui α como sendo a razão entre o nº de moles de CO e o nº de moles

de CO_2 . E β como a razão entre a massa do carbono que se transforma em fuligem e a quantidade total de carbono no combustível (BORGES, 1994).

$$\alpha \equiv \frac{n_{\text{C}_{\text{co}}}}{n_{\text{C}_{\text{co}_2}}}$$

$$\beta \equiv \frac{m_{\text{C}_{\text{ful}}}}{m_{\text{C}_{\text{total}}}}$$

Através de α , pode-se calcular a razão entre a massa de carbono que reage produzindo CO ($m_{\text{C}_{\text{co}}}$) e a massa de carbono que reage produzindo CO_2 ($m_{\text{C}_{\text{co}_2}}$):

$$\frac{m_{\text{C}_{\text{co}}}}{m_{\text{C}_{\text{co}_2}}} = \alpha \left[\frac{\text{kmol CO}}{\text{kmol CO}_2} \right] \left[\frac{12 \text{kg}_{\text{C}_{\text{co}}}}{\text{kmol CO}} \right] \left[\frac{\text{kmol CO}_2}{12 \text{kg}_{\text{C}_{\text{co}_2}}} \right] = \alpha \left[\frac{\text{kg}_{\text{C}_{\text{co}}}}{\text{kg}_{\text{C}_{\text{co}_2}}} \right]$$

Pode-se deduzir que:

$$m_{\text{C}_{\text{co}_2}} = \frac{m_{\text{C}_{\text{co}}}}{\alpha}$$

Partindo da massa de carbono total ($m_{\text{C}_{\text{total}}}$), pode-se escrever:

$$m_{\text{C}_{\text{total}}} = m_{\text{C}_{\text{co}}} + m_{\text{C}_{\text{co}_2}} + m_{\text{C}_{\text{ful}}}$$

onde $m_{\text{C}_{\text{ful}}}$ é a massa de carbono que reage produzindo fuligem

$$1 = \frac{m_{\text{C}_{\text{co}}}}{m_{\text{C}_{\text{total}}}} + \frac{m_{\text{C}_{\text{co}}}}{\alpha m_{\text{C}_{\text{total}}}} + \frac{m_{\text{C}_{\text{ful}}}}{m_{\text{C}_{\text{total}}}}$$

$$1 = \frac{m_{\text{C}_{\text{co}}}}{m_{\text{C}_{\text{total}}}} \left(1 + \frac{1}{\alpha} \right) + \beta$$

Portanto,

$$\frac{m_{\text{C}_{\text{co}}}}{m_{\text{C}_{\text{total}}}} = \frac{(1 - \beta)\alpha}{(1 + \alpha)}$$

$$\frac{m_{C_{CO_2}}}{m_{C_{total}}} = \frac{(1-\beta)}{(1+\alpha)}$$

i) Massa de ar teórica necessária para a combustão ($m_{ar,t}$)

A massa de ar teoricamente necessária para a combustão é calculada através da composição do combustível e dos valores numéricos das relações estequiométricas apresentadas anteriormente, como mostra a equação (4.5):

$$m_{ar,t} = \left\{ 5,722 \frac{(1-\beta)\alpha}{(1+\alpha)} + 11,445 \frac{(1-\beta)}{(1+\alpha)} \right\} C + 34,062 H - 4,292 O \quad \left[\frac{kg \text{ ar}}{kg \text{ comb}} \right] \quad (4.5)$$

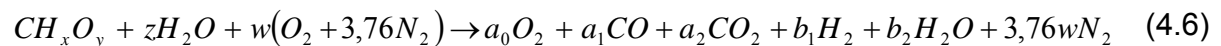
onde C, H e O são as concentrações em base mássica do carbono, hidrogênio e oxigênio presentes no combustível, respectivamente.

Como na combustão teórica não há formação de CO nem de fuligem, para o cálculo da massa de ar teórica as razões α e β assumem o valor 0.

Com o valor da massa de ar teórica calculado, é necessário saber a concentração de cada gás produto da combustão. Para isso será apresentado a seguir o balanço estequiométrico da combustão da madeira.

Balanço estequiométrico da reação de combustão da madeira

Assumindo que a combustão da madeira lignino-celulósica leva somente a produtos gasosos, excluindo gases residuais de combustão incompleta, e assumindo também que as condições de inflamabilidade dos gases da pirólise são asseguradas, e não há carbono flutuante passando através do sistema, pode-se escrever a estequiometria da combustão da madeira, com inclusão da umidade do combustível, como na equação 4.6, apresentado uma forma simplificada da equação dada por Jenkins et al, 1998.



As equações de conservação das espécies são escritas por:

- conservação do carbono : $a_1 + a_2 = 1$ (4.7)

- conservação do hidrogênio: $b_1 + b_2 = \frac{y}{2} + z$ (4.8)

- conservação do oxigênio: $2a_0 + a_1 + 2a_2 + b_2 = 2w + x + z$ (4.9)

Da equação 4.8, pode-se deduzir b_2 .

$$b_2 = \frac{y}{2} + z - b_1 \quad (4.10)$$

Combinando as equações 4.9 e 4.10, b_2 e z são eliminados, que leva à equação (4.11).

$$b_1 - 2a_0 - a_1 - 2a_2 + 2w = \frac{y}{2} - x \quad (4.11)$$

Os coeficientes estequiométricos a_0 , a_1 , a_2 , b_1 e w são relacionados como a seguir com as frações volumétricas dos respectivos gases.

$$[O_2] = \frac{a_0}{\Sigma} \quad [CO] = \frac{a_1}{\Sigma}, \quad [CO_2] = \frac{a_2}{\Sigma}, \quad [H_2] = \frac{b_1}{\Sigma}, \quad [N_2] = \frac{3,76w}{\Sigma}$$

Onde $\Sigma = a_0 + a_1 + a_2 + b_1 + 3,76w$

Assim podem-se deduzir as seguintes equações;

$$[CO] + [CO_2] = \frac{1}{\Sigma} \quad (4.12)$$

$$[H_2] - [CO] - 2[CO_2] - 2[O_2] + \frac{2}{3,76}[N_2] = \frac{y-2x}{2\Sigma} \quad (4.13)$$

Da equação 4.12, deduz-se que:

$$\Sigma = \frac{1}{[CO] + [CO_2]}$$

Eliminando o Σ e substituindo o $[N_2]$ na equação 4.13 por:

$$[N_2] = 1 - [O_2] - [CO] - [CO_2] - [H_2]$$

Assim, obtém-se a equação estequiométrica da combustão da madeira ligno-celulósica levando em consideração as frações volumétricas dos gases obtidos (equação 4.14).

$$4,76[O_2] + \left(2,88 + 3,76 \frac{y-2x}{4}\right)[CO] + \left(4,76 + 3,76 \frac{y-2x}{4}\right)[CO_2] - 0,88[H_2] = 1 \quad (4.14)$$

Considerando que as espécies gasosas CO, H₂, CO₂ e H₂O só existem localmente em altas temperaturas sem O₂, o seguinte equilíbrio químico pode ser levando em conta:



A constante de equilíbrio se mantém constante no valor 2 quando a temperatura está abaixo de 850°C . (MARTIN, 2007).

$$\frac{[CO][H_2O]}{[CO_2][H_2]} \approx 2$$

Considerando os coeficientes a₁ e b₁ muito pequenos em consideração a a₂ e b₂, podem ser feitas as seguintes aproximações das equações (4.7) e (4.8):

$$a_2 \cong 1 \quad \text{e} \quad b_2 \cong \frac{y}{2} + z$$

O que leva à:

$$\frac{[CO][H_2O]}{[CO_2][H_2]} = \frac{a_1 b_2}{a_2 b_1} \cong \left(\frac{y}{2} + z\right) \frac{a_1}{b_1} = \left(\frac{y}{2} + z\right) \frac{[CO]}{[H_2]} \cong 2 \quad (4.15)$$

$$[H_2] = \left(\frac{y+2z}{4}\right)[CO] \quad (4.16)$$

Fazendo a substituição do [H₂], a estequiometria da reação da combustão da madeira fica uma relação entre os três parâmetros independentes [O₂], [CO₂] e [CO]:

$$4,76[O_2] + \left(2,88 + 3,76 \frac{y-2x}{4} - 0,88 \frac{y+2z}{4}\right)[CO] + \left(4,76 + 3,76 \frac{y-2x}{4}\right)[CO_2] = 1 \quad (4.17)$$

O analisador de gases mede diretamente as concentrações volumétricas de O₂ e CO, e através da equação (4.17) pode-se calcular a concentração volumétrica de CO₂.

ii) Excesso de ar (E)

A relação entre o coeficiente de ar W da estequiometria real da combustão e o coeficiente de ar $\left(1 + \frac{y-2x}{4}\right)$ da estequiometria teórica da combustão é o excesso de ar, definido com E .

$$E \equiv \frac{w}{\left(1 + \frac{y-2x}{4}\right)} \quad (4.18)$$

Da mesma maneira, um coeficiente de oxidação parcial é definido como k .

$$k \equiv \frac{[CO]}{[CO] + [CO_2]} = \frac{a_1}{a_1 + a_2} \quad (4.19)$$

Assim, pode-se recalculer os coeficientes estequiométricos.

Da equação 4.19 define-se a_1 e a_2 .

$$a_2 = 1 - a_1 \quad \therefore \quad a_2 = 1 - k$$

Da equação 4.15 define-se b_1 .

$$\frac{y}{2} + z \left(\frac{a_1}{b_1} \right) = 2 \quad \therefore \quad b_1 = \frac{y}{4} + \frac{z}{2} a_1 \quad \therefore \quad b_1 = \left(\frac{y+2z}{4} \right) k$$

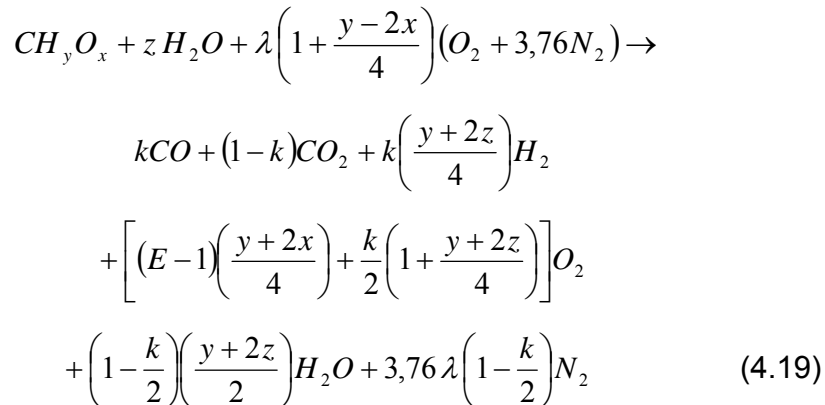
Da equação 4.11 define-se a_0 .

$$a_0 = \frac{k}{2} \left(\frac{y+2z}{4} + 1 \right) + (\lambda - 1) \left(1 + \frac{y-2x}{4} \right)$$

Da equação 4.7 define-se b_2 .

$$b_2 = \left(1 - \frac{k}{2} \right) \left(\frac{y+2z}{2} \right)$$

Assim, pode-se reescrever a equação geral:



Da equação (4.19) pode-se definir a seguinte equação:

$$\frac{[O_2]}{[CO_2] + [CO]} = (E-1) \left(1 + \frac{y-2x}{4} \right) + \frac{k}{2} \left(1 + \frac{y+2z}{4} \right) \quad (4.20)$$

A equação 4.20 pode ser reescrita substituindo o coeficiente k .

$$E - 1 = \frac{[O_2] - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{y + 2z}{4} \right) [CO]}{\left(1 + \frac{y - 2x}{4} \right) ([CO_2] + [CO])} \quad (4.21)$$

iii) Massa de ar real utilizada na combustão ($m_{ar,r}$)

A massa de ar realmente utilizada na combustão é calculada pela equação (4.21).

$$m_{ar,r} = m_{ar,t} E \quad \left[\frac{kg_{ar}}{kg_{comb}} \right] \quad (4.22)$$

iv) Massa de água nos produtos da combustão (m_{H_2O})

A massa de água contida nos gases da combustão será a soma da massa de água contida no combustível, água que se forma como produto da combustão do hidrogênio, e a massa de água contida na umidade do ar.

$$m_{H_2O} = w_u + 9H(1 - w_u) + m_{ar,r} UA \quad \left[\frac{kg_{H_2O}}{kg_{comb}} \right]$$

* 2 kg de H produzem 18kg de H₂O → 1kg de H produz 9kg de H₂O

** w_u : umidade do combustível

UA é a umidade absoluta do ar em $\frac{kg_{vapor\ d'água}}{kg_{ar\ seco}}$, calculada pela equação:

$$U.A = 0,622 \frac{P_v}{P_a} \quad (\text{e.g VAN WYLEN, 1998})$$

Onde P_v é a pressão do vapor saturado em kPa, calculado através da temperatura ambiente e umidade relativa, e P_a é a pressão parcial do ar, em kPa.

v) Massa de N₂ nos produtos da combustão (m_{N_2})

Supondo que não há qtd significativa de N₂ no combustível e o nitrogênio molecular presente no ar não reage, a massa de N₂ nos produtos da combustão é calculada por:

$$m_{N_2} = 0,767 m_{ar,r} \quad \left[\frac{kg_{N_2}}{kg_{comb}} \right]$$

vi) Massa de CO₂ nos produtos da combustão (m_{CO2})

A concentração volumétrica CO₂ nos produtos da combustão é calculada em função da concentração volumétrica de O₂ e CO medidos diretamente pelo analisador de gases, através da equação 4.17. E sua concentração mássica é calculada pela equação (4.23)

$$m_{CO_2} = \% \left[\frac{m_{CO_2}^3}{m_{gas_comb}^3} \right] V_{gas_comb} \left[\frac{m_{gas_comb}^3}{Kg_{comb}} \right] \rho_{CO_2} \left[\frac{kg_{CO_2}}{m_{CO_2}^3} \right] \quad \frac{kg_{O_2}}{kg_{comb}} \quad (4.23)$$

Onde ρ_{CO_2} é a densidade do CO₂ na temperatura dos gases em $\left[\frac{kg_{CO_2}}{m_{CO_2}^3} \right]$.

vii) Massa de O₂ nos produtos da combustão (m_{O2})

A concentração de O₂ nos gases de combustão é medida diretamente pelo analisador de gases em % (base volumétrica). Assim, a massa de O₂ nos produtos da combustão é calculada por:

$$m_{O_2} = \% \left[\frac{m_{O_2}^3}{m_{gas_comb}^3} \right] V_{gas_comb} \left[\frac{m_{gas_comb}^3}{Kg_{comb}} \right] \rho_{O_2} \left[\frac{kg_{O_2}}{m_{O_2}^3} \right] \quad \left[\frac{kg_{O_2}}{kg_{comb}} \right]$$

Onde ρ_{O_2} é a densidade do O₂ na temperatura dos gases em $\left[\frac{kg_{O_2}}{m_{O_2}^3} \right]$.

viii) Massa de CO nos produtos da combustão

Assim como o O₂, a concentração de CO nos gases de combustão é medida diretamente pelo analisador de gases em % (base volumétrica). Assim, a massa de CO nos produtos da combustão é calculada por:

$$m_{CO} = \frac{ppm}{10000} = [\%] \left[\frac{m_{CO}^3}{m_{gas_comb}^3} \right] V_{gas_comb} \left[\frac{m_{gas_comb}^3}{kg_{comb}} \right] \rho_{CO} \left[\frac{Kg_{CO}}{m_{CO}^3} \right] \quad \left[\frac{kg_{CO}}{kg_{comb}} \right]$$

O volume total dos gases de combustão (V_{gas_comb}) é definido como a variável **X** e é calculado resolvendo o seguinte sistema de equações:

$$V_{gas_comb} = X \left[\frac{m_{gas_comb}^3}{kg_{comb}} \right]$$

$$\left\{ \begin{array}{l} [CO_2]X = a \left[\frac{m_{CO_2}^3}{kg_{comb}} \right] \\ [O_2]X = b \left[\frac{m_{O_2}^3}{kg_{comb}} \right] \\ [CO]X = c \left[\frac{m_{CO}^3}{kg_{comb}} \right] \end{array} \right.$$

$$V_{H_2O} \left[\frac{m_{H_2O}^3}{kg_{comb}} \right] + V_{N_2} \left[\frac{m_{N_2}^3}{kg_{comb}} \right] + a + b + c = X$$

Assim,

$$X = \frac{V_{H_2O} + V_{N_2}}{1 - ([O_2] + [CO] + [CO_2])}$$

Com o valor de X, pode-se calcular a concentração mássica de O₂, CO₂ e CO.

E a massa total dos produtos da combustão é dada por:

$$m_{gás_comb} = m_{H_2O} + m_{N_2} + m_{O_2} + m_{CO_2} + m_{CO} \quad \frac{kg_{gás_comb}}{kg_{comb}}$$

ix) Variação de entalpia dos gases de combustão

A entalpia ($\Delta h_{gás_comb}$) dos produtos da combustão é calculada através

da equação (4.24).

$$\Delta h = \bar{h} - \bar{h}_{f,298}^0$$

$$\Delta h_{gás_comb} = \frac{\sum_1^n \Delta h_i m_i}{m_{gás_comb}} \quad (4.24)$$

Onde:

\bar{h} : entalpia específica do gás na temperatura de operação;

$\bar{h}_{f,298}^0$: entalpia de formação (a 25° e pressão de 0,1MPa);

m_i : massa do gás i ($\frac{kg_{\text{gás } i}}{kg_{\text{comb}}}$)

$m_{\text{gás_comb}}$: massa total dos gases de combustão ($\frac{kg_{\text{gás_comb}}}{kg_{\text{comb}}}$)

O valor de Δh foi consultado da tabela (4.1)

TABELA 4.1 – VARIAÇÃO DE ENTALPIA DOS GASES DE COMBUSTÃO

T (K)	N ₂	O ₂	Δh (kJ/kg) H ₂ O	CO ₂	CO
298	0	0	0	0	0
300	1,927676436	1,687553	3,441576464	1,5678255	1,9278829
400	106,0579017	94,59671	191,5070774	90,956601	106,28347
500	211,0091743	190,1934	384,2353594	188,70711	211,781507
600	317,4954485	288,9153	582,7921177	293,25153	319,243127
700	426,1235855	390,606	787,6769359	403,40832	429,168154
800	537,1077714	494,8905	999,2783791	518,20041	541,735095
900	650,5194017	601,3000	1217,707466	636,9007	656,801142
1000	766,1799879	709,4909	1443,241743	758,85026	774,223492
1100	883,8753436	819,1506	1675,825701	883,54919	893,645127
1200	1003,426980	930,0603	1915,40383	1010,5203	1014,88754
1300	1124,585014	1042,064	2161,587566	1139,4683	1137,70082
1400	1247,135259	1154,974	2414,154871	1270,0523	1261,79936

FONTE: VAN WYLEN (1998)

APÊNDICE 05 - Equações do balanço de energia

4a) Q_{ar}

A energia fornecida pelo ar primário é dada pela equação (4a.1).

$$\dot{Q}_{ar\text{ primário}} = \bar{\dot{m}}_{ar} \bar{h}_{ar} \quad (\text{kW}) \quad (4a.1)$$

Onde,

$\bar{\dot{m}}_{ar}$: vazão mássica média do ar real da combustão (kg/s), calculada pela equação (4.a.2);

\bar{h}_{ar} : entalpia média do ar à temperatura ambiente (kJ/kg)

$$\bar{\dot{m}}_{ar} = \bar{m}_{ar,r} \dot{m}_{lenha} \quad (4.a.2)$$

Onde:

$\bar{m}_{ar,r}$: massa de ar real média da combustão ($\text{kg}_{ar}/\text{kg}_{comb}$), já calculada pela equação (4.22) no apêndice 4;

\dot{m}_{lenha} : vazão mássica de lenha (kg/s);

4b) Q_{lenha}

A energia fornecida pela lenha é a energia nominal ($Q_{nominal}$) calculada no apêndice 4.

4c) Q_{gas_comb}

A energia liberada pelos gases de combustão é a energia útil ($Q_{útil}$), também já calculada no apêndice 4.

4d) Q_{cinzas}

O calor perdido pelas cinzas foi calculado pela equação (4d.1).

$$\dot{Q}_{cinzas} = \bar{\dot{m}}_{cinzas} h_{cinzas} \quad (\text{kJ/s}) \quad (4d.1)$$

Onde:

\dot{m}_{cinzas} : vazão mássica média de cinzas (kg/s), calculada pela equação (4d.2).

h_{cinzas} : entalpia das cinzas na temperatura de operação (kJ/kg), calculada pela equação (4d.3).

$$\dot{m}_{cinzas} = \frac{m_{cinzas_total}}{tempo_corrida} \quad (\text{kg/s}) \quad (4d.2)$$

$$h_{cinzas} = c_{p_cinzas} (T_{cinzas} - T_{amb}) \quad (\text{kJ/kg}) \quad (4d.3)$$

Onde:

tempo_corrida: tempo total da corrida (s).

c_{p_cinzas} : calor específico das cinzas à temperatura de operação (kJ/kg.K) (BAZZO, 1995);

T_{cinzas} : temperatura média das cinzas durante o período em regime (K);

T_{amb} : temperatura ambiente (K);

4e) $Q_{carvão}$

A energia perdida pelo carvão que passa direto pela grelha (carbono não queimado) é dado pela equação (4e.1).

$$Q_{carvão} = \dot{m}_{carvão} h_{carvão} \quad (\text{kW}) \quad (4e.1)$$

Onde:

$\dot{m}_{carvão}$: vazão mássica média de carvão (kg/s), dado pela equação (4e.2);

$h_{carvão}$: entalpia do carvão na temperatura de operação (kJ/kg), dado pela equação (4e.3);

$$\dot{m}_{\text{carvão}} = \frac{m_{\text{carvão}}}{\text{tempo_corrida}} \quad (\text{kW}) \quad (4e.2)$$

onde:

$m_{\text{carvão}}$: massa de carvão (kg carvão/kg combustível);

tempo_corrida: tempo total da corrida (s).

$$h_{\text{carvão}} = c_{p_{\text{carvão}}} (T_{\text{carvão}} - T_{\text{amb}}) \quad (4e.3)$$

onde:

$c_{p_{\text{carvão}}}$: calor específico do carvão á temperatura de operação (kJ/kg/K)(BAZZO, 1995);

$T_{\text{carvão}}$: Temperatura do carvão (estimada pela temperatura da zona de pirólise);

4f) Q_{paredes}

O cálculo da perda de energia pelas paredes inclui a zona de pirólise, a câmara de combustão e o duto da chaminé.

Os processos de transferência de calor que ocorrem na fornalha são condução e convecção atuando em série, através das paredes da fornalha; e radiação e convecção em paralelo, na superfície interna da fornalha, isto é, do gás para as paredes, e na superfície externa da fornalha para o ar ambiente.

Primeiramente, será apresentado o cálculo das perdas de energia radiante das superfícies interna e externa da fornalha. Para a superfície interna, o fluxo de calor radiante será calculado separadamente para cada parte da fornalha (câmara de combustão, zona de pirólise e chaminé), para a superfície externa, o fluxo de calor radiante será calculado englobando toda a fornalha como uma só unidade. Em seguida, será apresentado o cálculo da perda de energia por convecção e condução em série, analisando separadamente as partes componentes da fornalha.

As figuras 87 e 88 apresentam um desenho esquemático dos fluxos de calor que atuam na fornalha.

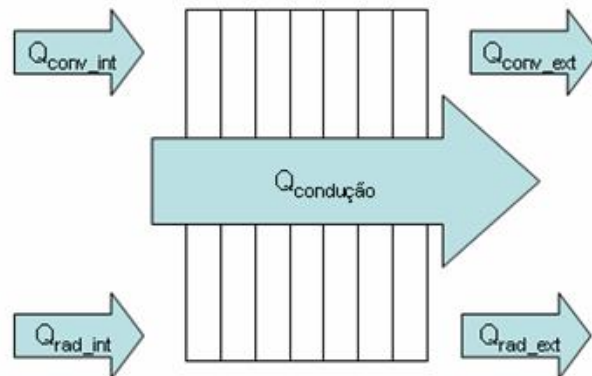


FIGURA 87 – FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DAS PAREDES DA FORNALHA (VISTA SUPERIOR)
 FONTE: O autor (2008)

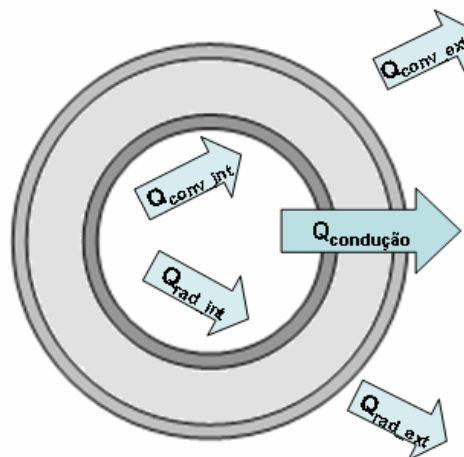


FIGURA 88 – FLUXO DE CALOR ATRAVÉS DA CHAMINÉ (VISTA SUPERIOR)
 FONTE: O autor (2008)

4.f.1) Radiação

→ Radiação interna

O fluxo de calor radiante dos gases para a parede interna da fornalha é calculado separadamente em cada parte componente da fornalha, de acordo com as equações (4.f.1), (4.f.2) e (4.f.3).

Câmara de combustão

$$Q_{\text{rad_int}} = \varepsilon \sigma A_s F (T_g^4 - T_s^4) \quad (4f.1)$$

Onde:

ε : emissividade dos gases na câmara de combustão;

σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

A_s : área da superfície (m^2)

T_g : Temperatura dos gases no interior da fornalha (K);

T_s : Temperatura da parede interna da câmara de combustão (K);

F: Fator de forma

O fator de forma para superfícies fechadas é igual a 1 (INCROPERA, 2003).

Zona de Pirólise

$$Q_{\text{rad_int}} = \varepsilon \sigma A_s F (T_g^4 - T_s^4) \quad (4f.2)$$

Onde:

ε : emissividade da chama;

σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

A_s : área da superfície (m^2)

T_g : Temperatura dos gases no interior da fornalha (K);

T_s : Temperatura da parede interna da zona de pirólise (K);

F: Fator de forma (1) (INCROPERA, 2003).

Chaminé

$$Q_{\text{rad_int}} = \varepsilon \sigma A_s F (T_g^4 - T_s^4) \quad (4f.3)$$

Onde:

ε : emissividade dos gases na chaminé;

σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

A_s : área da superfície (m^2)

T_g : Temperatura dos gases no interior da chaminé (K);

Ts: Temperatura da superfície interna da chaminé (K);

F: Fator de forma (1) (INCROPERA, 2003).

→ Radiação externa

O fluxo de calor radiante de superfície externa da fornalha para o ambiente é dada pela equação (4.f.4).

$$Q_{\text{rad_ext}} = \varepsilon \sigma A_s F (T_s^4 - T_{\text{viz}}^4) \quad (4f.4)$$

Onde:

ε : emissividade da superfície (adimensional) – 0,07 (INCROPERA, 2003);

σ : constante de Stefan-Boltzman ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$);

T_s: temperatura da superfície externa da fornalha (K)

T_{viz}: temperatura da vizinhança (K);

A_s: área da superfície (m²)

F: Fator de forma

Nesse caso, o fator de forma para o conjunto da zona de pirólise e da câmara de combustão é calculado pela equação (4.f.5) (INCROPERA, 2003).

$$F = \frac{1 + (L/C) - [1 + (L/C)^2]^{1/2}}{2} \quad (4.f.5)$$

onde L e C são respectivamente a largura e o comprimento da fornalha (m).

Para a chaminé, é dada a equação (4f.6) (INCROPERA, 2003).

$$F = \frac{2\pi L}{\ln(4L/D)}$$

onde L e D são respectivamente o comprimento e o diâmetro da chaminé.

4f.2) Convecção e condução

→ *Convecção* dos gases no interior da fornalha para a parede interna e da superfície externa para o ar ambiente;

→ *Condução* entre os demais componentes das paredes da fornalha;

Os fluxos de calor por condução e convecção atuam em série nas paredes da fornalha. E serão calculados separadamente em cada parte da fornalha, devido as camadas das paredes não serem as mesmas em toda a fornalha.

Câmara de combustão

Paredes laterais

A figura 89 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da câmara de combustão.

Como as resistências condutiva e convectiva encontram-se em série, podem ser somadas, e a resistência térmica total é dada pela equação (4f.7).

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{L_1}{k_1 A_s} + \frac{L_2}{k_2 A_s} + \frac{L_3}{k_3 A_s} + \frac{L_4}{k_4 A_s} + R_{cont_{5,6}} + \frac{L_5}{k_5 A_s} + \frac{1}{h_e A_s} \quad (m^2.K/W) \quad (4f.7)$$

onde,

L_i : espessura do componente i (m);

A_s : área da superfície da parede lateral da câmara de combustão (m^2);

k_i : condutividade térmica do componente i (W/m.K);

h_i : coeficiente de convecção interno (W/ m^2 .K)(INCROPERA, 2003) ;

h_e : coeficiente de convecção externo (W/ m^2 .K)(INCROPERA, 2003);

$R_{cont_{5,6}}$: Resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado ($m^2.K / W$);

As demais resistências térmicas de contato foram consideradas desprezíveis por não haver espaçamentos significativos entre as paredes da fornalha que possam ser preenchidos com ar.

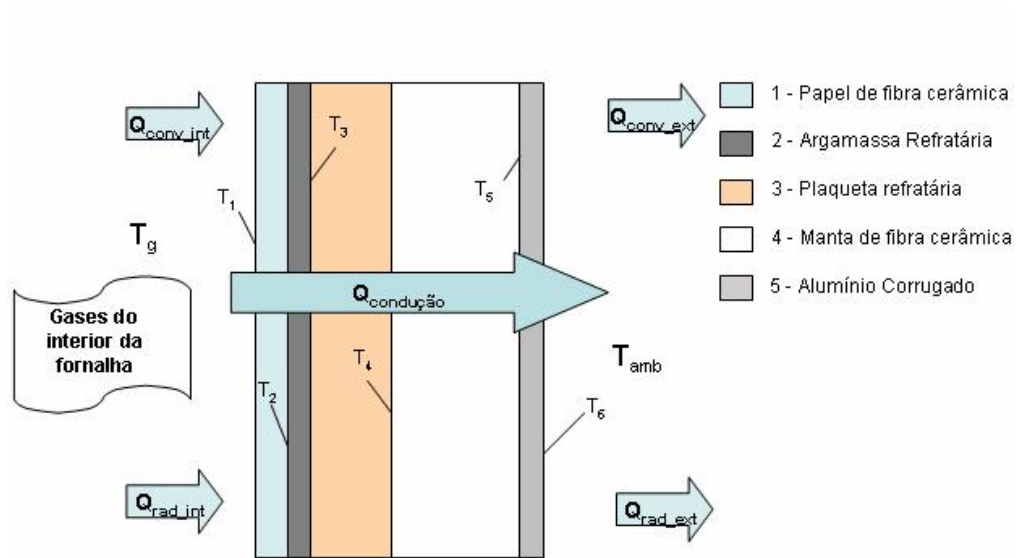


FIGURA 89 – PAREDE LATERAL DA CÂMARA DE COMBUSTÃO
FONTE: O AUTOR (2008)

Assim, o fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da câmara de combustão ($Q_{\text{conv_cond}_1}$) é calculado pela equação (4.f.8)

$$Q_{\text{conv_cond}_1} = \frac{T_g - T_1}{\left(\frac{1}{h_i}\right)A_s} + \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{L_1}{k_1}\right)A_s} + \dots + \frac{T_5 - T_{\text{amb}}}{\left(\frac{1}{h_e}\right)A_s} \quad (\text{W}) \quad (4\text{f.8})$$

Com sistemas compostos, é conveniente trabalhar com o coeficiente global da troca de calor (U), e como as áreas são as mesmas, este é calculado pela equação (4.f.9).

$$U = \frac{1}{R_{\text{total}}A_s} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{L_1}{k_1}\right) + \dots + \left(\frac{1}{h_e}\right)\right]} \quad (\text{W/m}^2.\text{K}) \quad (4\text{f.9})$$

Substituindo na fórmula (4.f.7), o fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da câmara de combustão da fornalha é dado pela equação (4.f.10):

$$Q_{\text{conv_cond}_1} = U A_s \Delta T \quad (\text{W}) \quad (4\text{f.10})$$

onde ΔT : Diferença de temperatura entre a temperatura dos gases no interior da fornalha (T_g) e a temperatura ambiente (T_{amb});

Parede superior

A figura 90 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa a parede superior da câmara de combustão.

Como as resistências condutiva e convectiva encontram-se em série, podem ser somadas, e a resistência térmica total é dada pela equação (4f.11).

$$R_{total} = \frac{1}{h_i A_s} + \frac{L_1}{k_1 A_s} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A_s} + \frac{L_4}{k_4 A_s} + R_{cont_{4,5}} + \frac{L_5}{k_5 A_s} + \frac{1}{h_e A_s} \quad (m^2.K / W) \quad (4f.11)$$

Onde,

L_i : espessura do componente i (m);

A_s : área da superfície da parede superior da câmara de combustão(m^2);

k_i : condutividade térmica do componente i (W/m.K);

h_i : coeficiente de convecção interno (W/ m^2 .K);

h_e : coeficiente de convecção externo (W/ m^2 .K);

$R_{cont_{4,5}}$: Resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado ($m^2.K / W$);

As demais resistências térmicas de contato foram consideradas desprezíveis por não haver espaçamentos significativos entre as paredes da fornalha que possam ser preenchidos com ar.

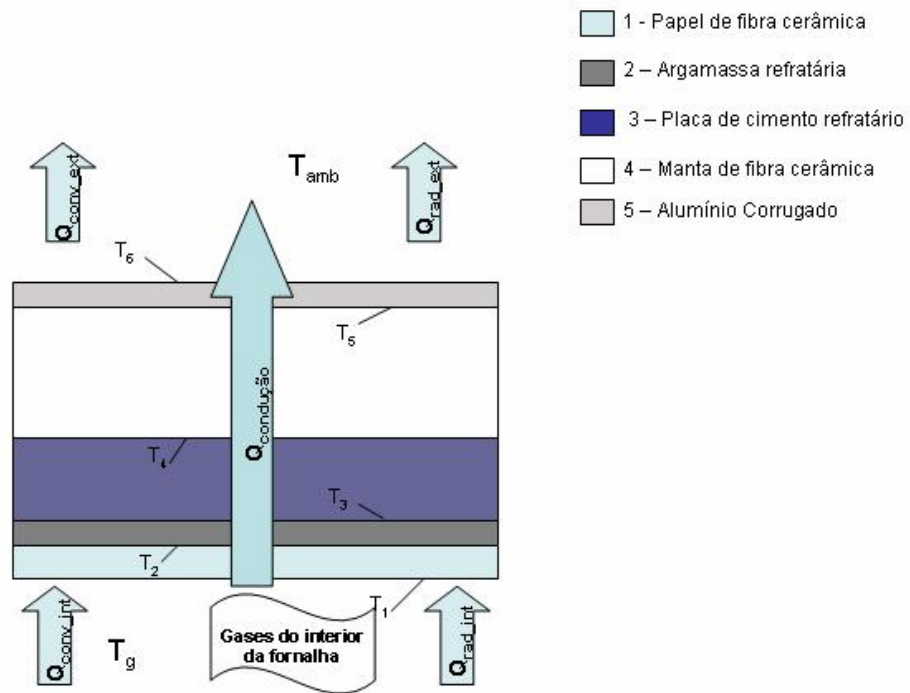


FIGURA 90 – TAMPA SUPERIOR DA CÂMARA DE COMBUSTÃO
 FONTE: O autor (2008)

Assim, o fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da câmara de combustão ($Q_{\text{conv_cond}_2}$) é calculado pela equação (4.f.12)

$$Q_{\text{conv_cond}_2} = \frac{T_8 - T_1}{\left(\frac{1}{h_i}\right)As} + \frac{T_1 - T_2}{\left(\frac{L_1}{k_1}\right)As} + \dots + \frac{T_8 - T_{\text{amb}}}{\left(\frac{1}{h_e}\right)As} \quad (\text{W}) \quad (4\text{f.12})$$

Como se trata de sistemas compostos, será utilizado o coeficiente global da troca de calor (U), calculado pela equação (4f.13).

$$U = \frac{1}{R_{\text{total}}As} = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_i}\right) + \left(\frac{L_1}{k_1}\right) + \dots + \left(\frac{1}{h_e}\right)\right]} \quad (\text{W/m}^2.\text{K}) \quad (4\text{f.13})$$

Assim, o fluxo de calor que atravessa a parede superior da câmara de

combustão da fornalha é dado por (equação 4f.14).:

$$Q_{\text{conv_cond}_2} = UAs\Delta T \quad (W) \quad (4f.14)$$

onde ΔT : Diferença de temperatura entre a temperatura dos gases no interior da fornalha (T_g) e a temperatura ambiente (T_{amb}).

Base

A figura 91 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa a base da câmara de combustão.

A transferência de calor pela base da fornalha na câmara de combustão dos gases é calculada semelhante à anterior. A mudança está na composição da parede inferior em relação às outras (equação 4f.15).

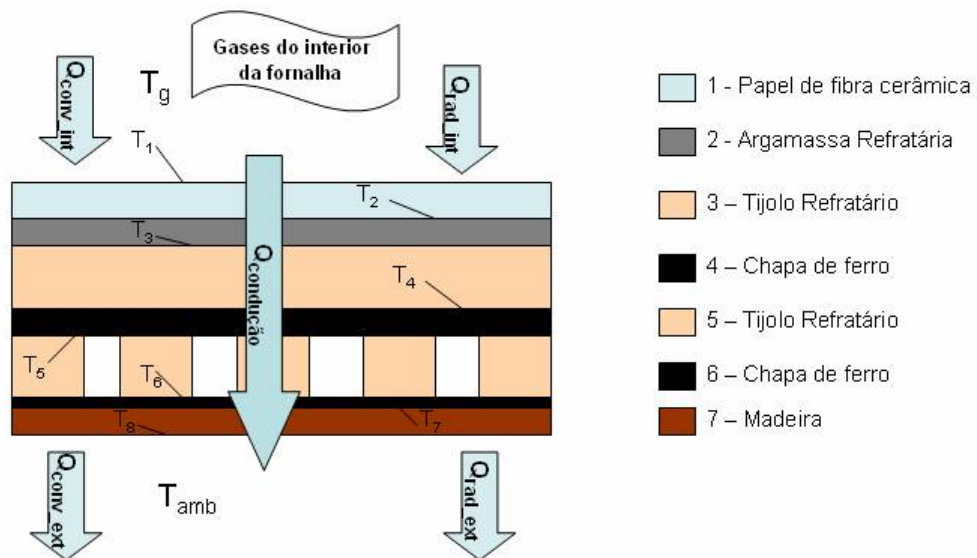


FIGURA 91 - BASE DA CÂMARA DE COMBUSTÃO
FONTE: O autor (2008)

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_i As} + \frac{L_1}{k_1 As} + \frac{L_2}{k_2 As} + \frac{L_3}{k_3 As} + \frac{L_4}{k_4 As} + \frac{L_5}{k_5 As} + \frac{L_6}{k_6 As} + \frac{L_7}{k_7 As} + \frac{1}{h_e As} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}) \quad (4f.15)$$

O coeficiente global da transferência de calor é dado pela equação (4f.16)

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_i} \right) + \left(\frac{L_1}{k_1} \right) + \dots + \left(\frac{1}{h_e} \right) \right]} \quad (\text{W/m}^2 \cdot \text{K}) \quad (4f.16)$$

Calculado como anteriormente, o fluxo de calor que atravessa a base da câmara de combustão da fornalha é dado por (equação 4f.17):

$$Q_{\text{conv_cond}_3} = UAs\Delta T \quad (\text{W}) \quad (4f.17)$$

Onde A é a área de superfície da base da câmara de combustão.

Assim, o fluxo de calor que atravessa a câmara de combustão é dado pela soma das equações (4f.10), (4f.14) e (4.f.17).

Zona de Pirólise

Paredes laterais

A figura 92 apresenta um esquema do fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da zona de pirólise.

A resistência térmica total das paredes laterais da zona de pirólise é dada pela equação (4f.18).

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_i As} + \frac{L_1}{k_1 As} + \frac{L_2}{k_2 As} + R_{\text{cont}_{2,3}} + \frac{L_3}{k_3 As} + \frac{1}{h_e As} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}) \quad (4f.18)$$

onde $R_{\text{cont}_{2,3}}$: Resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado ($\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$).

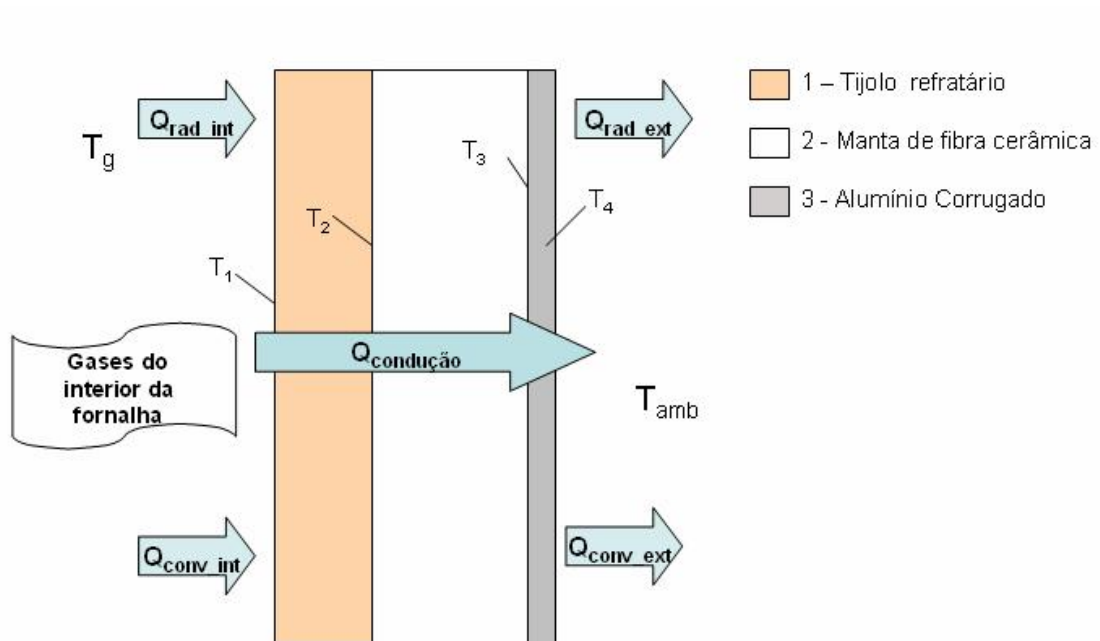


FIGURA 92 – PAREDE LATERAL DA ZONA DE PIRÓLISE

FONTE: O autor (2008)

O coeficiente global da transferência de calor é calculado pela equação (4.f.19)

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_i} \right) + \left(\frac{L_1}{k_1} \right) + \dots + \left(\frac{1}{h_e} \right) \right]} \quad (\text{W/m}^2.\text{K}) \quad (4f.19)$$

Assim, o fluxo de calor que atravessa as paredes laterais da zona de pirólise da fornalha é dado pela equação (4f.20).

$$Q_{conv_cond_4} = UAs\Delta T \quad (\text{W}) \quad (4f.20)$$

Onde A é a área de superfície das paredes laterais da zona de pirólise, em m^2 .

Base

A figura 93 apresenta o fluxo de calor através da base da zona de pirólise.

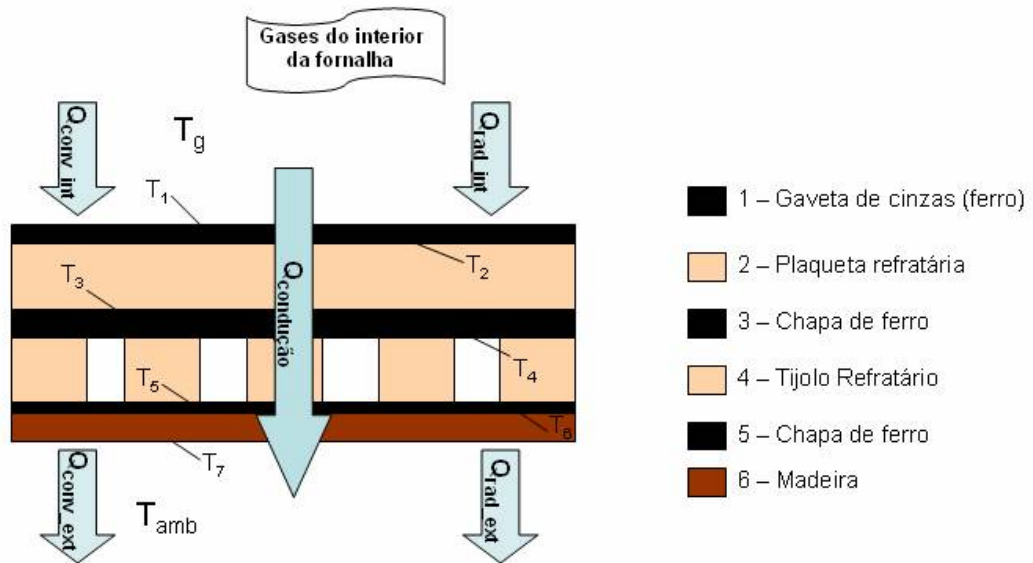


FIGURA 93- BASE DA ZONA DE PIRÓLISE
 FONTE: O autor (2008)

A transferência de calor por condução e convecção em série pela base da fornalha na zona de pirólise dos gases é calculada como anteriormente. A mudança está na composição da parede inferior em relação às outras (equação 4f.21).

$$R_{total} = \frac{1}{h_i As} + \frac{L_1}{k_1 As} + \frac{L_2}{k_2 As} + \frac{L_3}{k_3 As} + \frac{L_4}{k_4 As} + \frac{L_5}{k_5 As} + \frac{L_6}{k_6 As} + \frac{1}{h_e As} \quad (\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}) \quad (4f.21)$$

O coeficiente global da transferência de calor é calculado como pela equação (4f.22).

$$U = \frac{1}{\left[\left(\frac{1}{h_i} \right) + \left(\frac{L_1}{k_1} \right) + \dots + \left(\frac{1}{h_e} \right) \right]} \quad (4f.22)$$

Calculado como anteriormente, o fluxo de calor que atravessa a base da zona de pirólise da fornalha é dado pela equação (4f.23).

$$Q_{conv_cond_2} = UAs\Delta T \quad (4f.23)$$

Assim, o fluxo de calor que atravessa a zona de pirólise é dado pela soma das equações (4f.20) e (4f.23).

A perda de calor total por convecção e condução em série é dada pela equação (4f.24).

$$Q_{\text{conv_cond}} = \sum_{i=1}^4 Q_{\text{conv_cond}_i} \quad (4f.24)$$

Chaminé

Sistemas cilíndricos e esféricos muitas vezes apresentam o gradiente e temperatura apenas na direção radial e podem portanto ser tratados como unidimensionais. A figura 94 apresenta o esquema do fluxo de calor pelo cilindro. E a figura 95 o corte transversal da chaminé cilíndrica da fornalha.

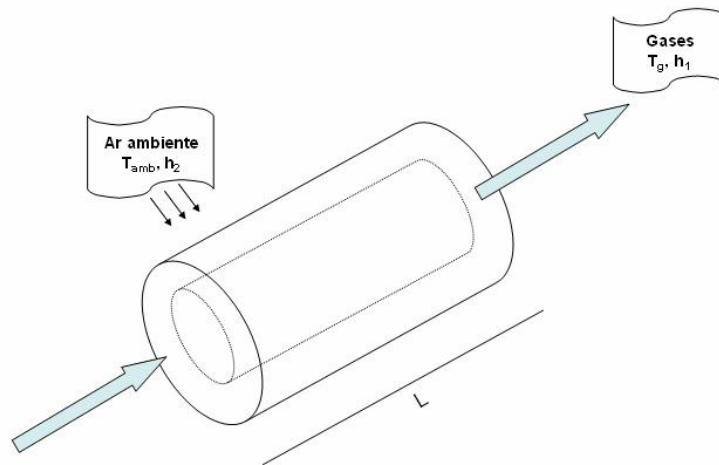


FIGURA 94 – FLUXO DE CALOR EM SISTEMAS CILÍNDRICOS
FONTE: O autor (2008)

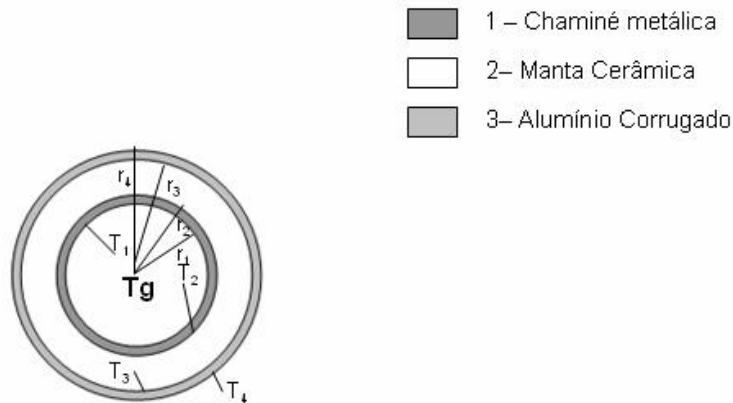


FIGURA 94 – CORTE TRANSVERSAL DA CHAMINÉ
FONTE: O autor (2008)

Para o cálculo da energia perdida por condução e convecção em série, desprezando as resistências de contato das interfaces, a resistência térmica total é dada pela equação (4.f.25).

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{h_1 2\pi r_1 L} + \frac{\ln(r_2 / r_1)}{2\pi k_1 L} + \frac{\ln(r_3 / r_2)}{2\pi k_2 L} + R_{\text{cont}_{2,3}} \frac{\ln(r_4 / r_3)}{2\pi k_3 L} + \frac{1}{h_2 2\pi r_4 L} \quad (\text{K.s/kJ}) \quad (4.f.25)$$

Onde:

L : altura da chaminé (m), como mostrado na figura CC;

r_i : raio da camada i (m)

k_i : condutividade térmica do componente i (W/m.K);

h_i : coeficiente de convecção interno (W/m².K);

h_e : coeficiente de convecção externo (W/m².K);

$R_{\text{cont}_{2,3}}$: Resistência térmica de contato entre a manta cerâmica e o alumínio corrugado (m².K / W).

O fluxo de calor que atravessa a parede da chaminé, expresso em termos de coeficiente global de transferência (U) é dado pela equação (4.f.26).

$$Q_{\text{chaminé}} = \frac{\Delta T}{R_{\text{total}}} = U A_s (T_g - T_{\text{amb}}) \text{ (W)} \quad (4.f.26)$$

Onde A_s é a área total da superfície da chaminé (m^2), e T_g é a temperatura dos gases no interior da chaminé (K).

APÊNDICE 06 - *Rotina de Corrida Experimental*

→ PASSO 1 - PREPARAÇÃO

- **Procedimento 1 :**

- Conferir material de segurança :

- Luva anti-térmica;
- Guarda-pó;
- Óculos de proteção ;

- **Procedimento 2:**

- Preparar lenha para corrida:

- Pesar as cargas de lenha;
- Guardar 3 amostras da lenha em saco plástico (para verificação da umidade);

- **Procedimento 3:**

- Instrumentação:

- cFP e termopares:

- Verificar se os termopares estão posicionados corretamente;
- Configurar arquivo do labview;

- Verificar se o arquivo está gravando corretamente os dados;

- Analizador de Gases:

- Verificar se a sonda está posicionada corretamente na chaminé;
- Configurar software do analisador;
- Verificar se os dados estão sendo gravados corretamente;

→ PASSO 2: OPERAÇÃO

- **Procedimento 1 :**

- Dar a partida da fornalha com gravetos, álcool combustível e álcool sólido;

- Colocar um recipiente metálico com uma pastilha de álcool sólido

queimando na chaminé para ajudar a inverter o fluxo de ar;

- Marcar a hora de início

- **Procedimento 2:**

- Do início da corrida até a fornalha entrar em regime, posicionar a sonda do analisador na chaminé a cada 30 minutos e depois de 1 minuto e meio (tempo de resposta do equipamento) registrar os três relatórios, com intervalo de 30 segundos;

- Após iniciar o período em regime, a aquisição dos dados do analisador passa ser 3 relatórios a cada 15 minutos,

Observação: Esse procedimento não pôde ser rigorosamente seguido devido à praticidade de operação da fornalha, pois só havia uma pessoa responsável pela corrida.

→ PASSO 3: ENCERRAMENTO

- **Procedimento 1:**

- Desligar todos os equipamentos (computador, cFP, analisador)

- Marcar a hora do encerramento

- **Procedimento 2:**

- Pesar quantidade de cinzas e de carvão no cinzeiro;

- **Procedimento 3:**

- Analisar todos os resultados e preparar um relatório da corrida

APENDICE 07 – Tabela Geral da Eficiência

Corrida	A (m ²)	M _{leira}	Tiragem	t (min)	T (°C)	Tamb (°C)	CO (ppm)	O ₂ (%)	CO ₂ (%)	E	Pn (kW)	Pu (kW)	η (%)
1	0,13	0,5 kg/4min	Natural	17	786	25	131	10,04	10,86	193	33,42	25,14	75,2
2	0,13	0,4 kg/3min	Natural	36	817	24	116	9,67	11,37	185	35,83	27,08	75,6
3	0,13	0,3 kg/2min	Natural	67	840	22	85	9,31	11,69	180	39,98	30,45	76,2
4	0,08	0,5 kg/4min	Natural	30	811	20	120	9,65	11,35	185	32,99	25,10	76,1
5	0,08	0,3 kg/2min	Natural	55	830	26	88	8,75	12,25	171	39,99	28,93	72,3
6	0,08	0,4 kg/3min	Natural	42	770	22	171	9,40	11,60	181	33,43	24,99	74,8
7	0,05	0,3 kg/2min	Natural	32	804	26	112	8,73	12,27	171	39,94	28,06	70,2
8	0,05	0,4 kg/3min	Natural	31	874	27	73	8,92	12,09	174	35,65	27,74	77,8
9	0,05	0,5 kg/4min	Natural	50	817	20	105	9,24	11,76	178	33,22	24,47	73,6
10	0,05	0,3 kg/2min	Induzida	30	590	22	862	14,26	6,71	3,10	39,66	32,83	82,8
11	0,05	0,4 kg/3min	Induzida	75	500	24	968	15,50	5,44	3,79	35,68	26,76	75,0
12	0,05	0,5 kg/4min	Induzida	60	402	25	1147	16,52	4,40	4,60	33,19	26,64	80,3
13	0,08	0,5 kg/4min	Induzida	92	395	24	1195	16,66	4,27	4,78	33,15	23,72	71,5
14	0,08	0,4 kg/3min	Induzida	80	415	25	1135	15,86	5,08	4,04	35,58	23,03	64,7
15	0,08	0,3 kg/2min	Induzida	100	490	24	903	14,90	6,05	3,42	39,78	30,03	75,5
16	0,13	0,5 kg/4min	Induzida	60	345	25	1189	17,19	3,75	5,42	33,29	25,88	77,7
17	0,13	0,4 kg/3min	Induzida	90	365	23	1175	16,65	4,28	4,77	35,61	26,19	73,5
18	0,13	0,3 kg/2min	Induzida	97	410	25	1162	16,38	4,56	4,48	39,78	31,74	79,8

A	Área de grelha
t	Tempo em regime
T	Temperatura média em regime
Tamb	Temperatura ambiente
CO	CO médio em regime
E	Excesso de ar médio no período em regime
Ph	Potência Nominal
Pu	PoTência Útil
η	Eficiência

APENDICE 08 – TABELAS DE EFICIÊNCIA DE CADA CORRIDA

CORRIDA 01		CORRIDA 02																																									
<p style="text-align: center;">Carga de Lenha 0,5 kg / 4 min Área de Grelha 0,13 m² Diâmetro da Chaminé / Tiragem 18 cm / Natural</p> <p style="text-align: center;">Potência Nominal (lenha)</p>	<p style="text-align: center;">Carga de Lenha 0,4 kg / 3 min Área de Grelha 0,13 m² Diâmetro da Chaminé / Tiragem 18 cm / Natural</p> <p style="text-align: center;">Potência Nominal (lenha)</p>																																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">Carbono</td><td style="text-align: center;">52</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Hidrogênio</td><td style="text-align: center;">6</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Oxigênio</td><td style="text-align: center;">41</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Cinzas</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Umidade base seca (w_s)</td><td style="text-align: center;">13,2</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Umidade base úmida (w_u)</td><td style="text-align: center;">11,6</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">PCS (calculado pela eq. 03)</td><td style="text-align: center;">19800 kJ/kg</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">PCI (calculado pela eq. 05)</td><td style="text-align: center;">16042 ± 137 kJ / kg</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">POTÊNCIA NOMINAL</td><td style="text-align: center;">33,42 kW</td></tr> </table>	Carbono	52	Hidrogênio	6	Oxigênio	41	Cinzas	1	Umidade base seca (w _s)	13,2	Umidade base úmida (w _u)	11,6	PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg	PCI (calculado pela eq. 05)	16042 ± 137 kJ / kg	POTÊNCIA NOMINAL	33,42 kW	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="text-align: center;">Carbono</td><td style="text-align: center;">52</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Hidrogênio</td><td style="text-align: center;">6</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Oxigênio</td><td style="text-align: center;">41</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Cinzas</td><td style="text-align: center;">1</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Umidade base seca (w_s)</td><td style="text-align: center;">13,2</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">Umidade base úmida (w_u)</td><td style="text-align: center;">11,6</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">PCS (calculado pela eq. 03)</td><td style="text-align: center;">19800 kJ/kg</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">PCI (calculado pela eq. 05)</td><td style="text-align: center;">16042 ± 137 kJ / kg</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">POTÊNCIA NOMINAL</td><td style="text-align: center;">35,83 kW</td></tr> </table>	Carbono	52	Hidrogênio	6	Oxigênio	41	Cinzas	1	Umidade base seca (w _s)	13,2	Umidade base úmida (w _u)	11,6	PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg	PCI (calculado pela eq. 05)	16042 ± 137 kJ / kg	POTÊNCIA NOMINAL	35,83 kW						
Carbono	52																																										
Hidrogênio	6																																										
Oxigênio	41																																										
Cinzas	1																																										
Umidade base seca (w _s)	13,2																																										
Umidade base úmida (w _u)	11,6																																										
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg																																										
PCI (calculado pela eq. 05)	16042 ± 137 kJ / kg																																										
POTÊNCIA NOMINAL	33,42 kW																																										
Carbono	52																																										
Hidrogênio	6																																										
Oxigênio	41																																										
Cinzas	1																																										
Umidade base seca (w _s)	13,2																																										
Umidade base úmida (w _u)	11,6																																										
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg																																										
PCI (calculado pela eq. 05)	16042 ± 137 kJ / kg																																										
POTÊNCIA NOMINAL	35,83 kW																																										
<p style="text-align: center;">Potência Útil (gases da combustão)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Volume (%)</th> <th style="text-align: center;">\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)</th> <th style="text-align: center;">Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">N₂</td><td style="text-align: center;">8,83</td><td style="text-align: center;">2,52</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">H₂O</td><td style="text-align: center;">70,16</td><td style="text-align: center;">16,28</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">O₂</td><td style="text-align: center;">10,14</td><td style="text-align: center;">2,47</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">CO₂</td><td style="text-align: center;">10,86</td><td style="text-align: center;">3,93</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">CO</td><td style="text-align: center;">1,31.10⁻²</td><td style="text-align: center;">3.10⁻³</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">POTÊNCIA ÚTIL</td><td style="text-align: center;">25,14 kW</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)	N ₂	8,83	2,52	H ₂ O	70,16	16,28	O ₂	10,14	2,47	CO ₂	10,86	3,93	CO	1,31.10 ⁻²	3.10 ⁻³	POTÊNCIA ÚTIL	25,14 kW		<p style="text-align: center;">Potência Útil (gases da combustão)</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="text-align: center;">Volume (%)</th> <th style="text-align: center;">\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)</th> <th style="text-align: center;">Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td style="text-align: center;">N₂</td><td style="text-align: center;">9,07</td><td style="text-align: center;">0,0017</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">H₂O</td><td style="text-align: center;">69,91</td><td style="text-align: center;">0,0198</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">O₂</td><td style="text-align: center;">9,66</td><td style="text-align: center;">0,0031</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">CO₂</td><td style="text-align: center;">11,33</td><td style="text-align: center;">0,0050</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">CO</td><td style="text-align: center;">1,16.10⁻²</td><td style="text-align: center;">3,3.10⁻⁶</td></tr> <tr><td style="text-align: center;">POTÊNCIA ÚTIL</td><td style="text-align: center;">27,08 kW</td><td></td></tr> </tbody> </table>	Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)	N ₂	9,07	0,0017	H ₂ O	69,91	0,0198	O ₂	9,66	0,0031	CO ₂	11,33	0,0050	CO	1,16.10 ⁻²	3,3.10 ⁻⁶	POTÊNCIA ÚTIL	27,08 kW	
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)																																									
N ₂	8,83	2,52																																									
H ₂ O	70,16	16,28																																									
O ₂	10,14	2,47																																									
CO ₂	10,86	3,93																																									
CO	1,31.10 ⁻²	3.10 ⁻³																																									
POTÊNCIA ÚTIL	25,14 kW																																										
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)																																									
N ₂	9,07	0,0017																																									
H ₂ O	69,91	0,0198																																									
O ₂	9,66	0,0031																																									
CO ₂	11,33	0,0050																																									
CO	1,16.10 ⁻²	3,3.10 ⁻⁶																																									
POTÊNCIA ÚTIL	27,08 kW																																										
<p style="text-align: center;">Excesso de ar Tempo em regime 756 °C (σ: 39 °C) Temperatura média temporal na base da chaminé Entalpia dos Gases de Combustão 877 ± 28 kJ / kg Média temporal da concentração de CO 131 ppm (σ: 14 ppm)</p> <p style="text-align: center;">EFICIÊNCIA : 75,2 %</p>	<p style="text-align: center;">Excesso de ar Tempo em regime 817 °C (σ: 23 °C) Temperatura média temporal na base da chaminé Entalpia dos Gases de Combustão 916 ± 19 kJ / kg Média temporal da concentração de CO 116 (σ: 8ppm)</p> <p style="text-align: center;">EFICIÊNCIA : 75,6 %</p>																																										

CORRIDA 03

Carga de Lenha	0,3 kg / 2 min
Área de Grelha	0,13 m²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	18 cm / Natural
Potência Nominal (lenha)	
	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,5
Umidade base úmida (w _u)	11,8
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15994 ± 114 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	39,98 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)
	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)
N ₂	9,31
H ₂ O	69,68
O ₂	9,31
CO ₂	11,70
CO	8,5.10 ⁻³
POTÊNCIA ÚTIL	30,45 kW
Excesso de ar	1,80
Tempo em regime	67 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	840 °C (cr. 27°C)
Entalpia dos Gases de Combustão	945 ± 24 kJ / kg
Média temporal da concentração de CO	65 ppm (cr. 6ppm)
EFICIÊNCIA : 76,2 %	

CORRIDA 04

Carga de Lenha	0,5 kg / 4 min
Área de Grelha	0,08 m²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	18 cm / Natural
Potência Nominal (lenha)	
	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	14,5
Umidade base úmida (w _u)	12,6
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15833 ± 60 kJ/kg
POTÊNCIA NOMINAL	32,98 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)
	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)
N ₂	9,23
H ₂ O	78,99
O ₂	9,65
CO ₂	11,35
CO	1,2.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	25,10 kW
Excesso de ar	1,85
Tempo em regime	30 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	811 °C (cr. 23°C)
Entalpia dos Gases de Combustão	909 ± 21 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	120 ppm (cr. 8 ppm)
EFICIÊNCIA : 76,1	

CORRIDA 06	
Carga de Lenha	0,4 kg / 3 min
Área de Grelha	0,08 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	18 cm / Natural
Potência Nominal (lenha)	
	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	20,2
Umidade base úmida (w _u)	16,6
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	14966 ± 132 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	33,42 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	$\dot{m}_{gas_comb}^v$ (kg/s)
Energia específica	$(\dot{m}_{gas_comb}^v \Delta h_{gas_comb})$ (kW)
N ₂	9,36
H ₂ O	69,62
O ₂	9,40
CO ₂	11,60
CO	1,71 · 10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	24,99 kW
Excesso de ar	1,81
Tempo em regime	42 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	770 ° (σ: 22 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	862 ± 19 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	171 ppm (σ: 7 ppm)
EFICIÊNCIA : 74,8 %	

CORRIDA 05	
Carga de Lenha	0,3 kg / 2 min
Área de Grelha	0,08 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	18 cm / Natural
Potência Nominal (lenha)	
	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,5
Umidade base úmida (w _u)	11,8
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15994 ± 109 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	39,98 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	$\dot{m}_{gas_comb}^v$ (kg/s)
Energia específica	$(\dot{m}_{gas_comb}^v \Delta h_{gas_comb})$ (kW)
N ₂	9,64
H ₂ O	69,34
O ₂	8,75
CO ₂	12,25
CO	8,8 · 10 ⁻³
POTÊNCIA ÚTIL	28,92 kW
Excesso de ar	1,71
Tempo em regime	55 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	830 ° (σ: 36 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	936 ± 31 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	88 ppm (σ: 9 ppm)
EFICIÊNCIA : 72,3 %	

CORRIDA.08	
Carga de Lenha	0,4 kg / 3 min
Área de Grelha	0,05 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	18 cm / Natural
Potência Nominal (lenha)	
	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,7
Umidade base úmida (w _u)	11,9
PCS (calculado pela eq. 03)	19600 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15961 ± 241 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	
35,65 kW	
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	\dot{V}_{gas_comb} (kg/s)
Energia específica ($\dot{V}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)	
N ₂	9,84
H ₂ O	69,14
O ₂	8,92
CO ₂	12,08
CO	7,8.10 ⁻³
POTÊNCIA ÚTIL	
27,74 kW	
Excesso de ar	
Tempo em regime	
Temperatura média temporal na base da chaminé	
Entalpia dos Gases de Combustão	
Média temporal da concentração de CO	
EFICIÊNCIA : 77,8 %	

CORRIDA.07	
Carga de Lenha	0,3 kg / 4 min
Área de Grelha	0,05 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	18 cm / Natural
Potência Nominal (lenha)	
	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,6
Umidade base úmida (w _u)	11,9
PCS (calculado pela eq. 03)	19600 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15978 ± 76 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	
39,94 kW	
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	\dot{V}_{gas_comb} (kg/s)
Energia específica ($\dot{V}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)	
N ₂	9,94
H ₂ O	69,04
O ₂	8,73
CO ₂	12,28
CO	1,2.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	
28,05 kW	
Excesso de ar	
Tempo em regime	
Temperatura média temporal na base da chaminé	
Entalpia dos Gases de Combustão	
Média temporal da concentração de CO	
EFICIÊNCIA : 70,3 %	

CORRIDA 10	
Carga de Lenha	0, 3 kg / 2 min
Área de Grelha	0,05 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida
Potência Nominal (lenha)	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	14,3
Umidade base úmida (w _u)	12,4
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15865 ± 152 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	39,66 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	$\dot{m}_{\text{gas_comb}}$ (kg/s)
Energia específica	$(\dot{m}_{\text{gas_comb}} \Delta h_{\text{gas_comb}})$ (kW)
N ₂	6,00
H ₂ O	0,0020
O ₂	2,29
CO ₂	72,97
CO	0,0367
	22,63
	14,26
	4,66
	6,71
	0,0082
	0,0053
	3,23
	3,30.10 ⁻⁶
	6,52.10 ⁻²
	2,10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	32,83 kW
Excesso de ar	3,10
Tempo em regime	30 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	590 °C (σr 13 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	624 ± 17 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	652 ppm (σr 71 ppm)
EFICIÊNCIA : 82,8%	

CORRIDA 09	
Carga de Lenha	0, 5 kg / 4 min
Área de Grelha	0,05 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	18 cm / Natural
Potência Nominal (lenha)	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,8
Umidade base úmida (w _u)	12,1
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15945 ± 124 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	33,22 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	$\dot{m}_{\text{gas_comb}}$ (kg/s)
Energia específica	$(\dot{m}_{\text{gas_comb}} \Delta h_{\text{gas_comb}})$ (kW)
N ₂	9,21
H ₂ O	0,0015
O ₂	2,54
CO ₂	69,78
CO	0,0178
	15,61
	9,24
	2,18
	0,0027
	4,12
	0,0047
	2,4.10 ⁻³
	2,7.10 ⁻⁶
	1,10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	24,46 kW
Excesso de ar	1,78
Tempo em regime	50 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	817 °C (σr 19 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	917 ± 15 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	105 ppm (σr 4 ppm)
EFICIÊNCIA : 73,6%	

CORRIDA 11	
Carga de Lenha	0,4 kg / 3 min
Área de Grelha	0,05 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida
Potência Nominal (lenha)	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,6
Umidade base úmida (w _u)	11,9
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15977 ± 164 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	35,68 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	$\dot{m}_{\text{gás, comb}}^{\text{pot}} \text{ (kg/s)}$
Energia específica	$(\dot{m}_{\text{gás, comb}}^{\text{pot}} \Delta h_{\text{gás, comb}}^{\text{pot}}) \text{ (kW)}$
N ₂	6,52
H ₂ O	72,43
O ₂	15,04
CO ₂	5,91
CO	6,7 · 10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	24,88 kW
Excesso de ar	3,79
Tempo em regime	75 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	500 °C (σ: 19 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	530 ± 21 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	965 ppm (σ: 65 ppm)
EFICIÊNCIA : 75,0 %	

CORRIDA 12	
Carga de Lenha	0,5 kg / 4 min
Área de Grelha	0,05 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida
Potência Nominal (lenha)	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,9
Umidade base úmida (w _u)	12,2
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15929 ± 88 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	33,19 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	$\dot{m}_{\text{gás, comb}}^{\text{pot}} \text{ (kg/s)}$
Energia específica	$(\dot{m}_{\text{gás, comb}}^{\text{pot}} \Delta h_{\text{gás, comb}}^{\text{pot}}) \text{ (kW)}$
N ₂	5,11
H ₂ O	73,83
O ₂	16,55
CO ₂	4,40
CO	1,1 · 10 ⁻¹
POTÊNCIA ÚTIL	24,88 kW
Excesso de ar	4,60
Tempo em regime	60 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	402 °C (σ: 13 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	412 ± 15 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	1147 ppm (σ: 86 ppm)
EFICIÊNCIA : 80,3 %	

CORRIDA 14	
Carga de Lenha	0,4 kg / 3 min
Área de Grelha	0,08 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida
Potência Nominal (lenha)	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	13,9
Umidade base úmida (w _u)	12,2
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15929 ± 83 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	35,6 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)
Energia específica	$(\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb})$ (kW)
H ₂ O	5,97
N ₂	0,0020
O ₂	0,0379
CO ₂	15,86
CO	0,0094
	5,08
	1,1.10 ⁻¹
	5,9.10 ⁻⁵
	2,5.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	23,03 kW
Excesso de ar	4,04
Tempo em regime	80 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	415 °C (σ: 18 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	430 ± 17 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	1135 ppm (σ: 55 ppm)
EFICIÊNCIA : 64,7 %	

CORRIDA 13	
Carga de Lenha	0,5 kg / 4 min
Área de Grelha	0,08 m ²
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida
Potência Nominal (lenha)	%
Carbono	52
Hidrogênio	6
Oxigênio	41
Cinzas	1
Umidade base seca (w _s)	14,0
Umidade base úmida (w _u)	12,3
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg
PCI (calculado pela eq. 05)	15912 ± 121 kJ / kg
POTÊNCIA NOMINAL	33,15 kW
Potência Útil (gases da combustão)	
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)
Energia específica	$(\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb})$ (kW)
N ₂	5,41
H ₂ O	0,002005716
O ₂	0,041792765
CO ₂	0,010818458
CO	4,27
	0,003813265
	1,2.10 ⁻¹
	6,64232E-05
	2,7.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL	23,72 kW
Excesso de ar	4,78
Tempo em regime	92 min
Temperatura média temporal na base da chaminé	395 °C (σ: 6 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão	405 ± 8 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO	1195 ppm (σ: 163 ppm)
EFICIÊNCIA : 71,5 %	

CORRIDA 15			
Carga de Lenha	0,3 kg / 2 min		
Área de Grelha	0,08 m ²		
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida		
Potência Nominal (lenha)	%		
Carbono	52		
Hidrogênio	6		
Oxigênio	41		
Cinzas	1		
Umidade base seca (w _s)	14,0		
Umidade base úmida (w _u)	12,3		
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg		
PCI (calculado pela eq. 05)	15912 ± 127 kJ / kg		
POTÊNCIA NOMINAL	39,8 kW		
Potência Útil (gases da combustão)			
Volume (%)	$\dot{m}_{gás_comb}$ (kg/s)		
	Energia específica ($\dot{m}_{gás_comb} \Delta \hat{h}_{gás_comb}$) (kW)		
H ₂ O	6,13	0,0022	2,14
N ₂	72,82	0,0408	20,74
O ₂	14,90	0,0095	4,47
CO ₂	6,06	0,0053	2,66
CO	9,10 ⁻²	5,10 ⁻⁵	2,6.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL			30,03 kW
Excesso de ar			3,42
Tempo em regime			100 min
Temperatura média temporal na base da chaminé			490 °C (σ: 16 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão			517 ± 21 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO			903 ppm (σ: 77 ppm)
			EFICIÊNCIA : 75,5 %

CORRIDA 16			
Carga de Lenha	0,5 kg / 4 min		
Área de Grelha	0,05 m ²		
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida		
Potência Nominal (lenha)	%		
Carbono	52		
Hidrogênio	6		
Oxigênio	41		
Cinzas	1		
Umidade base seca (w _s)	13,6		
Umidade base úmida (w _u)	11,9		
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg		
PCI (calculado pela eq. 05)	15933 ± 134 kJ / kg		
POTÊNCIA NOMINAL	33,3 kW		
Potência Útil (gases da combustão)			
Volume (%)	$\dot{m}_{gás_comb}$ (kg/s)		
	Energia específica ($\dot{m}_{gás_comb} \Delta \hat{h}_{gás_comb}$) (kW)		
H ₂ O	4,54	0,0022	1,38
N ₂	74,405	0,0540	18,56
O ₂	17,19	0,0143	4,50
CO ₂	3,76	0,0043	1,41
CO	1,2.10 ⁻¹	8,6.10 ⁻⁵	3.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL			30,03 kW
Excesso de ar			5,42
Tempo em regime			60 min
Temperatura média temporal na base da chaminé			345 °C (σ: 14°C)
Entalpia dos Gases de Combustão			346 ± 17 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO			1189 ppm (σ: 108ppm)
			EFICIÊNCIA : 75,5 %

CORRIDA 18			
Carga de Lenha	0,3 kg / 2 min		
Área de Grelha	0,05 m ²		
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida		
Potência Nominal (lenha)			
	%		
Carbono	52		
Hidrogênio	6		
Oxigênio	41		
Cinzas	1		
Umidade base seca (w _s)	14,0		
Umidade base úmida (w _u)	12,3		
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg		
PCI (calculado pela eq. 05)	15912 ± 94 kJ / kg		
POTÊNCIA NOMINAL	39,8kW		
Potência Útil (gases da combustão)			
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)		
	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)		
H ₂ O	5,35	0,0025	1,99
N ₂	73,59	0,0536	22,37
O ₂	16,38	0,0136	5,23
CO ₂	4,57	0,0052	2,12
CO	1,2.10 ⁻¹	8,4.10 ⁻⁶	3,6.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL			31,74 kW
Excesso de ar			4,48
Tempo em regime			97 min
Temperatura média temporal na base da chaminé			410 °C (σ: 12 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão			423 ± 15 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO			1162 ppm (σ: 93ppm)
			EFICIÊNCIA : 79,8 %

CORRIDA 17			
Carga de Lenha	0,4 kg / 3 min		
Área de Grelha	0,05 m ²		
Diâmetro da Chaminé / Tiragem	30 cm / Induzida		
Potência Nominal (lenha)			
	%		
Carbono	52		
Hidrogênio	6		
Oxigênio	41		
Cinzas	1		
Umidade base seca (w _s)	13,8		
Umidade base úmida (w _u)	12,1		
PCS (calculado pela eq. 03)	19800 kJ/kg		
PCI (calculado pela eq. 05)	15945 ± 82 kJ / kg		
POTÊNCIA NOMINAL	35,6 kW		
Potência Útil (gases da combustão)			
Volume (%)	\dot{m}_{gas_comb} (kg/s)		
	Energia específica ($\dot{m}_{gas_comb} \Delta h_{gas_comb}$) (kW)		
H ₂ O	4,79	0,0021	1,47
N ₂	74,15	0,0509	18,66
O ₂	16,65	0,0131	4,40
CO ₂	4,28	0,0046	1,63
CO	1,2.10 ⁻¹	8,1.10 ⁻⁶	3.10 ⁻²
POTÊNCIA ÚTIL			26,2 kW
Excesso de ar			4,77
Tempo em regime			90 min
Temperatura média temporal na base da chaminé			365 °C (σ: 14 °C)
Entalpia dos Gases de Combustão			369 ± 12 kJ/kg
Média temporal da concentração de CO			1175 ppm (σ: 105 ppm)
			EFICIÊNCIA : 73,5 %

APÊNDICE 09 - Método de Cálculo da incerteza da eficiência

A eficiência é uma medida indireta, pois depende de outras grandezas, cada uma com sua incerteza.

Considerando uma grandeza X , que é função de n outras grandezas $X = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$. O desvio máximo de X é dado pela equação (8.1).

$$\Delta X = \sum_{i=1}^n \left| \frac{\partial X}{\partial x_i} \right| \Delta x_i \quad (8.1)$$

Quando não se tem como calcular o valor absoluto das derivadas parciais, a incerteza é calculada segundo as equações abaixo. No caso do trabalho em questão, foi primeiro calculada a incerteza das energias útil e nominal.

A incerteza da energia nominal, dada por $Q_{\text{nominal}} = \dot{m}_{\text{lenha}} PCI_{\text{lenha}}$ foi calculada segundo a equação (8.2).

$$\Delta Q_{\text{nominal}} = \left(\frac{\Delta \dot{m}_{\text{lenha}}}{\dot{m}_{\text{lenha}}} + \frac{\Delta PCI}{PCI} \right) Q_{\text{nominal}} \quad (9.2)$$

Onde a incerteza da vazão mássica de lenha (\dot{m}_{lenha}) foi calculada pela incerteza da massa de lenha, calculada através da precisão da balança e o intervalo com que cada carga era alimentada, segundo a equação (9.4).

$$\Delta \dot{m}_{\text{lenha}} = \left(\frac{\Delta m_{\text{lenha}}}{m_{\text{lenha}}} + \frac{\Delta t}{t} \right) \dot{m}_{\text{lenha}} \quad (9.4)$$

E incerteza do PCI foi calculada em função da variação da umidade das 3 amostras de lenha para cada corrida.

A incerteza da energia útil, dada por $Q_{\text{útil}} = \dot{m}_{\text{gás_comb}} \Delta h_{\text{gás_comb}}$ foi calculada segundo a equação (9.3).

$$\Delta Q_{\text{útil}} = \left(\frac{\Delta \dot{m}_{\text{gás_comb}}}{\dot{m}_{\text{gás_comb}}} + \frac{\Delta \Delta h}{\Delta h} \right) Q_{\text{útil}} \quad (9.3)$$

Onde a incerteza da vazão mássica de gases ($\dot{m}_{\text{gás_comb}}$) foi calculada pela equação (8.5)

$$\Delta \dot{m}_{\text{gás_comb}} = \left(\frac{\Delta m_{\text{gas_comb}}}{m_{\text{gas_comb}}} + \frac{\Delta \dot{m}_{\text{lenha}}}{\dot{m}_{\text{lenha}}} \right) \dot{m}_{\text{gas_comb}} \quad (9.5)$$

E a incerteza da variação de entalpia foi calculada segundo a equação (9.6).

$$\Delta(\Delta h) = \frac{Q_{\text{útil}}}{\dot{m}_{\text{gás_comb}}} \Delta \dot{m}_{\text{gas_comb}} \quad (9.6)$$

A tabela abaixo apresenta os valores das incertezas calculadas segundo o memorial de cálculo apresentado neste apêndice.

Corridas	$\Delta Q_{\text{útil}}$ (kW)	$Q_{\text{útil}}$ (kW)	$\Delta Q_{\text{nominal}}$ (kW)	Q_{nominal} (kW)	Δ Eficiência (%)
1	0,27	25,14	1,18	33,42	2,8
2	0,24	27,08	1,19	35,83	2,6
3	0,27	30,45	1,19	39,98	2,4
4	0,17	25,10	1,14	32,99	2,7
5	0,24	28,93	1,19	39,99	2,2
6	0,21	24,99	1,11	33,43	2,6
7	0,22	28,06	1,17	39,94	2,1
8	0,21	27,74	1,19	35,65	2,7
9	0,23	24,47	1,17	33,22	2,7
10	0,32	31,18	1,19	39,66	2,3
11	0,22	25,11	1,21	35,68	2,3
12	0,17	24,61	1,16	33,19	2,5
13	0,16	21,88	1,16	33,16	2,2
14	0,19	21,52	1,29	35,58	2,0
15	0,27	28,36	1,28	39,78	2,1
16	0,16	23,59	1,32	33,29	2,5
17	0,2	24,17	1,16	35,61	2,1
18	0,3	29,41	1,19	39,78	2,2

Onde

$\Delta Q_{\text{útil}}$: incerteza da energia útil (kW);

$\Delta Q_{\text{nominal}}$: incerteza da energia nominal (kW);

Δ Eficiência: incerteza da eficiência (%).

Apêndice 10 - Tabela Geral do Balanço de Energia

TIRAGEM NATURAL	Corrida 01		Corrida 02		Corrida 03		Corrida 04		Corrida 05		Corrida 06		Corrida 07		Corrida 08		Corrida 09	
	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%
$Q_{entrada}$																		
$Q_{ar_primario}$	0,00	0,00	0,12	0,33	0,12	0,30	0,26	0,78	0,02	0,06	0,19	0,57	0,02	0,04	0,03	0,08	0,26	0,78
Q_{lenha}	33,42	100,00	35,63	99,67	39,98	99,70	32,99	99,22	39,99	99,95	33,43	99,43	39,94	99,96	35,66	99,92	33,22	99,22
TOTAL	33,42	100,00	35,95	100,00	40,10	100,00	33,25	100,00	40,01	100,00	33,62	100,00	39,96	100,00	35,68	100,00	33,48	100,00
Q_{saida}																		
$Q_{gases_combust}$	25,14	75,22	27,07	75,30	30,46	75,94	25,10	75,51	28,88	72,30	24,99	74,35	28,06	70,21	27,74	77,74	24,47	73,08
Q_{carvao}	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,02	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
Q_{lenha}	0,02	0,06	0,02	0,06	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02	0,05	0,02	0,06	0,02	0,06
Q_{perdas}	6,13	18,34	6,48	18,03	6,98	17,41	6,38	19,19	6,56	16,40	6,01	17,88	6,25	15,64	7,24	20,29	6,63	19,50
TOTAL	31,30	93,66	33,58	93,41	37,46	93,42	31,51	94,79	35,52	88,78	31,03	92,32	34,34	86,92	35,01	98,12	31,03	92,67

TIRAGEM INDUZIDA	Corrida 10		Corrida 11		Corrida 12		Corrida 13		Corrida 14		Corrida 15		Corrida 16		Corrida 17		Corrida 18	
	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%	Energia (kW)	%
$Q_{entrada}$																		
$Q_{ar_primario}$	0,13	0,33	0,17	0,47	0,00	0,00	0,26	0,78	0,00	0,00	0,20	0,50	0,00	0,00	0,30	0,84	0,00	0,00
Q_{lenha}	39,66	99,67	35,68	99,53	33,19	100,00	33,15	99,22	35,57	100,00	39,78	99,50	0,00	0,00	35,60	99,16	39,78	100,00
TOTAL	39,79	100,00	35,85	100,00	33,19	100,00	33,41	100,00	35,57	100,00	39,98	100,00	33,29	100,00	35,90	100,00	39,78	100,00
Q_{saida}																		
$Q_{gases_combust}$	32,83	82,50	24,88	69,39	26,64	80,27	23,72	70,99	29,03	84,75	30,03	75,11	25,88	77,75	26,19	72,86	31,74	79,80
Q_{carvao}	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
Q_{lenha}	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03	0,01	0,03
Q_{perdas}	4,54	11,41	4,01	11,16	3,59	10,82	3,44	10,30	3,72	10,46	3,40	8,50	3,01	9,04	3,18	8,86	3,66	9,18
TOTAL	37,39	93,96	28,91	80,54	30,25	91,15	27,18	81,36	26,77	75,26	33,45	83,66	28,91	86,85	29,39	81,87	35,41	89,02

ANEXO 01 - Construção da Fornalha

Neste anexo são apresentadas algumas fotos da etapa da construção da fornalha.



ANEXO 02 - Características técnicas dos materiais de construção da fornalha

As características técnicas dos materiais de construção utilizados na fornalha foram retiradas da FDT (Folha de dados técnicos IBAR).

Cimento Refratário	
- COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
Composto	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	44,0
CaO	6,0
Fe ₂ O ₃	2,0
SiO ₂	44,0
- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Massa Específica Aparente (110°Cx24h)	2,15 (g/cm ³)
Massa Específica Aparente (815°Cx5h)	2,03 (g/cm ³)
Massa Específica Aparente (1400°Cx5h)	2,08 (g/cm ³)
Qde. de Água p/ Mistura	11,5 %
Tempo de pega	240 min
Resistência a Compressão (110°Cx24h)	20,0 MPa
Resistência a Compressão (1400°Cx5h)	36,0 MPa
Resistência a Compressão (815°Cx5h)	19,0 MPa
Temperatura máxima de uso	1400 °C
Calor específico (25°C)	1,55 kJ/kg °C
- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Composto	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	35 - 38
SiO ₂	56
Fe ₂ O ₃	1,8
- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Densidade aparente	2,07 g/cm ³
Porosidade aparente	25 - 30%
Refratariedade Simples	C ₃₀ = 1300°C
Resistência à Compressão	400 kg/cm ²
Calor específico (25°C)	0,84 kJ/kg °C
Papel de fibra cerâmica	
- COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
Composto	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	42-46
SiO ₂	50-60
- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Papel de fibra cerâmica, mistura de fibra de sílica e alumina de alta pureza, isento de amianto.	
Descrição do produto	200 kg/m ³
-Densidade Aparente	69-138 kPa
-Resistência a Tração	1260 °C
Temperatura máxima de uso	1260 °C
Temperatura máxima de uso	(1/8") 3,2 mm
Espessura	205 °C 0,05 (W/m.K)
Condutividade Térmica	540 °C 0,09 (W/m.K)
	1095 °C 0,22 (W/m.K)
Tijolo e Plaqueta Refratários	
- Dimensões : 229 X 114 X 63 mm (tijolo) 229 X 114 X 25 mm (plaqueta)	
- COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
Composto	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	35 - 38
SiO ₂	56
Fe ₂ O ₃	1,8
- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Densidade aparente	2,07 g/cm ³
Porosidade aparente	25 - 30%
Refratariedade Simples	C ₃₀ = 1300°C
Resistência à Compressão	400 kg/cm ²
Calor específico (25°C)	0,84 kJ/kg °C
Argamassa refratária	
- COMPOSIÇÃO QUÍMICA	
Composto	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	40,0
Fe ₂ O ₃	1,3
Na ₂ O + K ₂ O	3,0
SiO ₂	54
- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
Nome do produto	PLACIBAR UG
Descrição do produto	Argamassa Refratária Silico-Aluminosa, Úmida de Pega ao Ar.
Força Ligante (110°C X 24h)	2,5 MPa
Força Ligante (1450°C X 5h)	6,0 MPa
Tempo de Retenção de Água	120s
Tempo de pega	1550 °C
Temperatura máxima de uso	0,84 kJ/kg °C
Calor específico (25°C)	

Manta de fibra cerâmica

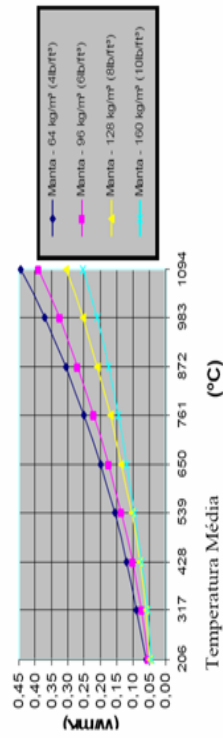
- COMPOSIÇÃO QUÍMICA

Composto	Quantidade (%)
Al ₂ O ₃	44 - 52
TiO ₂	0,1 - 0,2
Fe ₂ O ₃	0,1 - 0,2
SiO ₂	49 - 53

- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS

- Densidade 64 kg/m³
- Resistência a Tração 69-138 kPa
- Temperatura máxima de uso 1315 °C
- Temperatura contínua de uso 1260 °C
- Ponto de Fusão 1760 °C
- Comprimento 3810 mm
- Largura 610 mm
- Espessura 50,8 mm
- Diâmetro da fibra 2,5 mm
- Comprimento da Fibra 178 mm
- Prazo de estocagem Indeterminado
- Contração Linear 1000°C x 24 h 2%

CONDUTIVIDADE TÉRMICA



FONTE : FDT IBAR MANTA CERAMICA

Alumínio Corrugado

- CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Espessura	2 mm
Ondulação – Amplitude de corrugação	5 mm
Altura da corrugação	0,8 mm
Emissividade	0,07
Condutividade Térmica (25°C)	1,14 W/m.K

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)