

OSCAR LUIZ TEIXEIRA DE REZENDE

**O USO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DAS TEMPERATURAS DE UM
CONJUNTO GASEIFICADOR/COMBUSTOR DE BIOMASSAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R339u
2012

Rezende, Oscar Luiz Teixeira, 1953-
O uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas de
conjunto gaseificador/combustor de biomassas / Oscar Luiz
Teixeira Rezende. – Viçosa, MG, 2012.
viii, 126f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 117-121.

1. Gaseificadores - Métodos estatísticos. 2. Biomassa -
Gaseificação. 3. Energia de biomassa. 4. Combustão -
Controle. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 665.772

OSCAR LUIZ TEIXEIRA DE REZENDE

**O USO DA LÓGICA FUZZY NO CONTROLE DAS TEMPERATURAS DE UM
CONJUNTO GASEIFICADOR/COMBUSTOR DE BIOMASSAS**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 03 de abril de 2012.



Luiz Aurélio Raggi



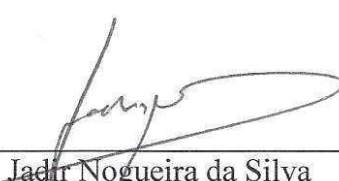
Luís Eduardo Martins de Lima



Adílio Flauzino de Lacerda Filho



Hans Rolf Kulitz


Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

À minha esposa Ana
e aos meus filhos Bruno, Thiago e Barbara,
que são a maior razão da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa e, em especial, ao Departamento de Engenharia Agrícola, extensivo a todos professores e funcionários.

Ao Instituto Federal do Espírito Santo, Campus Vitória, em especial aos professores da Coordenadoria de Matemática.

Ao professor Jadir Nogueira da Silva, pela oportunidade, pela confiança e pela orientação tranquila e segura.

Ao professor Hans Rolf Kulitz, do Instituto Federal do Espírito Santo, pela amizade, pelo apoio e pela presteza durante a sua orientação técnica.

Aos amigos Antônio Henrique e Madalena, pelas conversas políticas, filosóficas e científicas, em nossos encontros nos finais de tarde nas cafeterias de Vitória.

Às amigas Margarida e Célia, pelo apoio e pelos agradáveis almoços de domingo durante a minha estada em Viçosa.

Aos amigos e colegas de Doutorado Ivanildo, Pedro, Kátia e Fábio Zanatta, pela troca de experiências e pelos valiosos conselhos.

Aos amigos Cássio e Svetlana, pela presteza com que contribuíram na execução da fase experimental deste trabalho.

Aos colaboradores e funcionários da área de armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola, pelo auxílio e pela disponibilidade.

Às instituições CNPq, CAPES e FAPEMIG, pelo apoio financeiro na execução do projeto.

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT.....	viii
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo geral.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
2. APORTES TEÓRICOS.....	4
2.1. Gaseificação da biomassa.....	4
2.1.1. Reações químicas da gaseificação.....	5
2.1.1.1. Combustão.....	5
2.1.1.2. Reação de Boudouard.....	6
2.1.1.3. Reação de gás de água ou carbono-vapor.....	6
2.1.1.4. Reação de formação de metano.....	6
2.1.1.5. Reações homogêneas (fase gasosa).....	6
2.1.2. O ar na gaseificação.....	7
2.1.3. Tecnologias da gaseificação.....	9
2.1.3.1. Gaseificador de leito fixo.....	10
2.1.3.2. Gaseificador de fluxo cruzado.....	11
2.1.3.3. Gaseificador de leito fluidizado.....	12
2.1.4. Termodinâmica da gaseificação.....	13
2.1.4.1. Poder calorífico.....	13
2.1.4.2. Comburente.....	15
2.1.4.3. Balanços de massa e de energia.....	16
2.1.4.4. Balanço de massa e de energia no reator.....	18
2.1.5. Revisão bibliográfica sobre gaseificação.....	21
2.2. Lógica <i>fuzzy</i>	23
2.2.1. Conjuntos <i>fuzzy</i>	24
2.2.1.1. As propriedades.....	26
2.2.2. Relação <i>fuzzy</i> binária.....	27
2.2.2.1. Composição de duas relações <i>fuzzy</i>	27
2.2.3. Inferências <i>fuzzy</i>	28
2.3. Sistema lógico <i>fuzzy</i>	29
2.3.1. O método de inferência Mamdani.....	31

2.3.2. O método de inferência de Kang-Takagi-Sugeno (KTS) e a particularização de Takagi-Sugeno (TS).....	33
2.3.3. Exemplo de aplicação dos métodos Mamdani e TS.....	35
2.3.4. Revisão bibliográfica sobre lógica <i>fuzzy</i> na agricultura	43
3. MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1. Projeto do gaseificador.....	47
3.1.1. Sistema de ventilação	50
3.1.2. Ignição	50
3.1.3. Aquisição de dados da temperatura durante os testes preliminares	50
3.1.4. Vazão do ar primário, de exaustão e umidade relativa do ar ambiente	51
3.1.5. Umidade do combustível.....	52
3.1.6. Entalpia do ar ambiente	52
3.2. Sistema de controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador	53
3.2.1. Sistema lógico <i>fuzzy</i> para controlar a temperatura na zona de combustão do gaseificador.....	55
3.2.1.1. Construção dos conjuntos fuzzy	56
3.2.2. Representação do sistema de controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador.....	59
3.3. Projeto do combustor	61
3.4. Sistema de controle da temperatura do ar quente de exaustão.....	62
3.4.1. SLF para controlar a temperatura do ar quente de exaustão.....	63
3.4.2. Representação do sistema de controle da temperatura do ar quente de exaustão	64
3.5. Gaseificador/combustor	66
3.5.1. Sistema de controle.....	67
3.5.2. Concentração de CO e CO ₂ no ar de exaustão	69
3.6. Métodos estatísticos de análise	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1. Teste preliminar com o gaseificador	73
4.1.1. Teste 01	73
4.2. Controle do sistema de ventilação do gaseificador/combustor	79
4.2.1. Teste 02	79
4.2.2. Teste 03	83
4.2.2.1. Considerações sobre o controle da temperatura do ar quente de exaustão	87

4.2.3. Teste 04	89
4.2.4. Teste 05	95
4.2.4.1. Considerações sobre os testes 02, 03, 04 e 05	101
4.3. Desestabilização da temperatura na zona de combustão do gaseificador	101
4.3.1. Teste 06	101
4.3.2. Teste 07	106
4.3.2.1. Considerações sobre os testes 06 e 07	110
4.4. Vazão e concentração de CO e CO ₂ no ar quente de exaustão	111
5. CONCLUSÃO	115
REFERÊNCIAS.....	117
APÊNDICE.....	122

RESUMO

REZENDE, Oscar Luiz Teixeira de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2012. **O uso da lógica fuzzy no controle das temperaturas de um conjunto gaseificador/combustor de biomassas.** Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Coorientadores: Evandro de Castro Melo e Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Este trabalho consistiu da projeção e construção de um gaseificador de biomassa do tipo concorrente que, acoplado a um combustor do gás, produziu uma mistura de ar quente com ar ambiente para ser utilizada na secagem de grãos e outros fins. O objetivo foi controlar *a temperatura na zona de combustão do gaseificador* e *a temperatura do ar quente de exaustão* do conjunto gaseificador/combustor. A fundamentação matemática escolhida para desenvolver o algoritmo de controle das temperaturas do conjunto gaseificador/combustor foi o Sistema Lógico Fuzzy, que utiliza os conceitos da lógica fuzzy para modelar processos mediante os conhecimentos empíricos de especialistas em um determinado campo de estudos. O conjunto gaseificador/combustor foi avaliado no Laboratório de Energias Alternativas do DEA/UFV. Foram feitos oito testes experimentais, sendo que os dois primeiros foram testes preliminares, para avaliar o projeto do gaseificador e coletar dados que subsidiassem a construção dos Sistemas Lógicos Fuzzy. Nos quatro testes seguintes avaliou-se a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy em manter as temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão do conjunto gaseificador/combustor nos valores pretendidos. Nos dois últimos, avaliaram-se as respostas dos Sistemas Lógicos Fuzzy a situações em que foram provocadas instabilidades na temperatura na zona de combustão do reator, utilizando, simultaneamente, mais de um tipo de combustível. Durante os testes foram coletados dados de temperatura em diversos pontos do conjunto gaseificador/combustor. Os métodos estatísticos utilizados para avaliar a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy foram: a variabilidade dos dados de temperatura e o teste de t de *Student*, para comparar a temperatura média dos dados de temperatura e o valor de referência, o *setpoint*. Os resultados mostraram que os Sistemas Lógicos Fuzzy controlaram, de forma eficiente, *a temperatura na zona de combustão do gaseificador* e *a temperatura do ar quente de exaustão*, o que viabiliza o seu uso na secagem de grãos e outros fins.

ABSTRACT

REZENDE, Oscar Luiz Teixeira de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2012. **Using fuzzy logic to control the temperatures of a set gasifier/combustor of biomasses.** Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Co-advisers: Evandro de Castro Melo and Paulo Marcos de Barros Monteiro.

This study consisted in designing and building a concurrent biomass gasifier that, when attached to a gas combustor, produced a mix of hot air and ambient air to be used for drying grains, among other things. It aimed at controlling the combustion zone gasifier temperature and exhaust hot air temperature. The theoretical mathematical framework chosen to develop the algorithm to temperatures control of the set gasifier/combustor was Fuzzy Logic System, which uses fuzzy logic concepts to model processes based on the empirical knowledge of specialists in a particular study field. The set gasifier/combustor was assessed at the DEA/UFV Alternatives Energies Lab. Eight experimental tests were carried out. The first two were preliminary tests to assess the gasifier design and collect data to support the construction of Fuzzy Logic Systems. The next four tests intended to assess efficiency of the Fuzzy Logic Systems and keep gasifier combustion zone and exhaust air temperatures of the set gasifier/combustor at desired values. The last two tests assessed the Fuzzy Logic System responses to situations in which instability in gasification combustion zone temperature was caused by using, simultaneously, in the same test, different types of fuel. Temperature data at different points of the gasifier/combustor were collected during the tests. The statistic methods used for assessing Fuzzy Logic System efficiency were: temperature data variability and Student t-test, to compare average temperature of temperature data and the reference value, *setpoint*. The results showed that the Fuzzy Logic Systems effectively controlled the gasifier combustion zone and exhaust hot air temperatures, which enables its use for drying grains and other purposes.

1. INTRODUÇÃO

Desde os tempos primórdios o homem depende de cinco recursos naturais para a sua sobrevivência e para a produção de energia: o fogo, a terra, a água, o ar e a biomassa.

Durante séculos esses recursos foram consumidos sem a preocupação com seu esgotamento e com os danos ambientais que a exploração deles poderia causar. Desde a Revolução Industrial na Inglaterra e a descoberta do automóvel, a partir do início do século XX, os combustíveis de origem fóssil vêm sendo consumidos em grande escala, tornando a humanidade dependente da sua energia.

Os danos causados ao meio ambiente e as projeções de sua escassez, ainda neste século, conduzem à busca por fontes de energia que sejam ambientalmente sustentáveis, entre elas, a da biomassa.

A conversão da energia da biomassa em gás combustível teve sua origem nas últimas décadas do século XVIII. Desde então, houve avanços e recuos no uso dessa tecnologia.

Hoje, existe um esforço em todo o mundo, principalmente em países emergentes, como Brasil, Índia e China, para a melhoria de projetos de gaseificadores por meio de pesquisa, inovação, desenvolvimento de unidades e da promoção dessa tecnologia (LORA et al., 1997).

No Brasil, a maioria dos estudos que abordam a gaseificação da biomassa se concentra em dois grupos de aplicação do gás: a produção de calor e a geração de energia elétrica.

Na produção de calor vários projetos vêm sendo desenvolvidos, principalmente na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG: Silva et al. (2000), Santos e Ivanildo (2003), Martin (2005), Santos e William (2010) e Zanata (2007 e 2011) testaram gaseificadores da biomassa de fluxo concorrente ou contracorrente, acoplados a um combustor do gás, com o objetivo de produzir ar quente para a secagem de grãos e para outros fins.

Esses projetos têm em comum o tipo de sistema de ventilação utilizado: por meio da exaustão do ar, produziram, simultaneamente, a gaseificação e a mistura do ar quente com o ar ambiente na geração de calor. Em alguns, a velocidade do motor elétrico do sistema de ventilação variou com o objetivo de aumentar ou diminuir a

vazão de ar, com o uso de inversores trabalhando nas frequências determinadas pelo operador.

Buscando aprimorar o processo de produção de calor, esta pesquisa desenvolveu um projeto de gaseificador/combustor com sistemas de ventilação e exaustão, para produzir a gaseificação e propiciar a mistura do ar quente com o ar atmosférico. Esses dois sistemas estão ligados a inversores cujas frequências são controladas por Sistemas Lógicos Fuzzy.

A escolha do Sistema Lógico Fuzzy se justifica pelo fato de ele se comportar como uma estratégia de controle que nasce da experiência de especialistas e de dados experimentais, sem a necessidade da tradicional modelagem matemática.

Buscando construir uma apresentação textual que facilitasse a leitura, o trabalho foi dividido em capítulos. Além do primeiro capítulo, que contém essa introdução, no segundo capítulo são apresentados os estudos dos dois aportes teóricos da pesquisa, a gaseificação da biomassa e a lógica fuzzy, com as respectivas revisões bibliográficas.

No terceiro capítulo estão descritos o projeto do gaseificador e do combustor, os instrumentos utilizados no controle das temperaturas e os Sistemas Lógicos Fuzzy desenvolvidos.

No quarto capítulo apresentam-se os testes com o gaseificador e com o conjunto gaseificador/combustor e os resultados obtidos, analisados sob bases estatísticas. No último capítulo estão as conclusões do trabalho.

1.1. Objetivo geral

Objetivou-se com este trabalho utilizar a lógica fuzzy para controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e a *temperatura do ar quente de exaustão* do conjunto gaseificador/combustor a fim de produzir ar quente e limpo, que pode ser utilizado na secagem de grãos e em outros fins.

1.2. Objetivos específicos

- Construir um gaseificador de fluxo concorrente para a queima de biomassa com dispositivo de entrada de ar na forma de um anel tubular, equipado com um sistema de ventilação, visando ao controle do ar primário no reator;

- Construir um combustor do gás produzido no gaseificador, com entradas de ar e um sistema de exaustão, capaz de produzir ar aquecido à temperatura desejada, útil na secagem de grãos, aquecimento de aviários e outros fins;
- Desenvolver Sistemas Lógicos Fuzzy para manter a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e a *temperatura do ar quente de exaustão* em valores estabelecidos;
- Avaliar as respostas dos Sistemas Lógicos Fuzzy a dois tipos de biomassas combustíveis: carvão vegetal e chips de eucalipto;
- Avaliar as respostas dos Sistemas Lógicos Fuzzy à desestabilização induzida do sistema, provocada pelo uso simultâneo de mais de um tipo de combustível;
- Determinar as concentrações de CO e CO₂ e a vazão do ar na exaustão do conjunto gaseificador/combustor.

2. APORTES TEÓRICOS

Dois aportes teóricos constituem o núcleo do trabalho: a gaseificação da biomassa e a lógica fuzzy.

No item que trata da gaseificação da biomassa são apresentadas as reações químicas do processo, sua termodinâmica, a quantidade de ar necessária ao seu funcionamento e as principais tecnologias existentes nessa área. Faz-se também uma revisão bibliográfica de trabalhos da área em estudo.

No item que aborda a lógica fuzzy, são apresentados os fundamentos teóricos dos conjuntos fuzzy, a lógica fuzzy, o Sistema Lógico Fuzzy (SLF), um exemplo de aplicação desse sistema e, a exemplo do item anterior, a revisão bibliográfica, cujo foco são trabalhos relacionados com temas agrícolas.

2.1. Gaseificação da biomassa

A gaseificação é um processo termoquímico que converte um insumo sólido ou líquido em um gás com características basicamente combustíveis, por meio de sua oxidação parcial a temperaturas intermediárias, isto é, temperaturas acima das recomendadas nos processos de pirólise rápida e abaixo das recomendadas nos de combustão (LORA et al., 2009).

Esse processo ocorre pela combustão do material carbônico da biomassa na presença de oxigênio, puro ou presente no ar atmosférico. Também pode ocorrer pela combinação do oxigênio com quantidades relativas de vapor de água superaquecido. Nesse caso, produz-se uma mistura gasosa especial, conhecida como gás de síntese ou *syngas*, que é rico em hidrogênio e monóxido de carbono.

Quando o combustor é o ar atmosférico, o gás produzido é de baixo poder calorífico, aproximadamente $5\text{MJ}/\text{Nm}^3$, devido à presença de nitrogênio, aproximadamente 50% do volume, na mistura gasosa de saída do reator (base seca). Quando a gaseificação é realizada na presença de oxigênio puro ou ar com vapor de água, o gás obtido tem maior poder calorífico, aproximadamente 10 a $15\text{MJ}/\text{Nm}^3$, e baixo teor de nitrogênio livre na mistura (LORA; GÓMEZ, 2009).

2.1.1. Reações químicas da gaseificação

As reações da gaseificação da biomassa ocorrem no interior de reatores, divididos, geralmente, em quatro regiões: secagem, pirólise, oxidação (combustão) e redução; o gás produzido se constitui de CO , H_2 , CH_4 , (que são combustíveis), CO_2 , e N_2 .

Na secagem a temperatura é inferior a $200^\circ C$, suficiente para a evaporação da água presente na matéria prima, mas não para que ocorra a sua decomposição.

Na região de pirólise, entre a de secagem e a de oxidação, inicia-se o processo de decomposição térmica da biomassa. As reações químicas são exotérmicas, sendo que a temperatura varia de $280^\circ C$ a $450^\circ C$, provocando a decomposição dos carboidratos e a produção de alcatrão e ácidos leves (MARTIN, 2005).

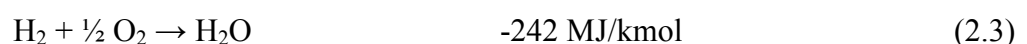
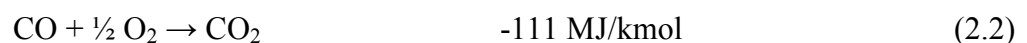
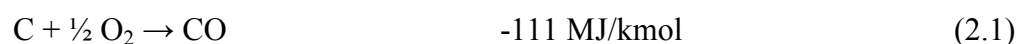
Na região de oxidação, a temperatura varia de $800^\circ C$ a $1.200^\circ C$, dependendo do tipo de combustível, resultado da reação exotérmica entre o carbono da matéria-prima e o O_2 . O gás quente da zona de oxidação passa, em seguida, à zona de redução, acima ou abaixo, dependendo do tipo de gaseificador. Nessa região, deficiente em O_2 , ocorre a formação dos componentes combustíveis do gás (MARTIN, 2005).

Nos constituintes da biomassa em geral estão presentes o carbono, o oxigênio, o hidrogênio, o nitrogênio e a água. Entretanto, é permitido concentrar a representação teórica das reações químicas simplesmente no carbono puro, pois ele está presente na biomassa e é similar para todo o range de matéria-prima (HIGMAN; VAN DER BURGT, 2008).

A seguir são apresentadas as principais reações químicas da gaseificação e as respectivas energias liberadas ou consumidas.

2.1.1.1. Combustão

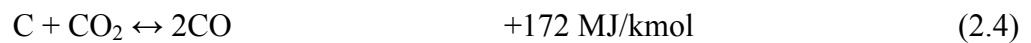
A combustão é uma reação química exotérmica, ou seja, libera calor para o ambiente e ocorre na presença de oxigênio. A liberação de calor é crucial para que as reações subsequentes sejam realizadas com êxito.



2.1.1.2. Reação de Boudouard

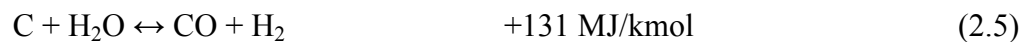
A reação de Boudouard é provavelmente a mais importante no processo de gaseificação de biomassa. É uma reação heterogênea de redução-oxidação (redox) de uma mistura de monóxido de carbono e dióxido de carbono a uma determinada temperatura. Nela ocorre a desproporcionalização do monóxido de carbono em dióxido de carbono e carbono e vice-versa.

A reação de Boudouard implica que, em baixas temperaturas, o equilíbrio seja deslocado para a reação exotérmica de formação de dióxido de carbono e que, em altas temperaturas, a formação endotérmica de monóxido de carbono seja o produto dominante.



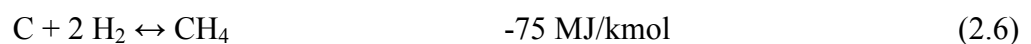
2.1.1.3. Reação de gás de água ou carbono-vapor

É uma reação química endotérmica e heterogênea na qual o carbono reage com o vapor de água para formar monóxido de carbono e hidrogênio.



2.1.1.4. Reação de formação de metano

É uma reação química exotérmica e heterogênea em que o carbono reage com o hidrogênio para a formação do metano.

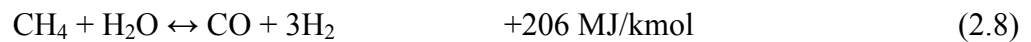


2.1.1.5. Reações homogêneas (fase gasosa)

Essa é uma reação exotérmica, em que o monóxido de carbono reage com o vapor de água para formar dióxido de carbono e hidrogênio.



O metano reage com o vapor de água para formação de monóxido de carbono e hidrogênio, sendo essa uma reação endotérmica



Essas reações apresentam os constituintes do gás obtido no processo de gaseificação: CO, CO₂, CH₄, N₂ e H₂.

Quando se utilizam combustíveis reais, outros constituintes podem aparecer, dependendo do combustor utilizado.

2.1.2. O ar na gaseificação

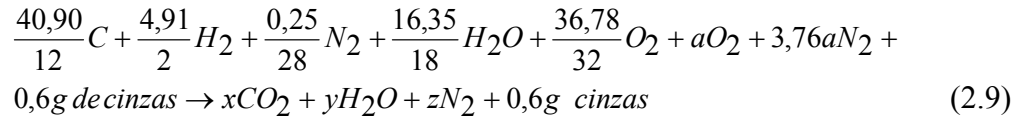
Conhecer a necessidade de ar na gaseificação é fundamental para o projeto e o controle de equipamentos de combustão. Qualquer combustível requer, de acordo com sua composição, quantidades específicas e calculáveis de oxigênio ou ar atmosférico para a sua combustão completa, chamado de ar estequiométrico.

A tecnologia da gaseificação não utiliza toda a massa de ar para a oxidação completa do combustível. São necessários valores entre 20% e 40% da quantidade do ar estequiométrico, para que ocorram, além de reações de oxidação (completa e parcial), principalmente reações de redução que promovam a formação de gás combustível (MARTIN, 2005).

Para exemplificar como se calcula, analiticamente, a quantidade de ar necessária para a gaseificação, considerou-se o processo de combustão em que o combustível foi a lenha de eucalipto, com a seguinte composição elementar (base úmida): C = 40,99%; H = 4,91%; O = 36,78%; N = 0,25%; H₂O = 16,35% e cinzas = 0,60% (material sólido incombustível) (CORTEZ et al., 2009).

O comburente foi o ar atmosférico, com a seguinte composição elementar para a base de cálculo: O₂ = 21% e N₂ = 79%.

A reação química que expressa a combustão de 100g dessa biomassa, na presença do ar estequiométrico (quantidade mínima requerida para a ocorrência da combustão completa), é a seguinte:



Fazendo o balanço da equação (2.9), determinam-se os coeficientes estequiométricos:

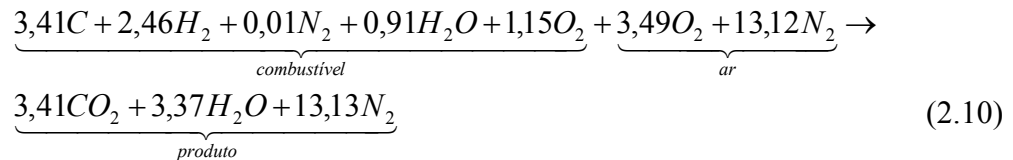
$$C : 3,41 = x$$

$$H : 2 \cdot 2,46 + 2 \cdot 0,91 = 2y \Rightarrow y = 3,37$$

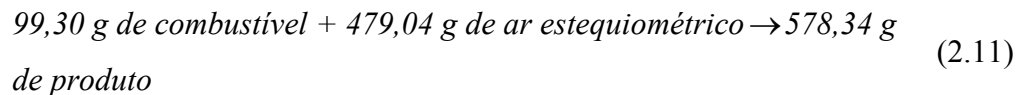
$$O : 0,91 + 2 \cdot 1,15 + 2a = 2 \cdot 3,41 + 3,37 \Rightarrow a = 3,49$$

$$N : 2 \cdot 0,01 + 2 \cdot 3,76 \cdot 3,49 = 2z \Rightarrow z = 13,13$$

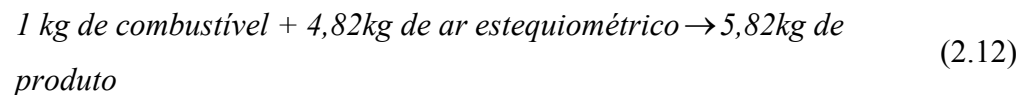
A reação equilibrada:



Aplicando a lei de conservação de massa na reação de combustão (2.10), tem-se:

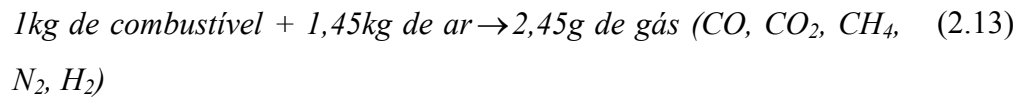


Transformando os dados da equação 2.11 em kg, tem-se:



As informações da equação 2.12 indicam que são necessários 4,82 kg de ar para a combustão completa de 1 kg de lenha de eucalipto.

Dado que no processo de gaseificação a quantidade de ar é menor que a do ar estequiométrico, admitindo-se a razão do ar estequiométrico igual a 0,30 e aplicando-a na equação 2.12, tem-se:



Conclui-se, da equação 2.13, que para gaseificar 1 kg de lenha de eucalipto são necessários 1,45 kg de ar atmosférico, o que produz 2,45 kg de gás.

2.1.3. Tecnologias da gaseificação

Foram idealizados e desenvolvidos diversos tipos de tecnologias de gaseificadores para atender às características da matéria-prima e às necessidades do gás.

Segundo Lora et al. (2009), os gaseificadores podem ser classificados de acordo com os seguintes fatores:

Poder calorífico do gás produzido:

- gás de baixo poder calorífico: até 5 MJ/Nm³
- gás de médio poder calorífico: de 5 a 10 MJ/Nm³
- gás de alto poder calorífico: de 10 a 40 MJ/Nm³

Tipo de agente gaseificador:

- ar
- vapor de água
- oxigênio
- hidrogênio (hidrogaseificação)

Direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação:

- contrafluxo (contracorrente)
- fluxo direto (concorrente)
- fluxo cruzado
- leito fluidizado

Pressão de trabalho:

- baixa pressão (atmosférica)
- pressurizados (até seis MPa)

Tipo e forma da biomassa:

- resíduos agrícolas
- resíduos industriais
- resíduos sólidos urbanos (lixo)

- biomassa em natura
- biomassa peletizada
- biomassa pulverizada

A grande maioria dos gaseificadores é enquadrada nas seguintes classificações: leitos fixos e leitos fluidizados; em ambos se devem observar a direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação.

2.1.3.1. Gaseificador de leito fixo

Os gaseificadores de leito fixo podem ser classificados como de fluxo ascendente (contracorrente) ou de descendente (concorrente).

No reator contracorrente (Figura 2.1), o combustível é introduzido na parte superior e flui para baixo acomodando-se sobre um grelha, abaixo da qual a cinza é removida. O agente da gaseificação, o ar ou o oxigênio ou oxigênio com vapor, é introduzido abaixo da grelha e flui ascendentemente por todo o reator.

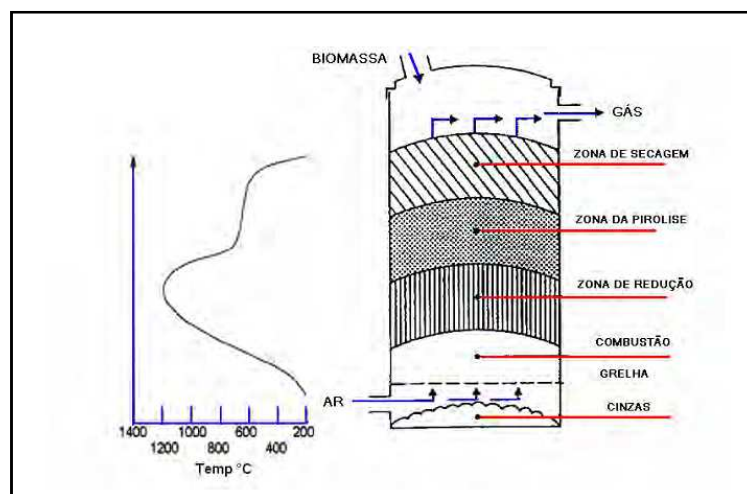


Figura 2.1 - Reator contracorrente.

Nesse tipo de reator a temperatura de saída do gás varia de 80°C a 100°C. Como o ar e o gás têm um fluxo ascendente e a zona de pirólise situa-se acima na zona de combustão, o alcatrão e os óleos não são carequeados, podendo condensar-se na tubulação de transporte.

Para minimizar o problema, esses reatores são geralmente acoplados a um forno ou caldeira, ou o gás produzido passa por um processo de filtragem, dependendo do tipo de aplicação.

No reator de fluxo descendente (Figura 2.2), o ar e o gás produzido fluem na mesma direção que o combustível sólido.

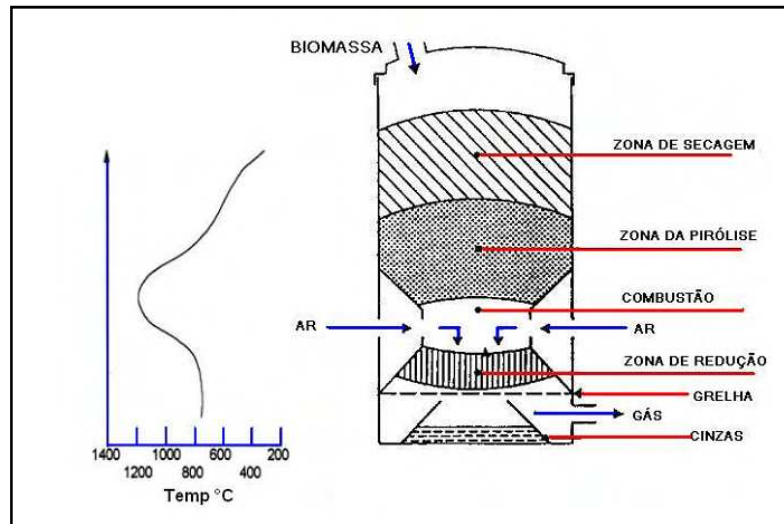


Figura 2.2 - Reator concorrente.

Os gaseificadores concorrentes, projetados para reduzir a quantidade de alcatrão e óleos no gás produzido, são os mais populares. Como o fluxo é descendente, esses produtos, originários da zona de pirólise, são craqueados na zona de oxidação (combustão). Nesse tipo de reator a temperatura do gás é de aproximadamente 700°C.

2.1.3.2. Gaseificador de fluxo cruzado

Nos gaseificadores de fluxo cruzado o gás é retirado da lateral da câmara de gaseificação, na mesma altura do leito em que é injetado o ar. O injetor é normalmente arranjado de forma a introduzir ar no centro na zona de combustão (Figura 2.3). Caracterizam-se por produzir um gás combustível com características intermediárias entre os gaseificadores contracorrente e concorrente.

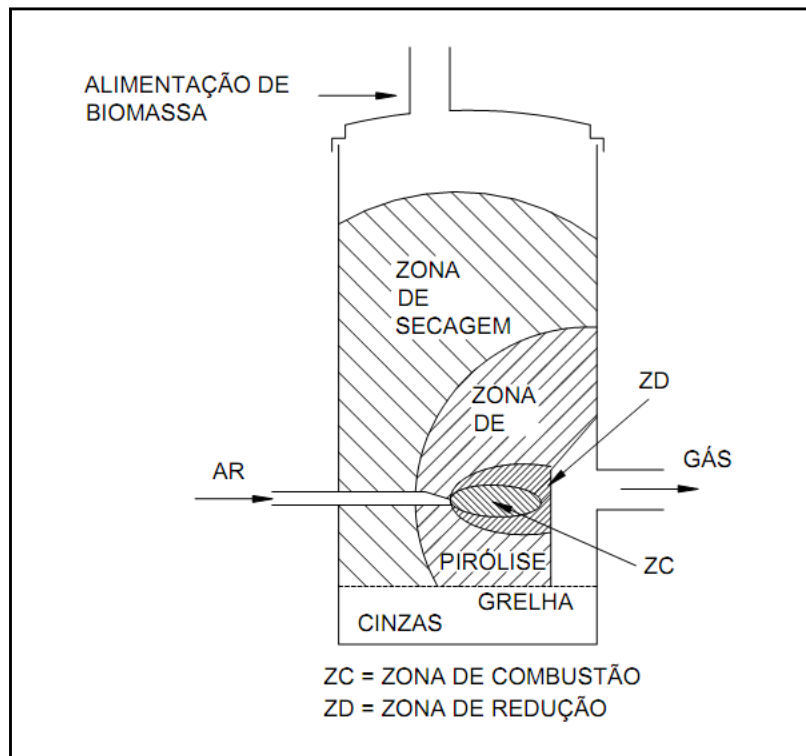


Figura 2.3 - Gaseificador de fluxo cruzado.

A taxa de fornecimento de ar é consideravelmente maior que a de outros tipos de gaseificadores, motivo pelo qual se cria uma zona de combustão de temperatura extremamente alta, com rápida liberação de gases. Ambas as zonas, a de combustão e a de redução, são concentradas em um pequeno volume no centro do gaseificador; isso significa que materiais refratários para delimitar a região são dispensáveis.

As principais vantagens desse tipo de gaseificador são a rápida resposta à variação de carga e sua simplicidade de construção. No entanto, são muito sensíveis à composição e à umidade do combustível.

2.1.3.3. Gaseificador de leito fluidizado

Nos gaseificadores de leito fluidizado (Figura 2.4), as partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina), fluidizadas pelo fluxo de ar, de modo a criar melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara de reação. Nessas

condições a maioria dos voláteis estará em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação possivelmente completa e limpa.

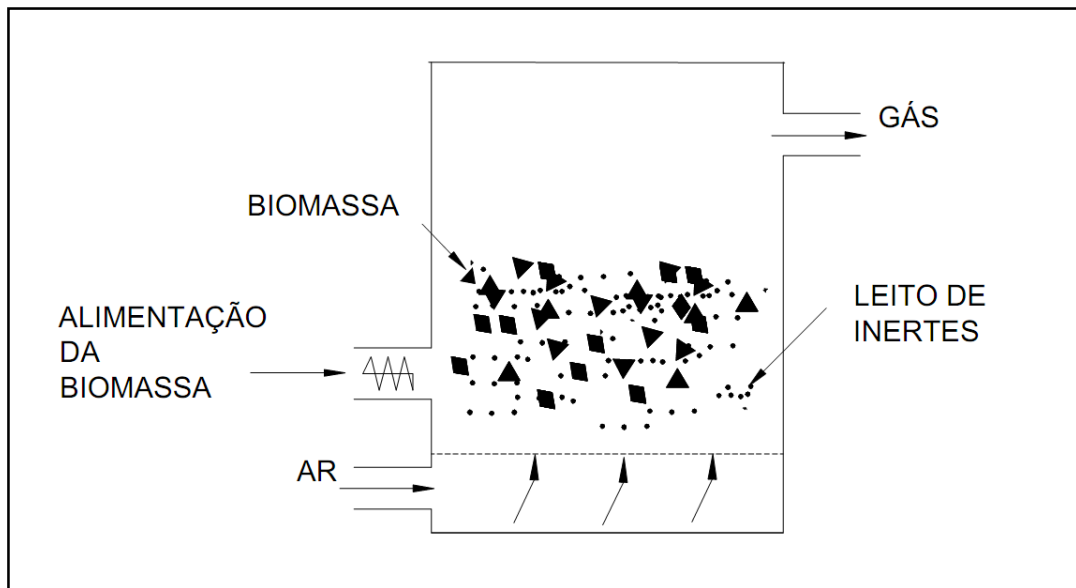


Figura 2.4 - Reator de leito fluidizado.

A principal vantagem dos gaseificadores de leito fluidizado é o fácil controle da temperatura pela variação na alimentação de ar e de combustível.

2.1.4. Termodinâmica da gaseificação

Com o objetivo de estudar as características termodinâmicas da gaseificação, foi considerado o exemplo em que se deseja gaseificar certa quantidade de biomassa de lenha de eucalipto, cortada em pedaços, com diâmetro médio de 6 cm e comprimento médio de 15 cm, a fim de obter o poder calorífico do gás produzido.

2.1.4.1. Poder calorífico

O poder calorífico é a energia liberada, por unidade de massa, durante a combustão da biomassa. Expressa-se em duas categorias: Poder Calorífico Superior (PCS), que considera a energia gasta na vaporização da água formada na reação de

oxidação, e Poder Calorífico Inferior (PCI), que só considera a energia liberada em forma de calor. O PCS é sempre maior que o PCI ou igual a ele.

O PCS é medido experimentalmente em calorímetros. Entretanto, pode-se estimar o seu valor, com boa aproximação, pela composição elementar do combustível, base seca, utilizando a equação apresentada por Cortez et al. (2009), conforme equação 2.14.

$$PCS^s = 2.381,1 + 351C^s \quad (2.14)$$

em que PCS^s é o poder calorífico superior, em $KJ.kg^{-1}$, em base seca; e C^s , a quantidade de carbono do combustível, em base seca.

Cortez et al. (2009) apresentaram a composição elementar (base seca) da lenha de eucalipto, com a seguinte distribuição:

$$C = 49\%; H = 5,87\%; O = 43,97\%; N = 0,30\%; S = 0,01\%; Cinzas = 0,72\%.$$

Para calcular o poder calorífico da lenha de eucalipto foi aplicado o percentual de carbono (C) na equação 2.14, obtendo-se:

$$PCS^s = 2.338,1 + 3511 \cdot 49$$

$$PCS^s = 19.580,00 KJ.Kg^{-1}$$

Para calcular PCI^t (Poder Calorífico Inferior do combustível em base total, considerando a umidade do combustível), utilizou-se fórmula de Mendeliev, equação 2.15 (CORTEZ et al., 2009).

$$PCI^t = 339C^t + 1030H^t - 109(O^t - S^t) - 24W^t \quad (2.15)$$

em que PCI^t é o poder calorífico inferior, em $MJ.Kg^{-1}$, base úmida; C^t , a quantidade de carbono na biomassa, em base úmida; H^t , a quantidade de hidrogênio na biomassa, em base úmida; O^t , a quantidade de oxigênio na biomassa, em base úmida; S^t , a quantidade de enxofre na biomassa, em base úmida; W^t , a umidade da biomassa.

Nos cálculos foi utilizada a umidade média da lenha do eucalipto ($W = 16,35\%$), obtida no trabalho de Martin (2005).

Convertendo-se a composição elementar da lenha de eucalipto para a base úmida e substituindo-a na equação 2.15, obteve-se:

$$PCI' = 339 \cdot 40,99 + 1030 \cdot 4,91 - 109(36,80 - 0,008) - 24 \cdot 16,35$$

$$PCI' = 9,99861MJ \cdot Kg^{-1} = 9.998,61KJ \cdot Kg^{-1}$$

Transformando para base seca:

$$PCI' = \frac{100 - W'}{100} \cdot PCI \Rightarrow PCI = \frac{100}{100 - W'} PCI'$$

$$PCI = \frac{100}{100 - 16,35} \cdot 9.998,61$$

$$PCI = 11.952,91KJ \cdot Kg^{-1}$$

2.1.4.2. Comburente

Foi utilizado como comburente o ar atmosférico com composição elementar apresentada na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Composição do ar atmosférico

Elemento	Volume (%)	Massa (%)
^a O ₂	21,0	23,2
N ₂	79,0	76,8

A simulação ocorreu nas seguintes condições: temperatura do ar ambiente de 10°C, umidade relativa de 70% e pressão de 1 atm (101,325 KPa). Esses parâmetros foram escolhidos por serem considerados críticos por Martin (2005).

Para calcular a entalpia do ar seco e a do ar úmido, nas condições estabelecidas, foram utilizadas as tabelas termodinâmicas e as fórmulas apresentadas por Van Wylen et al. (2009). Os resultados estão na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Entalpia do ar ambiente a 10°C e UR=70%

Propriedade	Valor calculado/tabelado
h_a (KJ.Kg ⁻¹ _{ar seco})	283,60
h_u (KJ.Kg ⁻¹ _{ar úmido})	297,00

2.1.4.3. Balanços de massa e de energia

Volume de controle é um volume no espaço de interesse do estudo de um processo. Pela lei de conservação de massa, relacionada a um volume de controle, para se fazerem os balanços de massa e de energia consideram-se os fluxos de massa que entram e saem e o aumento líquido de massa no interior do volume de controle.

Considerando que o processo opere em regime permanente (o estado da massa, em cada ponto do volume de controle, não varia ao longo do tempo), ou seja, com taxa de variação de massa nula (equação 2.16), tem-se a equação da continuidade (equação 2.17) (VAN WYLEN et al., 2009).

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = 0 \quad (2.16)$$

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (2.17)$$

em que $\frac{dm_{vc}}{dt}$ é a taxa de variação de massa, por unidade de tempo, dentro do volume de controle (kg s⁻¹); $\sum \dot{m}_e$, as vazões mássicas instantâneas que entram no volume de controle pela superfície de controle (kg s⁻¹); e $\sum \dot{m}_s$, as vazões mássicas instantâneas que saem do volume de controle pela superfície de controle (kg.s⁻¹).

A Figura 2.5 apresenta o esquema do combustor/gaseificador proposto e o seu volume de controle.

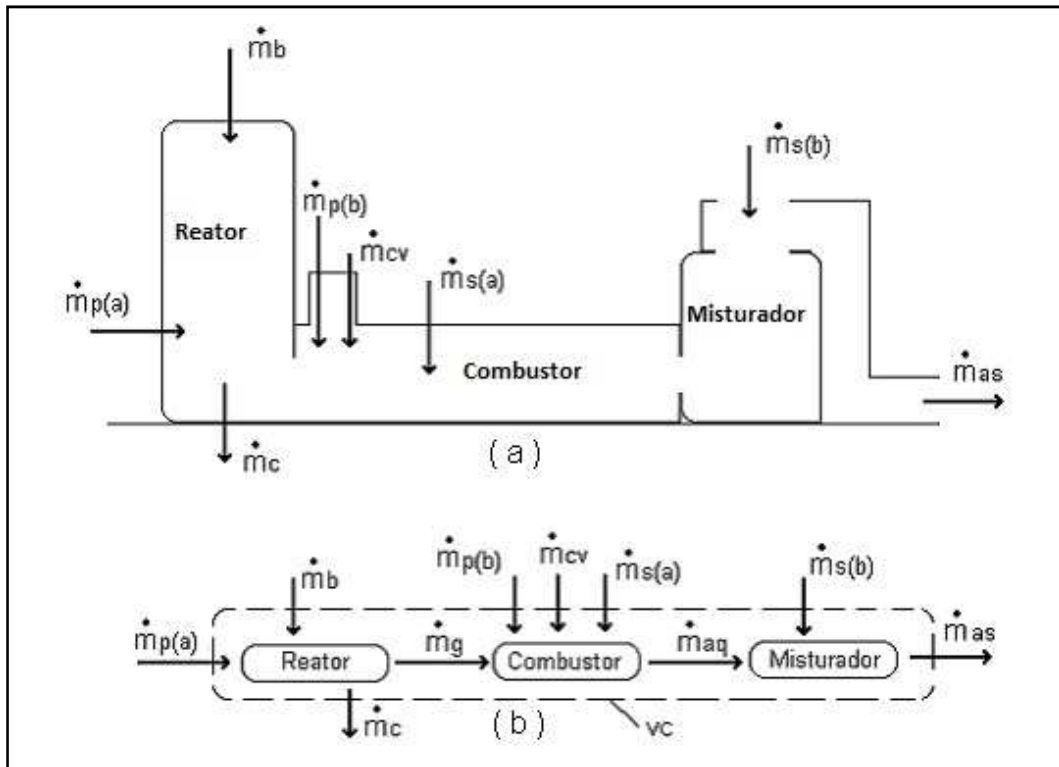


Figura 2.5 - Disposição do sistema: (a) ilustrado; e (b) simplificado, especificando o volume de controle (VC).

Com esse esquema, pode-se equacionar o balanço de massa (equação 2.18).

$$\dot{m}_{p(a)} + \dot{m}_b + \dot{m}_{p(b)} + \dot{m}_{cv} + \dot{m}_{s(a)} + \dot{m}_{s(b)} = \dot{m}_c + \dot{m}_{as} \quad (2.18)$$

em que $\dot{m}_{p(a)}$ é a vazão mássica de ar primário no reator (kg s^{-1}); \dot{m}_b , a vazão mássica de lenha (kg s^{-1}); $\dot{m}_{p(b)}$, a vazão mássica de ar primário no combustor (kg s^{-1}); \dot{m}_{cv} , a vazão mássica de carvão no queimador do gás (kg s^{-1}); $\dot{m}_{s(a)}$, a vazão mássica de ar secundário no combustor (kg s^{-1}); $\dot{m}_{s(b)}$, a vazão mássica de ar secundário no misturador (kg s^{-1}); \dot{m}_c , a vazão mássica das cinzas (kg s^{-1}); e \dot{m}_{as} , a vazão mássica do ar quente de saída (kg s^{-1}).

O balanço de energia, se desconsiderada a energia utilizada por dispositivos eletrônicos e eletromecânicos, é representado na equação 2.19.

$$\begin{aligned} & \dot{m}_{p(a)}h_u + \dot{m}_b PCI_u + \dot{m}_{p(b)}h_u + \dot{m}_{cv} PCI_{cv} + \dot{m}_{s(a)}h_u + \dot{m}_{s(b)}h_u + \dot{Q}_{vc} \\ & = \dot{m}_c PCI_c + \dot{m}_{as} h_{u\ as} \end{aligned} \quad (2.19)$$

em que h_u é a entalpia do ar ambiente úmido (kJ.kg^{-1} ar úmido); PCI_u , o poder calorífico inferior do combustível úmido (kJ.kg^{-1} combustível úmido); PCI_{cv} , o Poder calorífico inferior do carvão vegetal (kJ.kg^{-1} combustível seco); PCI_c , o poder calorífico inferior das cinzas (kJ.kg^{-1} combustível seco); e $h_{u\ ex}$, a entalpia do ar de exaustão úmido (kJ.kg^{-1} ar úmido).

2.1.4.4. Balanço de massa e de energia no reator

Para determinar o Poder Calorífico do gás produzido, será considerado o volume de controle do reator (Figura 2.6).

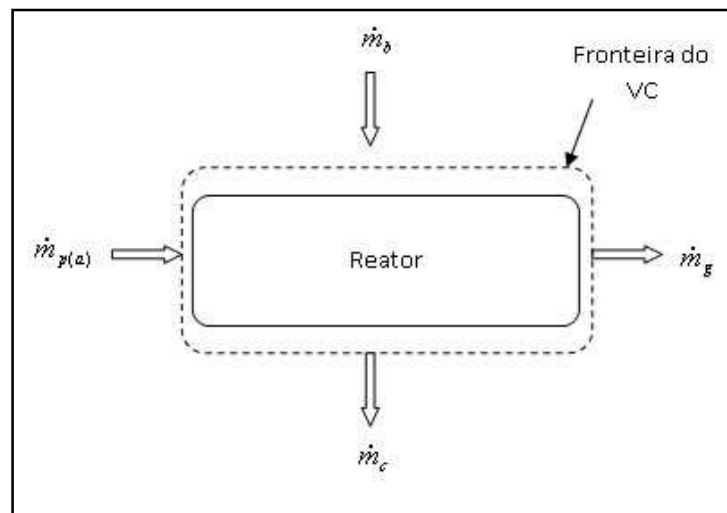


Figura 2.6 - Volume de controle do reator.

No reator foram definidos o balanço de massa (equação 2.20) e de energia (equação 2.21)

$$\dot{m}_{p(a)} + \dot{m}_b = \dot{m}_c + \dot{m}_g \quad (2.20)$$

$$\dot{m}_{p(a)} \cdot h_u + \dot{m}_b \cdot PCI_u + \dot{Q}_{VC} = \dot{m}_c \cdot PCI_c + \dot{m}_g \cdot PCI_g \quad (2.21)$$

em que \dot{m}_g é a vazão mássica do gás combustível produzido no reator, em $\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$; e PCL_g , o poder calorífico inferior do gás combustível produzido no reator, em $\text{KJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (combustível seco).

A potência e a eficiência do reator foram estimadas em 80KW e 70%, respectivamente. Esses dados são os mesmos utilizados no trabalho de Martin (2005). Com eles, calculou-se a potência gerada pelo reator utilizando a equação 2.22.

$$\eta_{\text{reator}} = \frac{\dot{Q}_{\text{saída}}}{\dot{Q}_{\text{entrada}}} \quad (2.22)$$

em que η_{reator} é a eficiência do reator, em decimal; $\dot{Q}_{\text{saída}}$, a energia total de saída do reator, em $\text{KJ}\cdot\text{h}^{-1}$; e \dot{Q}_{entrada} , a energia total de entrada no reator, em $\text{KJ}\cdot\text{h}^{-1}$.

Dado que a energia total de entrada corresponde à potência do reator, é possível calcular a energia total de saída do reator utilizando a equação 2.22.

$$80W = 80KJ\cdot s^{-1} = 80.3600KJ \cdot h^{-1} = 288.000KJ \cdot h^{-1}$$

$$0,7 = \frac{\dot{Q}_{\text{saída}}}{288.000} \Rightarrow \dot{Q}_{\text{saída}} = 201.600,00KJ \cdot h^{-1} = 201,60MJ \cdot h^{-1}$$

Com os dados obtidos e o balanço de energia e de massa no reator, estima-se a massa real do combustível e do ar a ser consumido no processo.

Segundo Martin (2005), citando Sanchez et al. (1997), o fator de ar que expressa a fração estequiométrica para que ocorra o processo de gaseificação varia de 20% a 40%, sendo 30% o padrão empregado no dimensionamento de gaseificadores.

Para o fator ar 30%, a literatura especializada afirma que a razão entre a massa de ar úmido e a massa de combustível úmido é 1,35, fração que pode ser expressa pela equação 2.23.

$$\frac{\dot{m}_{p(a)}}{\dot{m}_b} = 1,35 \quad (2.23)$$

Substituindo o valor de $\dot{m}_{p(a)}$ da equação 2.21 pelo valor encontrado na equação 2.23, e considerando desprezíveis a transferência de calor através da superfície de controle e o poder calorífico das cinzas, estimam-se as massas do combustível e do ar consumido.

$$1,35\dot{m}_b \cdot h_u + \dot{m}_b PCI_u = \dot{m}_g PCI_g$$

$$1,35 \cdot 297 \cdot \dot{m}_b + \dot{m}_b \cdot 9.998,61 = 201.600$$

$$\dot{m}_b = 19,39 Kg_{comb \text{ úmido}} \cdot h^{-1}$$

$$\dot{m}_{p(a)} = 1,5\dot{m}_b \Rightarrow \dot{m}_{p(a)} = 26,17 Kg_{ar \text{ úmido}} \cdot h^{-1}$$

Substituindo esses valores na equação 2.20 e considerando que a massa de cinza corresponde a 1,5% da massa de combustível, percentual estabelecido pela literatura especializada, estima-se a massa do gás produzido.

$$26,17 + 19,39 = 0,29 + \dot{m}_g \Rightarrow \dot{m}_g = 45,27 Kg_{gás \text{ úmido}} \cdot h^{-1}$$

Para estimar o volume do gás produzido utilizou-se a massa específica média do gás combustível, que é de $1,30 Kg \cdot m^{-3}$.

$$\rho_g = \frac{\dot{m}_g}{\dot{V}_g} \Rightarrow \dot{V}_g = \frac{45,27 Kg \cdot h^{-1}}{1,30 Kg \cdot m^{-3}} \Rightarrow \dot{V}_g = 34,83 m^3 \cdot h^{-1}$$

O poder calorífico do gás produzido, nas condições estabelecidas, foi estimado com base na energia total de saída do reator.

$$\dot{m}_g \cdot PCI_g = \dot{Q}_{saída}$$

$$45,27 PCI_g = 201.600,00$$

$$PCI_g = 4.453,28 KJ \cdot Kg^{-1}_{gás \text{ úmido}} = 4,45 MJ \cdot Kg^{-1}_{gás \text{ úmido}}$$

Esse valor está próximo dos encontrados na literatura para o tipo de gaseificador utilizado.

2.1.5. Revisão bibliográfica sobre gaseificação

As pesquisas sobre o tema “gaseificação da biomassa” se dividem, basicamente, em dois grupos de aplicação do gás: produção de calor e geração de energia elétrica.

Silva et al. (2000), Martin et al. (2006) e Vieira (2005) testaram gaseificadores de biomassa de fluxo concorrente, acoplados a um combustor do gás, com o objetivo de produzir ar para o aquecimento de produtos agrícolas e para outros fins.

Zanatta (2007) desenvolveu um sistema gaseificador/combustor para o aquecimento do ar em aviários na região de Barbacena, MG. O autor testou o gaseificador durante 25 dias, funcionando 24 horas por dia, e observou uma economia de 26% de lenha em relação à fornalha de fogo indireto, com as concentrações de CO e CO₂ dentro dos limites de segurança.

Santos et al. (2010) elaboraram um sistema composto por um reator de gaseificação do tipo contracorrente e por uma câmara de combustão do gás produzido, ambos envolvidos em uma estrutura de alvenaria, cujo principal objetivo foi aproveitar o calor dissipado no reator e na câmara de combustão. Os autores concluíram que o dispositivo atendeu aos propósitos esperados, por disponibilizar ar quente limpo, com boa eficiência térmica, próprio para uso em secagem de produtos agrícolas, ou para outros fins, como o aquecimento de ambientes para criação de animais.

Zanata (2011) desenvolveu e testou um gaseificador automatizado de biomassa, de fluxo contracorrente, acoplado a uma câmara de combustão dos gases produzidos, visando à geração de ar quente e limpo para o aquecimento de aviários e secagem de produtos agrícolas. O autor concluiu que o sistema desenvolvido atendeu aos objetivos pretendidos e que a concentração média de CO no ar quente de exaustão permite sua utilização em aplicações diretas, desde que sejam respeitados os limites máximos de concentração desse elemento na atividade a ser implementada.

Wander (2001) estudou a geração de energia elétrica com o uso do gás produzido em um motor de combustão interna que faz uso de resíduos de madeira e lenha. Na mesma linha de pesquisa, Arantes et al. (2008) desenvolveram um sistema gaseificador-reator para geração de energia elétrica. Usando um reator do tipo contracorrente, os autores avaliaram vários tipos de biomassa para geração de energia elétrica e concluíram que o carvão do eucalipto *Corimbia citriodora* apresenta o melhor rendimento.

Lora e Andrade (2009) fizeram um estudo dos programas, projetos e tecnologias relacionados ao uso do biocombustível no Brasil. Os autores avaliaram a disponibilidade da biomassa e o seu potencial de geração de energia para diferentes setores industriais e agrícolas no país. O trabalho descreveu um projeto de gaseificação construído em parceria entre CENBIO (Centro Nacional de Referência da Biomassa), BUN (Rede de Usuários da Biomassa no Brasil), IPT (Instituto Tecnológico de Pesquisa do Estado de SP) e UFA (Universidade Federal do Amazonas). Eles avaliaram a tecnologia indiana de gaseificação em pequena escala, utilizando gaseificadores de leito fixo para oferecer, de forma sustentável, eletricidade a comunidades isoladas na região amazônica.

Kirubakaran et al. (2007) fizeram um estudo de revisão da gaseificação da biomassa com base na análise dos efeitos das propriedades físicas e químicas da biomassa na gaseificação. Os autores indicam a necessidade de estudos mais detalhados sobre a taxa de aquecimento, que seria a chave para a qualidade e a quantidade do gás produzido.

Em revisão sobre o desenvolvimento e comercialização de tecnologias de gaseificação da biomassa na China, Leung, Yin e Wu (2004) avaliaram que a gaseificação da biomassa é uma tecnologia eficiente e avançada para extração de energia, motivo pelo qual esse processo tem recebido atenção crescente no mercado de energia. Dentre as suas utilizações, foram citados: equipamentos de secagem e caldeiras (em substituição ao carvão e ao óleo), aplicação em cozinhas domésticas e na geração de energia elétrica. Dermibas e Dermibas (2007) pontuaram a importância da bioenergia para países em desenvolvimento. Segundo os autores, a bioenergia é ainda uma forma predominante de energia usada nos países menos desenvolvidos. Conforme afirmam, os biocombustíveis trazem benefícios que incluem a sustentabilidade, a redução na emissão de gases estufa, promovem o desenvolvimento regional e segurança financeira para o produtor.

Diversos tipos de biomassa podem ser utilizados no processo de gaseificação: a lenha, o carvão vegetal, os resíduos florestais, os resíduos agrícolas, o bagaço de cana, a casca de arroz (CENTRAIS ELÉTRICAS DE MINAS GERAIS – CEMIG, 1986). A umidade das biomassas é uma variável importante na gaseificação. Segundo Mendes et al. (1998), em gaseificadores de fluxo concorrente só é possível produzir gás de materiais com até 30% de umidade, pois o excesso de água prejudica a qualidade do gás, ao tornar a zona de combustão instável.

Sharma (2009) realizou, com um sistema de gaseificação concorrente de 75kw, estudos experimentais em que foram analisados diversos parâmetros que interferem no processo de gaseificação, tais como: o perfil de temperatura, a composição do gás, o valor calorífico e as tendências da queda de pressão através do leito poroso do gaseificador.

As análises de todos os trabalhos mencionados permitem concluir que a gaseificação da biomassa apresenta-se como boa alternativa econômica e ambiental na produção de energia para ser utilizada em diversos setores industriais e agrícolas.

2.2. Lógica *fuzzy*

A lógica é uma ciência de origem remota. É possível que na velha Índia, bem antes dos gregos, já existisse um sistema de provas e discussões. Porém, como conhecimento sistemático ela se desenvolveu na Grécia, com Aristóteles (384 a.C.-322 a.C.), que é considerado o seu criador. Aristóteles agregou ao pensamento lógico uma estrutura e sistematização cujos princípios são válidos até hoje.

No século XIX, o matemático inglês George Boole, entre outros, estudou e empregou as ideias algébricas no domínio da lógica, advindo daí a terminologia da álgebra booleana, que se relaciona com as regras do pensamento por meio de proposições que assumem valores: verdadeiro (símbolo matemático 1) ou falso (símbolo matemático 0) (WEBER; KLEIN, 2003).

Em meados da década de 60, o professor L.A. Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, considerava limitada a teoria usual, baseada na lógica binária, para enfrentar fenômenos quotidianos. Os sistemas especialistas que lhe interessava implementar eram *softwares* interativos, capazes de tomar algumas decisões próprias, sustentadas na teoria usual de conjuntos, que admitia apenas decisões binárias, não sendo possível utilizá-los satisfatoriamente para abranger todas as decisões da mente humana (BILOBROVEC, 2005).

Zadeh (1965) publicou um artigo que se tornou revolucionário no assunto, ao propor o emprego de funções de pertinências operando em intervalos reais $[0,1]$, uma extensão da lógica clássica, que considerava apenas os valores: 0 e 1.

2.2.1. Conjuntos *fuzzy*

Na teoria clássica de conjuntos, o conceito de pertinência de um elemento a um conjunto é definido por uma função de pertinência f_A , mapeada em um conjunto A de um universo X :

$$f_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se e somente se } x \in A \\ 0 & \text{se e somente se } x \notin A \end{cases}$$

Na extensão para a teoria de conjuntos Fuzzy, a função de pertinência passa a ter uma abrangência maior, assumindo valores no intervalo $[0,1]$.

Um conjunto fuzzy A do universo X é definido por uma função de pertinência $\mu_A(x): X \rightarrow [0,1]$ e representado por um par ordenado $A = \{(x, \mu_A(x)) | x \in X\}$, em que $\mu_A(x)$ indica o quanto x é compatível com A .

Com base nessa definição, pode-se afirmar que um elemento x_1 pertence ao conjunto A se $\mu_A(x_1) = 1$; não pertence ao conjunto A se $\mu_A(x_1) = 0$; ou pode pertencer ao conjunto A com um determinado grau de pertinência, com valores $\mu_A(x_1) \in (0,1)$.

As variáveis linguísticas são elementos simbólicos usados pela Lógica Fuzzy para descrever os conhecimentos empregados em substituição às variáveis numéricas. Trata-se de um conjunto de termos linguísticos (conjuntos fuzzy) atribuídos a uma mesma grandeza a ser mensurada (WEBER; KLEIN, 2003). Cada termo da variável é descrito por intermédio de uma função de pertinência (discreta ou contínua) $\mu(x)$, normalizada de forma que o seu conjunto imagem seja projetado no intervalo $[0,1]$.

Para exemplificar, considere-se a variável linguística *temperatura*, constituída dos seguintes termos: $T(\text{temperatura}) = \{\text{baixa, média e alta}\}$. Cada termo corresponde a um determinado conjunto Fuzzy, num universo do discurso X , variando de 0 a 100°C. Uma escolha possível para as funções de pertinência dos conjuntos fuzzy da variável temperatura é representada graficamente na Figura 2.7.

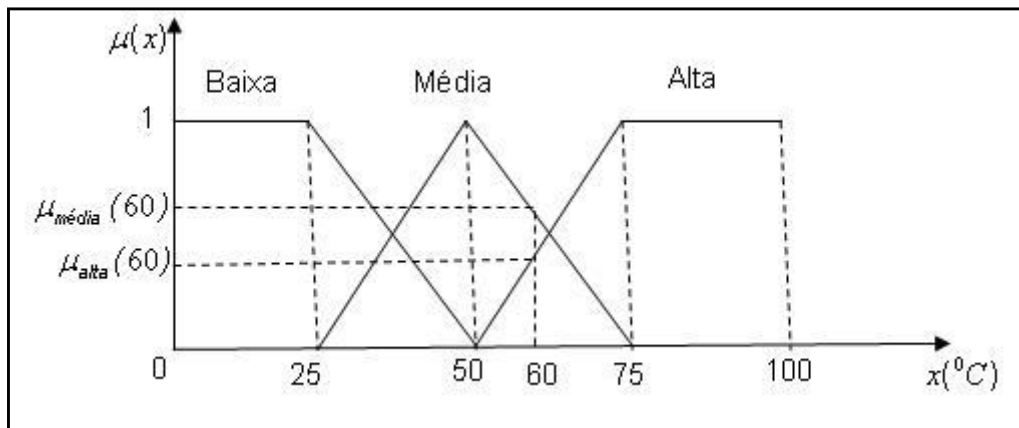


Figura 2.7 - Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy da variável temperatura.

Na Figura 2.7, cada conjunto fuzzy está associado a uma função (função de pertinência) que indica o grau de pertinência de determinada temperatura a esse conjunto. Os conjuntos fuzzy Média e Alta têm as seguintes funções de pertinência:

$$\mu_{Média} = \begin{cases} \frac{x}{25} - 1 & \text{se } 25 \leq x \leq 50 \\ 3 - \frac{x}{25} & \text{se } 50 < x \leq 75 \end{cases}$$

e

$$\mu_{Alta} = \begin{cases} \frac{x}{25} - 2 & \text{se } 50 \leq x \leq 75 \\ 1 & \text{se } 75 < x \leq 100 \end{cases}$$

Nessas funções de pertinência, uma temperatura $x = 60^{\circ}C$ pertence a dois conjuntos Fuzzy, Média e Alta, com dois diferentes graus de pertinência: $\mu_{alta}(60) = 0,4$ e $\mu_{média}(60) = 0,6$.

As funções de pertinência dos conjuntos fuzzy podem ser definidas pela experiência do usuário, mas o comum são funções padrão, de forma triangular, trapezoidal e gaussiana.

A seguir são apresentadas as principais propriedades operacionais dos conjuntos fuzzy.

Considere os conjuntos fuzzy A , B e C , do universo U , com as respectivas funções de pertinência $\mu_A(x)$, $\mu_B(x)$ e $\mu_C(x)$. São válidas:

2.2.1.1. As proposições

- 1) Se $A = B$, então $\mu_A(x) = \mu_B(x)$.
- 2) Se $A = \phi$, então $\mu_A(x) = 0$.
- 3) Se $A \subset B$, então $\mu_A(x) \leq \mu_B(x)$.
- 4) $\mu_{(A \cup B)}(x) = \frac{1}{2}[\mu_A(x) + \mu_B(x) + |\mu_A(x) - \mu_B(x)|]$.
- 5) $\mu_{(A \cap B)} = \frac{1}{2}[\mu_A(x) + \mu_B(x) - |\mu_A(x) - \mu_B(x)|]$.
- 6) Se A' é o complementar de A , então $\mu_{A'}(x) = 1 - \mu_A(x)$, $x \in U$.

2.2.1.1. As propriedades

1. $A \cup B = B \cup A$
2. $A \cap B = B \cap A$
3. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap C$
4. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup C$
5. $A \cup A = A$
6. $A \cap A = A$
7. $A \cup (B \cap C) = (A \cup B) \cap (A \cup C)$
8. $A \cap (B \cup C) = (A \cap B) \cup (A \cap C)$
9. $A \cap \phi = \phi$ e $A \cup \phi = A$
10. $A \cap U = A$ e $A \cup U = U$
11. $\overline{(A \cup B)} = \bar{A} \cap \bar{B}$ e $\overline{(A \cap B)} = \bar{A} \cup \bar{B}$ (leis de DeMorgan)

Dado que os conjuntos são fuzzy, para demonstrar essas propriedades faz-se uma associação dos conjuntos com as respectivas funções de pertinência e suas definições.

Como exemplo, seja considerada uma das leis de DeMorgan $(A \cap B)' = A' \cup B'$, associada às respectivas funções de pertinência dos conjuntos fuzzy.

$$\begin{aligned}
\mu_{\overline{A \cup B}}(x) &= \frac{1}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(x) + |\mu_A(x) - \mu_B(x)|] \\
&= \frac{1}{2} [(1 - \mu_A(x)) + (1 - \mu_B(x)) + |1 - \mu_A(x) - 1 + \mu_B(x)|] \\
&= \frac{1}{2} [2 - (\mu_A(x) + \mu_B(x)) - |\mu_A(x) - \mu_B(x)|] \\
&= 1 - \frac{1}{2} [\mu_A(x) + \mu_B(x) - |\mu_A(x) - \mu_B(x)|] \\
&= 1 - \mu_{A \cap B}(x) \\
&= \mu_{\overline{(A \cap B)}}(x)
\end{aligned}$$

Conclui-se que: $\overline{(A \cap B)} = \overline{A} \cup \overline{B}$

Todas as outras propriedades podem ser demonstradas de forma semelhante.

2.2.2. Relação *fuzzy* binária

Dados U e V , dois universos do discurso. Uma relação *fuzzy* binária, $R(U, V)$, é um subconjunto do produto cartesiano $U \times V$, caracterizada pela função de pertinência $\mu_R(x, y)$, com $x \in U$ e $y \in V$, em que a forma geral é dada na equação 2.24.

$$R(U, V) = \{(x, y), \mu_R(x, y) \mid (x, y) \in U \times V\} \quad (2.24)$$

A função de pertinência da relação é definida por:

$$\mu_{R(U, V)}(x, y) = \mu_U(x) \wedge \mu_V(y) \quad (2.25)$$

Nessa equação, os valores $\mu_{R(U, V)}(x, y) \in [0, 1]$ representam o grau de associação entre os elementos dos dois conjuntos *fuzzy*.

2.2.2.1. Composição de duas relações *fuzzy*

Considerem-se duas relações *fuzzy* binárias, $P(U, V)$ e $Q(V, W)$. A composição $P \circ Q$ é uma relação $R(U, W)$ de $U \times W$, tal que $(x, w) \in R$, se, e somente se, existir, no mínimo, um $y \in V$, sendo que $(x, y) \in P$ e $(y, w) \in Q$.

O modelo matemático da função de pertinência da composição $P \circ Q$, definida por Mendel (1995), é apresentado na equação 2.26.

$$\mu_{P \circ Q}(x, z) = \sup_{y \in V} [\mu_P(x, y) * \mu_Q(y, z)] \quad (2.26)$$

O operador $*$ pode ser substituído por \wedge (mínimo) e o **sup**, por \vee (máximo), constituindo a composição Max-Min, equação 2.27.

$$\mu_{P \circ Q}(x, z) = \{(x, z), \max_{y \in V} [\min(\mu_P(x, y), \mu_Q(y, z))]\} \quad (2.27)$$

2.2.3. Inferências *fuzzy*

Uma das regras mais importantes da lógica, no contexto deste trabalho, é a da inferência: *se x é A, então y é B*, representada simbolicamente por $A \rightarrow B$.

A função de pertinência $\mu_{A \rightarrow B}(x, y)$, que mede o grau de verdade da implicação entre x e y, é calculada pelas equações 2.28 e 2.29, que estão demonstradas por Mendel (1995)

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = 1 - \min[\mu_A(x), 1 - \mu_B(y)] \quad (2.28)$$

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)] \quad (2.29)$$

Outra regra importante é a *modus ponens*, associada à inferência $A \rightarrow B$, que, estendida para a lógica fuzzy, recebe a denominação de *modus ponens* generalizada, com a forma geral:

Premissa 1: $x \text{ é } A^*$.

Premissa 2: $x \text{ é } A \text{ então } y \text{ é } B$.

Consequência: $y \text{ é } B^*$.

Simbolicamente representada por $(A^* \wedge (A \rightarrow B)) \rightarrow B^*$, em que os conjuntos fuzzy A^* e B^* não são necessariamente os mesmos que A e B , mas conservam uma similaridade entre si.

Na lógica clássica, uma regra será acionada somente se a premissa 1 for exatamente o antecedente da regra; o resultado será exatamente o consequente da regra.

Na lógica fuzzy, uma regra será acionada se houver um grau de similaridade diferente de zero entre a premissa 1 e o antecedente da regra; o resultado será um consequente com grau de similaridade não nulo em relação ao consequente da regra. (MENDEL, 1995).

A regra de inferência *modus ponens* generalizado pode ser modelada por uma composição fuzzy $B^* = A^* \circ R$, em que a premissa (A^*) é um conjunto fuzzy e a premissa ($A \rightarrow B$) é uma relação R .

Substituindo a composição fuzzy na Equação 2.26, a função de pertinência para a regra *modus ponens* generalizada será:

$$\mu_{B^*}(y) = \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) * \mu_R(x, y)] \quad (2.30)$$

Dado que R é uma relação de implicação, pode-se escrever a função de pertinência conforme a Equação 2.31.

$$\mu_{B^*}(y) = \sup_{x \in A^*} [\mu_{A^*}(x) * \mu_{A \rightarrow B}(x, y)] \quad (2.31)$$

2.3. Sistema lógico fuzzy

O Sistema Lógico Fuzzy (SLF) (Figura 2.8), uma técnica utilizada para resolver problemas em diversas áreas do conhecimento, apropria-se dos conceitos da lógica fuzzy para modelar processos mediante os conhecimentos subjetivos de especialistas, o que conduz a uma abordagem diferente da dos métodos convencionais de controle de processos desenvolvidos pela modelagem matemática.

Muitos sistemas são complexos de se modelar com precisão, até mesmo com equações matemáticas sofisticadas, mas os termos linguísticos da Lógica Fuzzy oferecem uma metodologia útil para definir características operacionais de desses sistemas (WEBER; KLEIN, 2003).

O SLF está estruturado em quatro componentes básicos: *fuzzificador*, *regras*, *máquina de inferência* e *defuzzificador*, como mostra o esquema na Figura 2.8.

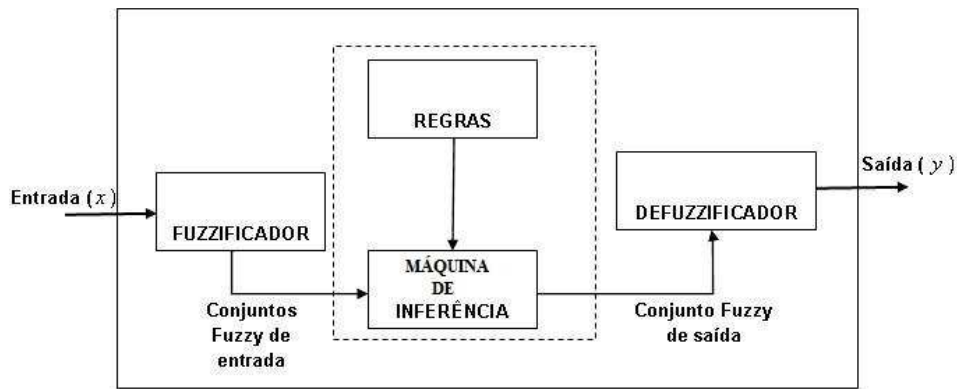


Figura 2.8 - Esquema do sistema lógico *fuzzy*.

O Sistema Lógico Fuzzy pode ser interpretado como um mapeamento de entrada e saída representado pelo modelo matemático $y = f(x)$, em que o valor de y é obtido pela transformação de x , que é operado pela função $f(x)$, ao percorrer as linhas cheias, como mostra a Figura 2.8.

Na Figura 2.8, x representa as variáveis linguísticas de entrada, $f(x)$ é uma função constituída das operações executadas nos componentes básicos – *fuzzificador*, *regras*, *máquina de inferência* e *defuzzificador* – e y são as variáveis numéricas de saída, que executam as ações demandadas pelo sistema.

Importante se faz explicar, resumidamente, cada um dos componentes do SLF:

- **Fuzzificador**: no fuzzificador as variáveis linguísticas de entrada são associadas aos conjuntos fuzzy pertinentes com os respectivos domínios.
- **Regras**: as regras são consideradas o “núcleo” do SLF. Fornecidas por especialistas ou extraídas de dados numéricos, são expressas como uma coleção de sentenças lógicas do tipo *Se... Então...* Por exemplo, *se a temperatura é alta, então aumente a velocidade do ventilador*.
- **Máquina de inferência**: a máquina de inferência é o componente em que ocorrem as operações com os conjuntos fuzzy, as relações e composições fuzzy. Há combinação dos antecedentes com os consequentes das regras para gerar o conjunto fuzzy de saída.
- **Defuzzificador**: o defuzzificador interpreta as informações geradas no conjunto fuzzy de saída, dando origem às ações demandadas pelo sistema, e permite representar um conjunto fuzzy por um valor numérico.

2.3.1. O método de inferência Mamdani

O método Mamdani é baseado nos operadores Max-Min dos conjuntos fuzzy e aporta-se nos seguintes procedimentos:

- Em cada regra R_j , da base de regras fuzzy, a condicional "se x é A_j então u é B_j " é modelada pela operação \wedge (mínimo) para o conectivo e.
- Para conectar as regras fuzzy R_j a R_{j+1} , da base de regras, usa-se \vee (máximo) para o conectivo **ou**.

A fórmula matemática da função de pertinência da relação fuzzy Mamdani para modelar a regra R_j : "se x é A_j então u é B_j " é apresentada na equação 2.32.

$$\mu_M(x, u) = \max_{1 \leq i \leq r} (\mu_{R_i}(x, u)) = \max_{1 \leq i \leq r} [\mu_{A_i}(x) \wedge \mu_{B_i}(u)] \quad (2.32)$$

em que r é o número de regras que compõe a base de regras; A_j , B_j , os conjuntos fuzzy da regra j ; μ_{A_j} , μ_{B_j} , os graus de pertinência com que x e u estão nos conjuntos fuzzy e A_j e B_j , respectivamente.

Para exemplificar, considere-se um controlador fuzzy com duas entradas e uma saída, cuja base de regras é apresentada a seguir:

$$\begin{aligned} R_1 &: \text{se } x_1 \text{ é } A_{11} \text{ e } x_2 \text{ é } A_{12} \text{ então } u \text{ é } B_1 \\ R_2 &: \text{se } x_1 \text{ é } A_{21} \text{ e } x_2 \text{ é } A_{22} \text{ então } u \text{ é } B_2 \end{aligned}$$

Cada terna (x_1, x_2, u) , aplicada à equação 1, resultará:

$$\begin{aligned} \mu_M(x_1, x_2, u) &= \max_{1 \leq i \leq 2} \{\mu_{R_i}(x_1, x_2, u)\} = \max\{\mu_{R_1}(x_1, x_2, u), \mu_{R_2}(x_1, x_2, u)\} \\ &= \max\{\mu_{A_{11}}(x_1) \wedge \mu_{A_{12}}(x_2) \wedge \mu_{B_1}(u), \mu_{A_{21}}(x_1) \wedge \mu_{A_{22}}(x_2) \wedge \mu_{B_2}(u)\}. \end{aligned}$$

Essa função representa a relação fuzzy Mamdani obtida da base de regras.

O conjunto fuzzy de entrada $A = A_1 \times A_2$ e uma relação Mamdani M , em que A e M são analogias do conjunto A^* e da relação R , da regra *modus ponens* generalizada, (Equação 2.30). O conjunto fuzzy de saída, que representa o controle adotado para A , é modelado pela composição $B = M \circ A$.

As funções de pertinência desses conjuntos fuzzy são:

$$\mu_B(u) = \sup_x \{ \mu_M(x, y) \wedge \mu_A(x) \} \quad (2.32)$$

$$\mu_A(x_1, x_2) = \mu_{A_{x_1 A_2}}(x_1, x_2) = \mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2) \quad (2.33)$$

Substituindo-se a Equação 2.33 em 2.32, tem-se:

$$\begin{aligned} \mu_B(u) &= \sup_x \{ \mu_M(x, y) \wedge \mu_A(x) \} \\ &= \max_{(x_1, x_2)} \{ \mu_M(x_1, x_2, u) \wedge \mu_A(x_1, x_2) \} \\ &= \max_{(x_1, x_2)} \{ \mu_M(x_1, x_2, u) \wedge [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2)] \} \\ &= \max_{(x_1, x_2)} \{ [(\mu_{A_{11}}(x_1) \wedge \mu_{A_{12}}(x_2) \wedge \mu_{B_1}(u)) \vee \\ &\quad (\mu_{A_{21}}(x_1) \wedge \mu_{A_{22}}(x_2) \wedge \mu_{B_2}(u))] \wedge [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_2}(x_2)] \} \\ &= \max_{(x_1, x_2)} \{ [\mu_{A_{11}}(x_1) \wedge \mu_{A_1}(x_1)] \wedge [\mu_{A_{12}}(x_2) \wedge \mu_{A_2}(x_2)] \wedge \mu_{B_1}(u) \} \vee \\ &\quad \max_{(x_1, x_2)} \{ [\mu_{A_{21}}(x_1) \wedge \mu_{A_1}(x_1)] \wedge [\mu_{A_{22}}(x_2) \wedge \mu_{A_2}(x_2)] \wedge \mu_{B_2}(u) \} \\ &= \max_{(x_1, x_2)} \{ \mu_{R_1}(x_1, x_2, u) \wedge \mu_A(x_1, x_2) \} \vee \max_{(x_1, x_2)} \{ \mu_{R_2}(x_1, x_2, u) \wedge \mu_A(x_1, x_2) \} \\ &= \mu_{B_1}(u) \vee \mu_{B_2}(u) \end{aligned}$$

em que $\mu_{B_1}(u)$ e $\mu_{B_2}(u)$ são as saídas parciais das regras R_1 e R_2 .

A ilustração do método Mamdani utilizando os conjuntos fuzzy de entrada e de saída, ativados pelas regras R_1 e R_2 , é apresentada na Figura 2.9.

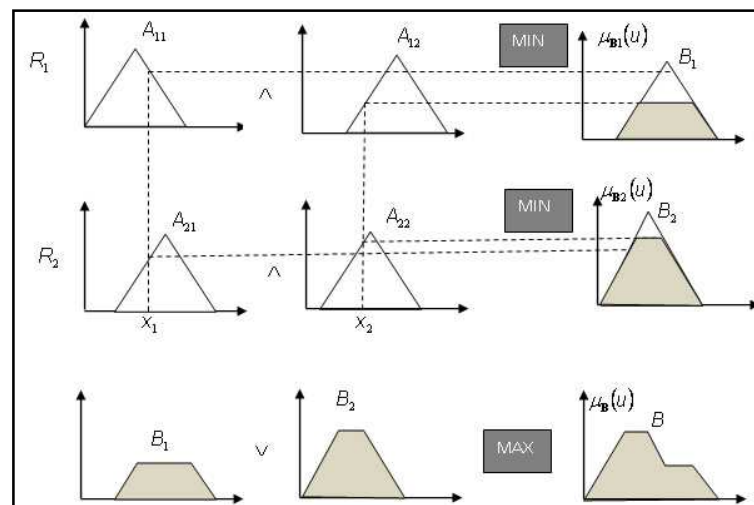


Figura 2.9 - Construção do conjunto fuzzy de saída pelo método Mamdani.

Na defuzzificação, o método utilizado é o Centro de Massa ou Centróide, semelhante à média aritmética para uma distribuição de dados, sendo que os pesos são os valores $\mu_B(u_i)$, que indicam o grau de pertinência do valor u_i no universo do discurso do conjunto fuzzy B .

Para calcular o centróide, utilizam-se as equações 2.34 e 2.35 com domínios discreto e contínuo, respectivamente (BARROS; BASSANEZI, 2006).

$$G(B) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i \mu_B(u_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_B(u_i)} \quad (2.34)$$

$$G(B) = \frac{\int_R u_i \mu_B(u) du}{\int_R \mu_B(u) du} \quad (2.35)$$

A defuzzificação conjunto fuzzy da Figura 1 está ilustrada na Figura 2.10.

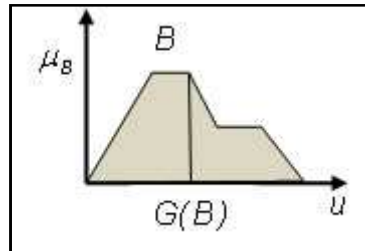


Figura 2.10 - Defuzzificador centróide $G(B)$.

2.3.2. O método de inferência de Kang-Takagi-Sugeno (KTS) e a particularização de Takagi-Sugeno (TS)

Identificando algumas dificuldades para a utilização do processo de decisão adotado no controlador de Mamdani et al. propuseram um método de tomada de decisão simplificado, baseado na lógica fuzzy, em que somente o antecedente das regras é formado por variáveis fuzzy (ANDRADE; JACQUES, 2008).

As diferenças básicas entre o método Mamdani e o KTS estão na forma de escrever o consequente de cada regra e no procedimento de defuzzificação para obter a

saída geral do sistema. Com o método KTS, o consequente de cada regra é dado explicitamente por uma função dos valores de entrada dessa regra. (BARROS; BASSANEZI, 2006)

Para ilustrar, veja-se uma base com r regras fuzzy, em que cada uma delas tem n entradas $(x_1, x_2, \dots, x_n) \in R^n$ e uma saída $u \in R$ e os A_{ij} são subconjuntos fuzzy de R :

$$\begin{aligned}
 R_1 : & \text{Se } x_1 \in A_{11} \text{ e } x_2 \in A_{12} \text{ e } \dots \text{ e } x_n \in A_{1n} \text{ então } u_1 = g_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 & \text{ou} \\
 R_2 : & \text{Se } x_1 \in A_{21} \text{ e } x_2 \in A_{22} \text{ e } \dots \text{ e } x_n \in A_{2n} \text{ então } u_2 = g_2(x_1, x_2, \dots, x_n) \\
 & \text{ou} \\
 & \vdots \\
 & \text{ou} \\
 R_r : & \text{Se } x_1 \in A_{r1} \text{ e } x_2 \in A_{r2} \text{ e } \dots \text{ e } x_n \in A_{rn} \text{ então } u_r = g_r(x_1, x_2, \dots, x_n)
 \end{aligned}$$

A saída geral do método é dada pela equação 2.36:

$$u = f_r(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{\sum_{j=1}^r w_j \Delta_1 g_j(x_1, x_2, \dots, x_n)}{\sum_{j=1}^r w_j} = \frac{\sum_{j=1}^r w_j \Delta_1 u_j}{\sum_{j=1}^r w_j} \quad (2.36)$$

em que $w_j = \mu_{A_{j1}}(x_1) \Delta_2 \mu_{A_{j2}}(x_2) \dots \Delta_2 \mu_{A_{jn}}(x_n)$; Δ_1 e $\Delta_2 =$ t-normas.

Os pesos w_j correspondem à contribuição da regra R_j para a saída geral. As t-normas mais comuns são o produto e o mínimo.

Para exemplificar o método KTS, considere-se uma situação com duas regras, cada uma com duas variáveis de entrada e uma saída.

$$\begin{aligned}
 R_1 : & \text{"Se } x_1 \in A_{11} \text{ e } x_2 \in A_{12} \text{ então } u_1 = g_1(x_1, x_2)\text{"} \\
 & \text{ou} \\
 R_2 : & \text{"Se } x_1 \in A_{21} \text{ e } x_2 \in A_{22} \text{ então } u_2 = g_2(x_1, x_2)\text{"}
 \end{aligned}$$

Supondo $\Delta_1 =$ produto e $\Delta_2 =$ mínimo, temos como saída geral a equação 2.37:

$$u = \frac{w_1 u_1 + w_2 u_2}{w_1 + w_2} = \frac{w_1 g_1(x_1, x_2) + w_2 g_2(x_1, x_2)}{w_1 + w_2} = f_r(x_1, x_2) \quad (2.37)$$

em que $w_i = \min[\mu_{A_{i1}}(x_1), \mu_{A_{i2}}(x_2)]$.

Segundo Barros e Bassanezi (2009), o caso que aparece com maior frequência, devido à sua eficiência e aplicabilidade, é aquele em que os consequentes de cada regra são funções lineares afins g_i , que têm a forma: $g_i(x_1, x_2) = a_i x_1 + b_i x_2 + c_i$.

Quando a função g_i é linear, o método de inferência é comumente chamado de Takagi-Sugeno (TS).

Sobre os métodos Mamdani e KTS, podem ser feitas as seguintes considerações:

- 1) O método Mamdani é mais simples e mais intuitivo que o método KTS;
- 2) O método Mamdani é menos eficiente que o de KTS quanto à rapidez computacional;
- 3) O método Mamdani tem menos propriedades matemáticas que o KTS.

O método KTS é mais exato que o método Mamdani; no entanto, existe uma dificuldade, que é determinar os parâmetros das funções (lineares) de saída. Uma opção é implementar o método Mamdani para gerar dados de saída e, a partir desses dados, utilizar o método estatístico para calcular os parâmetros das funções de saída do método TS.

2.3.3. Exemplo de aplicação dos métodos Mamdani e TS

Para exemplificar a aplicação dos métodos de inferência Mamdani e Takagi-sugeno, utilizou-se o SLF desenvolvido por Oliveira et al. (2005), demonstrado na

Figura 2.11, que estimou o conforto térmico do alojamento de aves poedeiras em produção. As variáveis de entrada do sistema foram a temperatura do bulbo seco e a umidade relativa do ar, que influenciaram uma variável de saída: conforto térmico.

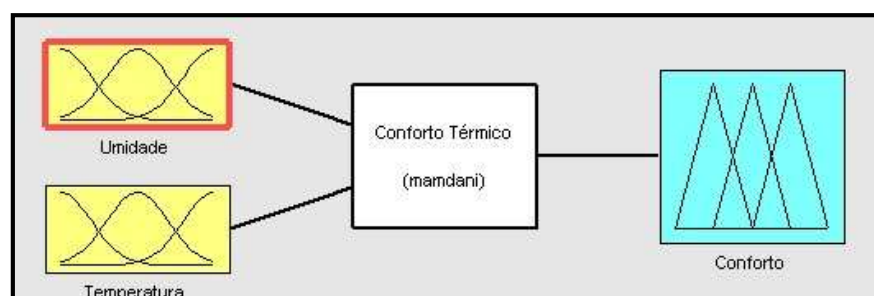


Figura 2.11 - SLF proposto por Oliveira et al. (2005).

Os conjuntos fuzzy correspondentes à variável:

- a) **Temperatura** - definiu-se com cinco conjuntos fuzzy: muito baixa (MB); baixa (B); média (M); alta (A) e muito alta (MA). As funções de pertinência escolhidas para representar os conjuntos fuzzy foram as trapezoidais, com a partição do universo do discurso no intervalo $[5^{\circ}\text{C}, 35^{\circ}\text{C}]$, conforme demonstrado na Figura 2.12.

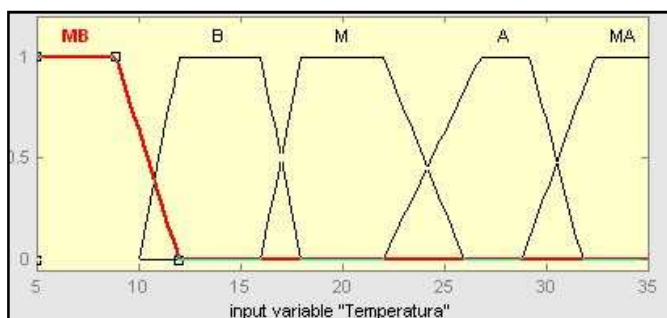


Figura 2.12 - Conjuntos fuzzy da variável temperatura (em $^{\circ}\text{C}$).

- b) **Umidade** - foi definida com os conjuntos fuzzy: baixa (B); média baixa (MB), média (M); média alta (MA); alta (A). O universo do discurso variou no intervalo de $[65\%, 90\%]$, conforme Figura 2.13.

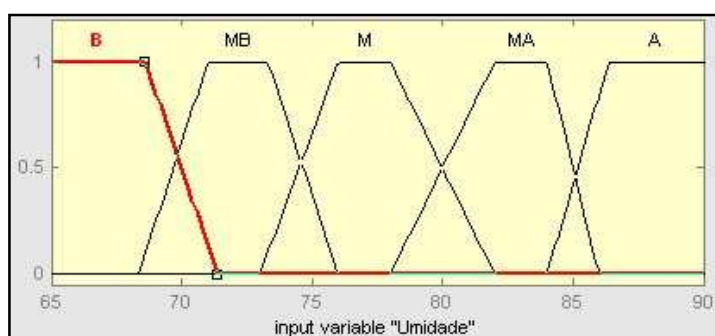


Figura 2.13 - Conjuntos fuzzy da variável umidade (em %).

- c) **Conforto** - classificou-se com os conjuntos fuzzy: ruim (R); médio (M) e bom (B). A partição do universo do discurso ocorreu no intervalo $[0,1]$ (Figura 2.14).

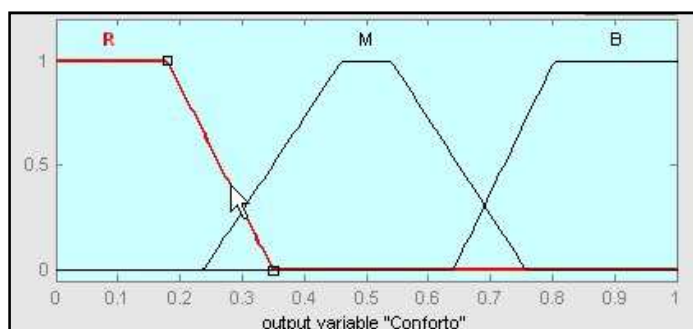


Figura 2.14 - Conjuntos fuzzy da variável conforto (adimensional).

Os autores definiram o conjunto de regras apresentado na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Conjunto de regras do trabalho de Oliveira et al. (2005)

Umidade	Temperatura				
	MB	B	M	A	MA
B	R	M	B	B	R
MB	R	B	B	B	R
M	R	B	B	M	R
MA	R	M	B	R	R
A	R	M	M	R	R

A seguir será simulada uma situação em que umidade relativa do ar é (umidade = 79%) e a temperatura do ar ambiente é (temperatura = 17°C).

A variável linguística umidade, ao assumir o valor de 79%, pertence a dois conjuntos fuzzy: média (M) e muito alta (MA); as funções de pertinência estão apresentadas na Figura 2.15.

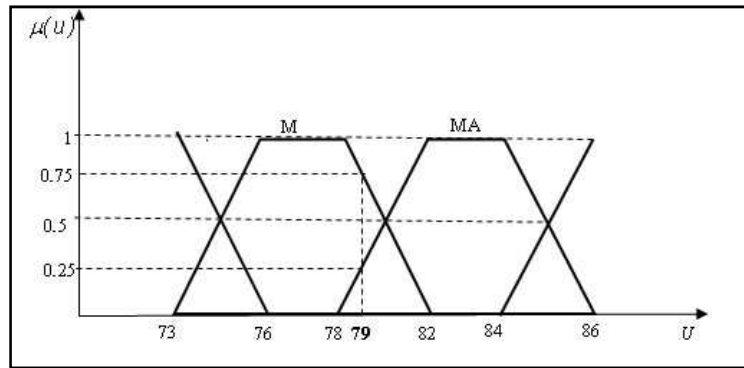


Figura 2.15 - Funções de pertinência dos conjuntos fuzzy M e MA.

As fórmulas analíticas das funções de pertinência dos conjuntos fuzzy M e MA são:

$$\mu_M(u) = \begin{cases} 0 & \text{se } u \leq 73 \\ \frac{u-73}{3} & \text{se } 73 < u \leq 76 \\ 1 & \text{se } 76 < u \leq 78 \\ \frac{82-u}{4} & \text{se } 78 < u \leq 82 \\ 0 & \text{se } u > 82 \end{cases}$$

$$\mu_{MA}(u) = \begin{cases} 0 & \text{se } u \leq 78 \\ \frac{u-78}{4} & \text{se } 78 < u \leq 82 \\ 1 & \text{se } 82 < u \leq 84 \\ \frac{(86-u)}{2} & \text{se } 84 < u \leq 86 \\ 0 & \text{se } u > 86 \end{cases}$$

O grau de pertinência da unidade 79%, para cada um dos conjuntos fuzzy, é calculado com base nas respectivas funções de pertinência:

$$\mu_M(79) = \frac{(82-79)}{4} = 0,75 \quad \text{e} \quad \mu_{MA}(79) = \frac{79-78}{4} = 0,25$$

De forma semelhante, a variável linguística temperatura, ao assumir valor de 17°C, pertence a dois conjuntos fuzzy: média (M) e baixa (B), com funções de pertinência conforme Figura 2.16.

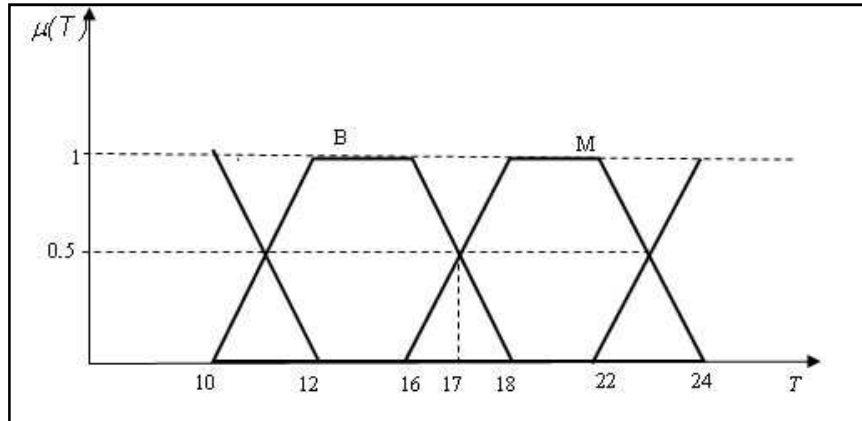


Figura 2.16 - Funções de pertinência dos conjuntos B e M.

As funções de pertinência correspondentes aos conjuntos fuzzy baixa (B) e média (M) têm as seguintes fórmulas analíticas:

$$\mu_B(T) = \begin{cases} 0 & \text{se } T \leq 10 \\ \frac{(T-10)}{2} & \text{se } 10 < T \leq 12 \\ 1 & \text{se } 12 < T \leq 16 \\ \frac{(18-T)}{2} & \text{se } 16 < T \leq 18 \\ 0 & \text{se } T > 18 \end{cases}$$

$$\mu_M(T) = \begin{cases} 0 & \text{se } T \leq 16 \\ \frac{T-16}{4} & \text{se } 16 < T \leq 18 \\ 1 & \text{se } 18 < T \leq 22 \\ \frac{24-T}{2} & \text{se } 22 < T \leq 24 \\ 0 & \text{se } T > 24 \end{cases}$$

Atribuindo-se o valor de $T = 17^\circ\text{C}$, tem-se que $\mu_B(17) = \mu_M(17) = 0,5$, como observado na Figura 2.16.

As duas variáveis linguísticas de entrada do sistema de controle, umidade igual a 79% e temperatura igual a 17°C, ativam as regras:

R1: Se umidade é M e temperatura é B então conforto é B;

R2: Se umidade é M e temperatura é M então conforto é B;

R3: Se umidade é MA e temperatura é B então conforto é M;

R4: Se umidade é MA e temperatura é M então conforto é B.

Essas regras informam que a saída será constituída dos conjuntos fuzzy B e M, como mostra a Figura 2.17.

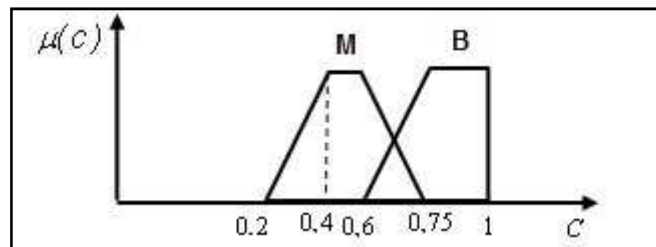


Figura 2.17 - Funções de pertinência dos conjuntos de saída fuzzy B e M.

As formas analíticas das relações de pertinência dos conjuntos fuzzy B e M são:

$$\mu_M(c) = \begin{cases} 0 & \text{se } c \leq 0,2 \\ \frac{c-0,2}{0,2} & \text{se } 0,2 < c \leq 0,4 \\ 1 & \text{se } 0,4 < c \leq 0,6 \\ \frac{0,75-c}{0,15} & \text{se } 0,6 < c \leq 0,75 \\ 0 & \text{se } c > 0,75 \end{cases}$$

$$\mu_B(c) = \begin{cases} 0 & \text{se } c \leq 0,6 \\ \frac{c-0,6}{0,15} & \text{se } 0,6 < c \leq 0,75 \\ 1 & \text{se } 0,75 < c < 1 \\ 0 & \text{se } c > 1 \end{cases}$$

$$0 \leq \mu_B(c) \leq 1 \quad \text{se } c = 1$$

O método de inferência Mamdani, baseado nos operadores MAX-MIN, é aplicado ao conjunto de regras ativadas no exemplo para construir o conjunto fuzzy de saída, como mostram as Figuras 2.18 e 2.19.

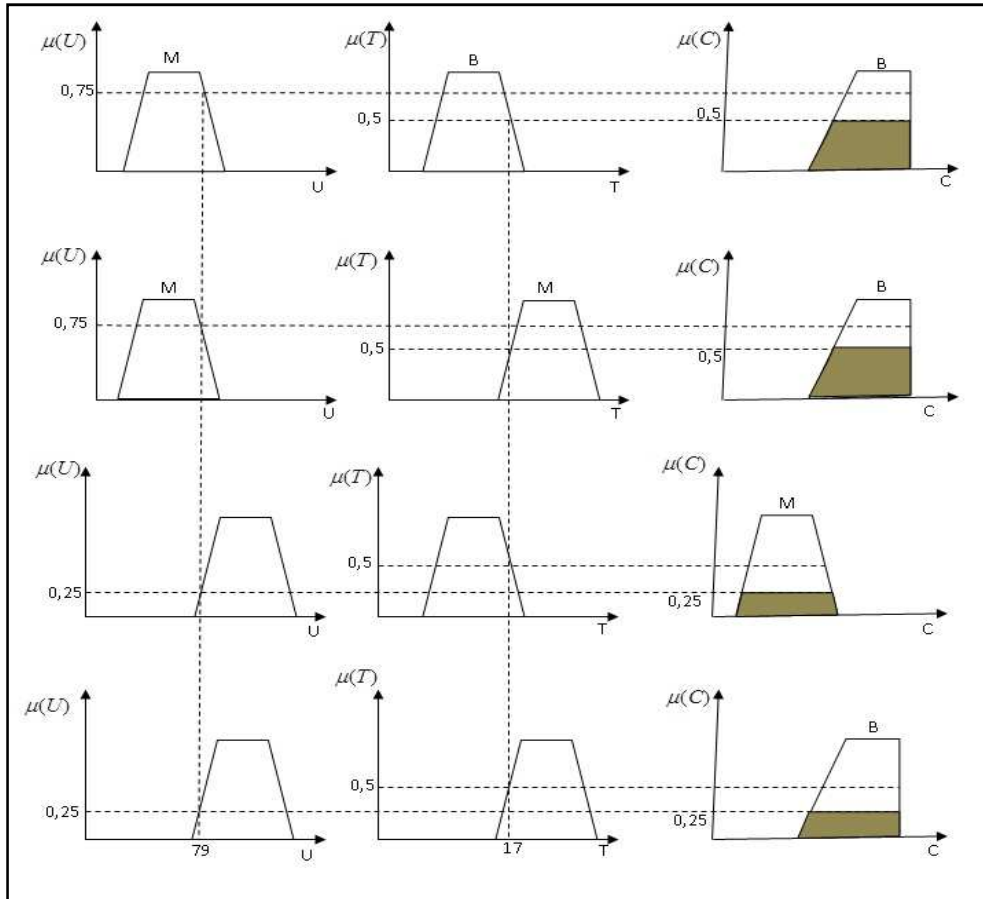


Figura 2.18 - Saídas parciais para cada uma das regras ativadas pelo método Mamdani.

Aplicando-se o operador máximo às saídas parciais do controlador fuzzy, gera-se o conjunto de saída (Figura 2.19).

Os valores numéricos do conforto térmico no polígono de saída do controlador Mamdani, apresentados na Figura 2.19, foram calculados com a fórmula analítica das funções de pertinência de saída $\mu_B(c)$ e $\mu_M(c)$.

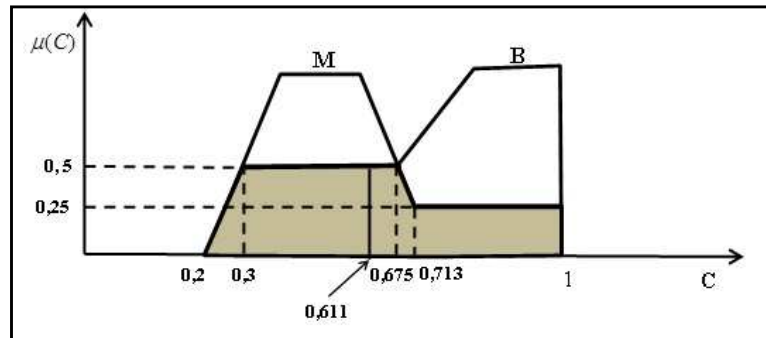


Figura 2.19 - Saída *fuzzy* do controlador Mamdani.

Aplicando-se o método Centro de Massa (centroide) para o processo de defuzzificação, obtém-se o valor numérico:

$$G(B) = \frac{\sum_{i=0}^n u_i \mu_B(u_i)}{\sum_{i=0}^n \mu_B(u_i)} = \frac{\sum_{i=0}^6 u_i \mu_i}{\sum_{i=0}^6 \mu_i}$$

$$G(B) = \frac{0,2 \times 0 + 0,3 \times 0,5 + 0,675 \times 0,5 + 0,713 \times 0,25 + 1 \times 0,25 + 1 \times 0}{0 + 0,5 + 0,5 + 0,25 + 0,25 + 0}$$

$$G(B) = 0,611$$

Para as condições de umidade igual a 79% e temperatura 17°C, o conforto é igual 0,611.

Se esse mesmo problema for resolvido pela aplicação do método TS, serão utilizadas funções constantes com o consequente das regras representando a variável conforto térmico, classificada por valores reais no intervalo [0,1], tais como na Tabela 2.4.

Os valores da Tabela 2.4 foram definidos a partir dos valores mínimo, médio e máximo do domínio do conjunto fuzzy “conforto”, utilizado no método de inferência Mamdani proposto por Oliveira et al. (2005).

Tabela 2.4 - Classificação do conforto térmico

Conforto térmico	Valor
Ruim (R)	0
Médio (M)	0,5
Bom (B)	1

Com base nessa classificação, as funções dos consequentes das quatro regras ativadas para a temperatura de 17°C e a umidade de 79% ficam definidas com os valores apresentados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5 - Funções consequentes das regras ativadas

Regras ativadas	Função dos consequentes
R1 B	$g_1 = 1$
R2 B	$g_2 = 1$
R3 M	$g_3 = 0,5$
R4 B	$g_4 = 1$

Aplicando essas funções na equação (4), com o uso das T-normas produto e mínimo, tem-se como saída do método TS:

$$u = \frac{w_1 g_1 + w_2 g_2 + w_3 g_3 + w_4 g_r}{w_1 + w_2 + w_3 + w_4} = \frac{0,5 \cdot 1 + 0,5 \cdot 1 + 0,25 \cdot 0,5 + 0,25 \cdot 1}{0,5 + 0,5 + 0,25 + 0,25} = \frac{1,38}{1,5} = 0,92$$

2.3.4. Revisão bibliográfica sobre lógica *fuzzy* na agricultura

Nesta pesquisa, foram avaliados trabalhos em que a lógica fuzzy foi utilizada como ferramenta de controle/inferência para resolver problemas que envolveram

diversas áreas da agricultura. A metodologia utilizada na revisão bibliográfica foi descrever os SLF empregados nos trabalhos, agrupando-os em áreas afins.

Nos sistemas lógicos fuzzy, as tarefas são comandadas pelos conhecimentos empíricos de especialistas, relacionadas com alguma variável de interesse e traduzidas por conjuntos fuzzy que, associados a uma determina base de regras, gera a relação fuzzy, que controla/inferre uma variável-resposta.

Foram desenvolvidos trabalhos para racionalizar o consumo de energia elétrica em espaços agrícolas. Manzine e Teixeira (2006) propuseram uma metodologia fuzzy alternativa na escolha da estrutura tarifária de energia elétrica mais conveniente para uma agroindústria.

Cramesco et al. (2010) elaboraram um modelo fuzzy que avaliou o faturamento do consumo de energia elétrica e a demanda de potência ativa e reativa em uma empresa de avicultura de postura, situada na região de Bastos, São Paulo.

Caneppele e Seraphim (2010) apresentaram uma metodologia fuzzy aplicada ao controle de um sistema híbrido de geração de energia eólico-fotovoltaica, de pequeno porte, para controlar o suprimento de energia requerida por uma residência rural.

O trabalho foi desenvolvido no Núcleo de Energias Alternativas e Renováveis (NEAR), do Laboratório de Energização Rural do Departamento de Engenharia Rural da Unesp, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Fazenda Experimental Lajeado, localizada no município de Botucatu, São Paulo. Colheram-se dados sobre a velocidade do vento, a energia disponível no vento total diário, a irradiância solar média diária e a energia solar total diária. Esses dados foram usados no projeto fuzzy para definir as faixas de valores ou limites preestabelecidos no universo do discurso das variáveis do sistema.

A ambiência animal, um tema sobre o qual vários autores pesquisam no Brasil, é uma área de estudo que utiliza a lógica fuzzy como ferramenta de auxílio à tomada de decisão. Nesse caso, os SLF são desenvolvidos para avaliar as condições de conforto nos ambientes de produção animal.

Pereira et al. (2008) construíram um suporte à tomada de decisão com base na teoria dos conjuntos fuzzy para estimar o bem-estar de matrizes pesadas em razão da frequência e da duração dos comportamentos expressos pelas aves. Oliveira et al. (2005) desenvolveram uma ferramenta matemática promissora na análise de sistemas e/ou processos na área de produção animal. Essa ferramenta permitiu a análise da composição das variáveis climáticas independentes: temperatura de bulbo seco e

umidade relativa do ar, que influenciaram a variável dependente conforto térmico, a fim de prever a situação de conforto das aves.

Schiassi et al. (2008), pesquisando sobre o mesmo tema, propuseram um modelo fuzzy com o objetivo de prever o aumento da temperatura corporal (ATC) em frangos de corte ($2,8 \pm 0,1$ kg) aos 90 minutos de exposição térmica, sob diferentes condições de estresse térmico agudo. Perissinotto et al. (2009) construíram um algoritmo baseado na lógica fuzzy para modelar e avaliar a sensação de conforto térmico de animais confinados, considerando as variáveis fisiológicas temperatura retal (TR) e frequência respiratória (FR) e determinando os intervalos críticos dessas variáveis.

Pandarofi et al. (2007) constataram que não se deve mais considerar sistema de produção animal ou cadeia produtiva sem o conceito de bem-estar na produção. Os autores desenvolveram um modelo fuzzy que consistiu na avaliação do ambiente de alojamento para estimar as condições favoráveis ao melhor desempenho de matrizes gestantes de suínos. O uso da teoria dos conjuntos fuzzy permitiu que se relacionassem os dados resultantes do trabalho experimental com os estabelecidos pela literatura por intermédio de base de regras, para determinar o conforto ambiental das matrizes na fase de gestação.

Os SLF também são utilizados para prever dados de produção. Vargens et al. (2003) propuseram um controlador fuzzy que permitiu aos fazendeiros estimar a sua produção de cacau com precisão e simplicidade. Coelho (2007) desenvolveu um modelo que usa em seu arcabouço teórico o conceito de lógica fuzzy para responder às seguintes questões: qual será a taxa de evolução do biodiesel como fonte de energia renovável na matriz energética brasileira até 2011? Poderá o Brasil vir a ser um *player* significativo nesse mercado, visto que o consumo de biodiesel poderá experimentar uma evolução consistente nesse período? Como o modelo proposto pode auxiliar na tomada de decisão da Petrobrás sobre o montante a ser investido nos próximos anos para desenvolver esse mercado?

Estudos relacionados com problemas ambientais também aplicaram modelos fuzzy. Barreto-Neto e Sousa Filho (2008) desenvolveram um modelo hidrológico fuzzy para estimar o escoamento superficial em uma bacia hidrográfica tropical, utilizando como base o modelo hidrológico Curva Número do Serviço de Conservação do Solo Americano. Os dados para simular o modelo fuzzy foram: mapeamento do solo, mapeamento da cobertura vegetal e dados pluviométricos e fluviométricos.

Nos trabalhos citados anteriormente, os sistemas lógicos fuzzy foram utilizados para inferir, baseados nos conjuntos fuzzy e na base de regras, resultados que descrevem o “estado das coisas”, sem executar uma ação sobre ele. Entretanto, esse sistema também pode controlar determinadas ações, como acionar um sistema de ventilação e aumentar a vazão de ar que atravessa um determinado volume de controle.

Para regular sistemas de ventilação em unidades de armazenamento de produtos agrícolas, Gottschalk et al. (2003) testaram dois modelos de controle: um convencional e um baseado no sistema de controle fuzzy. Esses modelos foram utilizados para acionar o sistema de ventilação de um *stand* de armazenamento de batatas, composto por um ventilador para gerar um fluxo de entrada de ar e um controlador de saída do ar.

Dias et al. (2005) desenvolveram modelos fuzzy para analisar as condições da temperatura ambiente, da massa ensilada e da umidade relativa do ar ambiente para realizar a aeração de forma racional em silos verticais.

Gates et al. (2001) criaram um sistema de inferência fuzzy para controlar sistemas de ventilação utilizados em armazenamento ou em instalações para animais. O sistema de controle fuzzy criado é comparado com o sistema de controle convencional. Os dois sistemas foram testados em uma granja de frangos.

Os autores descreveram a equação diferencial e todos os parâmetros necessários para modelar balanço do calor sensível no interior do volume de controle (granja de frangos). Utilizou-se a metodologia de diagrama de blocos para esquematizar os sistemas de controle da ventilação.

Cruz et al. (2001) estudaram um modelo matemático, baseado na teoria fuzzy, para calcular o tempo de aeração de uma certa massa de grãos e a frequência a ser aplicada ao inversor de frequência que controla a velocidade do sistema de ventilação. Bilobrovec et al. (2004) utilizaram um modelo de controlador baseado na lógica fuzzy para regular um motor elétrico. O controlador foi responsável pela determinação da tensão que gerou a velocidade do motor. O objetivo do estudo foi delimitar o acréscimo de tensão que deverá ser aplicado ao motor para que a velocidade se eleve a um dado valor.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Projeto do gaseificador

O gaseificador projetado como parte desta pesquisa foi do tipo concorrente, em que a alimentação do combustível é feita pelo topo. A entrada de ar ocorre em fluxo descendente e passa pelas zonas de oxidação (combustão) e redução. O reator foi construído em aço inox refratário 310, com 3 mm de espessura, na forma geométrica de dois troncos de cone, simétricos, acoplados a um cilindro. A tampa e a base do gaseificador também foram construídas em aço inox refratário 310 com 3 mm de espessura.

Foram incorporados no topo do cilindro interno do gaseificador quatro tubos de aço inox 304 de 50 mm de diâmetro para a entrada do ar primário; e quatro tubos de aço inox 304 de 10 mm de diâmetro foram distribuídos longitudinalmente no corpo do reator para inserir os termopares coletores das temperaturas nas diversas zonas do reator.

Na base do cilindro interno do gaseificador foi soldada uma grelha com a finalidade de apoiar a biomassa a ser gaseificada e permitir o fluxo de saída do gás produzido na zona de redução. Logo abaixo, no tronco do cone inferior do reator, existe um compartimento para a decantação das cinzas oriundas do processo de combustão. Na base desse tronco foram acoplados dois dispositivos: um para a remoção das cinzas e outro para a saída do gás gerado no processo de gaseificação.

O reator foi envolvido por uma camada de lã de rocha e coberto com uma chapa cilíndrica de aço galvanizado, com 2 mm de espessura, visando ao isolamento térmico.

Um anel tubular de aço com 100 mm de diâmetro foi construído e acoplado às entradas de ar do gaseificador, a fim de permitir o uso de um sistema de ventilação para fornecer o ar da gaseificação. Na Figura 3.1 encontra-se o diagrama esquemático do gaseificador, os cortes com as respectivas medidas, seguido de uma foto do reator da biomassa e de uma do gaseificador montado.

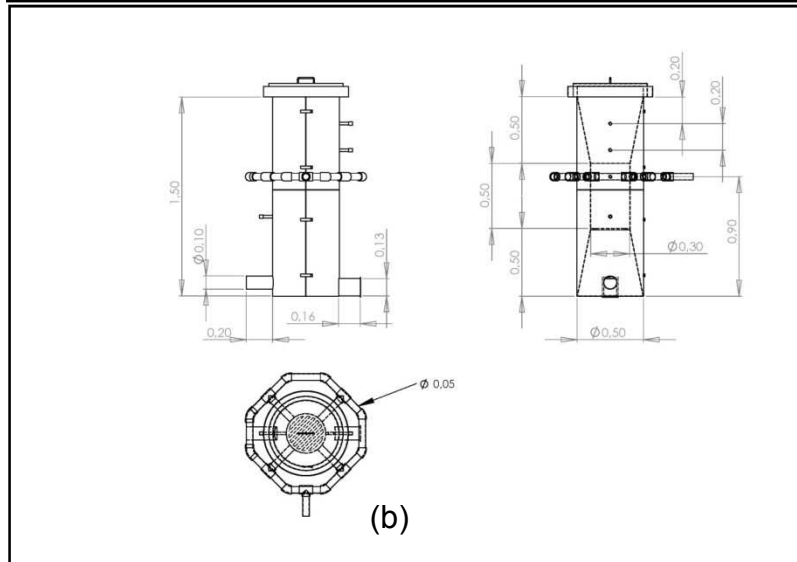
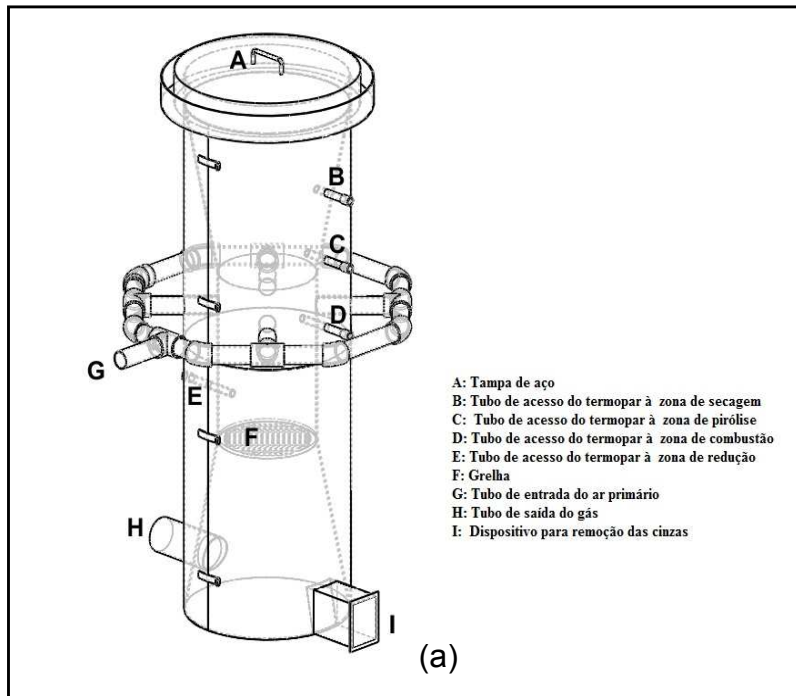


Figura 3.1 - Diagrama esquemático do gaseificador: (a) Projeto; b) Cortes do projeto com as respectivas medidas; (c) Reator da biomassa; d) Gaseificador montado.

Foi adaptado no interior do gaseificador outro cilindro, construído com o mesmo tipo de aço e de dimensão igual à do anterior para reforçar as zonas de combustão e de redução, que recebem maior intensidade de calor.

Objetivando testar o gaseificador e colher os dados de temperatura para a construção do SLF, foram utilizados os seguintes equipamentos na gaseificação: um sistema de ventilação, um módulo de aquisição de dados de temperatura e termopares localizados nas zonas de secagem, de pirólise, de combustão e de redução do gaseificador e na chama obtida com a queima do gás, como mostra o esquema na Figura 3.2.

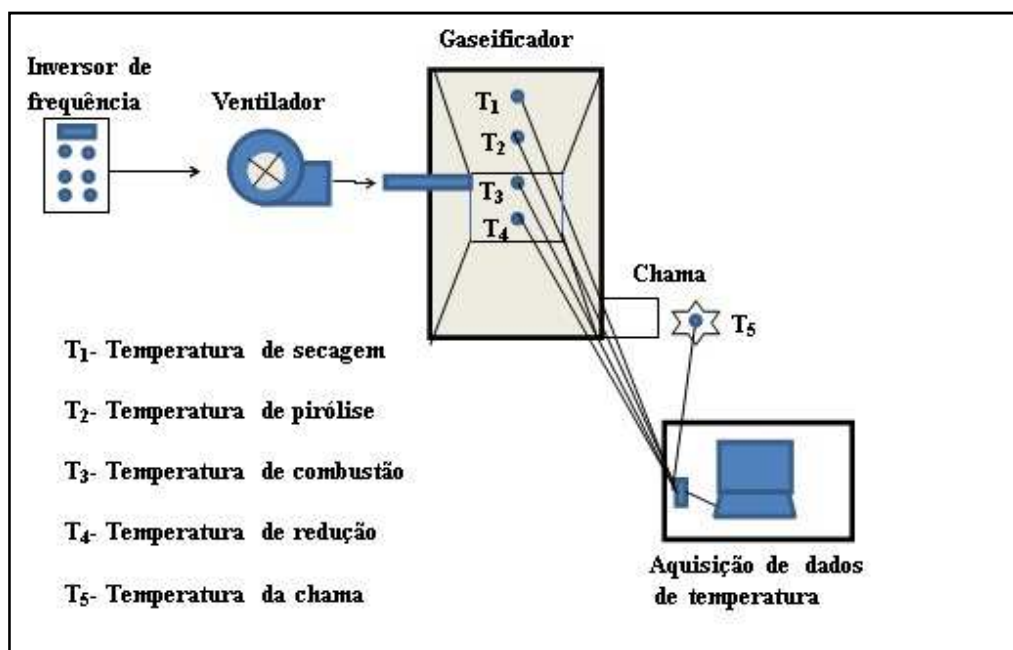


Figura 3.2 - Esquema de operação do gaseificador e da coleta dos dados de temperatura nas zonas de secagem, de pirólise, de combustão e de redução e na chama obtida com a queima do gás.

No esquema da Figura 3.2 estão representados: o inversor de frequência, ligado ao ventilador para definir a velocidade do motor elétrico do ventilador e produzir diferentes quantidades de ar primário na gasificação; os pontos em que são adaptados os termopares para medir as temperaturas nas diversas zonas do gaseificador e da chama; e o sistema de aquisição de dados, que armazena, em arquivo de dados, as temperaturas medidas.

3.1.1. Sistema de ventilação

O sistema de ventilação utilizado para insuflar o ar da gaseificação é constituído de um motor elétrico trifásico da marca WEG, de 373 W, acoplado a um ventilador centrifugo de pás retas radiais e a um inversor de frequência para controlar a velocidade do motor elétrico, como pode ser visualizado na Figura 3.3.



(a)



(b)

Figura 3.3 - Sistema de ventilação do gaseificador: (a) ventilador acoplado ao motor elétrico; (b) inversor de frequência.

3.1.2. Ignição

Após acondicionar a biomassa no interior do gaseificador até encher a parte cilíndrica, é feita a ignição do combustível utilizando-se um lança-chamas de gás GLP até a queima do material se manter estável. Nesse instante, remove-se o lança-chamas, e o sistema de ventilação é ligado. O restante do reator é, então, carregado com a biomassa e vedado com a tampa de aço.

3.1.3. Aquisição de dados da temperatura durante os testes preliminares

Para a aquisição dos dados de temperatura nas diversas zonas do gaseificador e na região da queima do gás durante os testes preliminares, foram utilizados cinco termopares do tipo K, sendo quatro introduzidos no interior do gaseificador, com o auxílio dos tubos construídos para esse fim, nas regiões de secagem, pirólise, combustão

e redução do gaseificador. O quinto termopar foi acondicionado na saída do gás produzido no gaseificador, onde se encontra a chama produzida pela queima do gás.

Os termopares foram conectados a uma central de aquisição de dados, constituída por um computador e uma placa de aquisição de dados (Figura 3.4), programada para registrar as medidas das temperaturas.

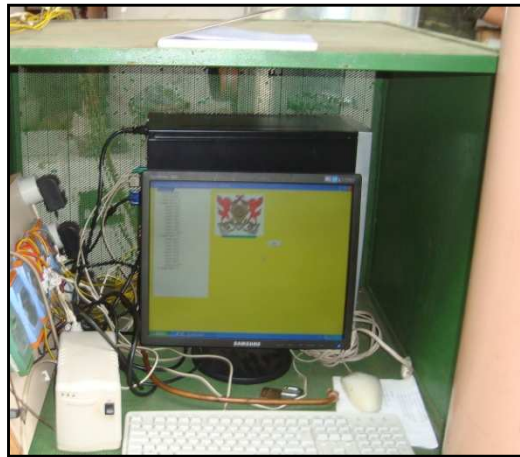


Figura 3.4 - Central de aquisição de dados da temperatura.

3.1.4. Vazão do ar primário, de exaustão e umidade relativa do ar ambiente

A velocidade do ar na entrada do gaseificador e a do ar de exaustão na saída do combustor foi medida utilizando-se um anemômetro de pá da marca Instrutherm, modelo TAVR-650, que mede velocidades de 0,0 a 45,0 m/s (com resolução de $\pm 0,1$) (Figura 3.5a). A vazão foi calculada multiplicando-se a velocidade medida do ar na entrada do gaseificador e a na saída do combustor pelas respectivas áreas da abertura de entrada de e de saída.

A umidade relativa do ar atmosférico foi monitorada por meio de um termohigrômetro digital, Instrutemp modelo HT-270 (Figura 3.5b).



(a)



(b)

Figura 3.5 - Equipamentos utilizados para monitorar a velocidade e umidade do ar ambiente: (a) anemômetro; (b) termohigrômetro digital.

3.1.5. Umidade do combustível

A umidade dos combustíveis foi determinada utilizando-se uma estufa com circulação forçada de ar e uma balança eletrônica com capacidade de 3,00 kg e resolução de 0,01 g. As amostras para cada teste foram coletadas e preparadas em pequenos pedaços e, depois de determinadas as suas massas, foram colocadas na estufa durante 24 h, à temperatura de $105 \pm 3^\circ\text{C}$, quando então tiveram a massa determinada novamente e, posteriormente, a umidade calculada.

3.1.6. Entalpia do ar ambiente

Para calcular a entalpia do ar atmosférico foi utilizado o software Computer-Aided Thermodynamic Tables 3, de Van Wylen et al. (2009), conforme Figura 3.6.

As variáveis de entrada do software foram pressão atmosférica e temperatura ambiente da região em que o experimento foi feito. A partir dessas variáveis, o software calculou várias propriedades termodinâmicas do ar, entre elas a entalpia, como se observa na Figura 3.6.

#	Temp	Pressure	Specific Entropy (Mass)	Specific Enthalpy (Mass)	Internal Energy	Specific Entropy (Mole)	Specific Enthalpy (Mole)	Internal Energy (Mole)	Reduced Pressure	Reduced Volume	Ref. Pre
	C	MPa	kJ/kg/K	kJ/kg	kJ/kg	kJ/kmol/K	kJ/kmol	kJ/kmol			h
1	28,2	0,97	6,222	301,8	215,3	180,2	8743	6238	1,132	177,5	
2	19,54	0,97	6,192	293,1	209,1	179,4	8491	6058	1,022	190,9	

Figura 3.6 - Software Computer-Aided Thermodynamic Table 3, para calcular a entalpia do ar ambiente.

3.2. Sistema de controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador

Um sistema é um conjunto de elementos que se relacionam e que, de alguma forma, interagem uns com os outros. Eventualmente, também interagem com o meio exterior, isto é, com elementos não pertencentes ao sistema. Quando se trata de sistemas físicos, esses elementos são objetos reais representados, matematicamente, por variáveis em função do tempo.

O comportamento de um sistema depende basicamente de três ações:

- 1) Ações externas ao sistema, denominadas entradas ou excitações, que são representadas por variáveis de entrada;
- 2) Ações internas ao sistema, que são as variáveis internas do sistema; e
- 3) Ações de reposta do sistema sobre o resto do universo, as variáveis de saída.

Um sistema de controle é aquele que tenta impor às variáveis de saída um determinado comportamento, cuja referência está, de alguma forma, contida nas variáveis de entrada.

Controlar um sistema significa propiciar o controle de algum dos elementos do processo, por exemplo, neste estudo, *a temperatura na zona de combustão do*

gaseificador. Na interface com o usuário, esses elementos se relacionam com variáveis para descrever as suas operações, utilizando os seguintes termos básicos:

- 1) Variável de processo (PV), correspondente à variável do processo que está sendo controlada;
- 2) *Setpoint* (SP), que é o valor desejado no processo e indica o valor em que PV deverá ser mantido; e
- 3) Erro, que é a diferença entre SP e PV ($erro = SP - PV$).

O sistema físico estudado neste trabalho é o sistema de ventilação, constituído de um inversor e um motor elétrico acoplado a um ventilador centrifugo de pás retas radiais, que interagem para determinar a velocidade com que o motor deve operar. A variável de processo é a temperatura que se pretende controlar, o *setpoint* é o valor estabelecido para essa temperatura e o erro, a diferença entre o *setpoint* e a respectiva temperatura.

Para controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador*, foram utilizados os seguintes equipamentos: um inversor de frequência da marca Weg CFW08, um motor elétrico da marca Weg, trifásico, com 373 W, acoplado a um ventilador centrifugo de pás retas radiais (Figura 3.3), quatro termopares do tipo K, um sensor de temperatura ambiente, um notebook com processador Intel®, 1,73 GHz, 2GB de memória RAM e sistema operacional de 32bits, uma placa de aquisição de dados National Instruments NI USB-6009 14-BIT $\pm 1V$, 48Ks/s multifuncion I/O, com oito canais de entrada analógica e dois de saída (Figura 3.7).

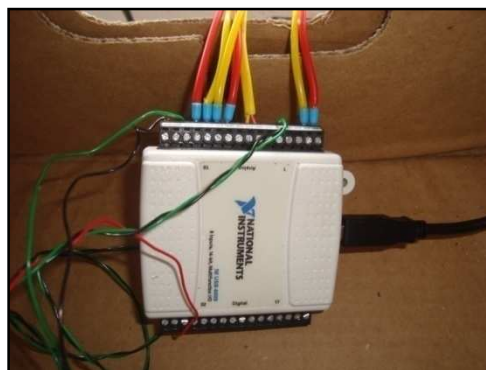


Figura 3.7 - Placa de aquisição de dados da temperatura.

3.2.1. Sistema lógico *fuzzy* para controlar a temperatura na zona de combustão do gaseificador

O SLF é o cerne do algoritmo construído para comandar o sistema de ventilação do reator e controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador*. Ele foi construído com duas variáveis de entrada e uma variável de saída.

As variáveis de entrada foram o erro (“*erro*”) e a variação da temperatura (“*variacao temp*”). A variável de saída foi a frequência de trabalho do inversor (“*frequencia*”), conforme demonstra a Figura 3.8.

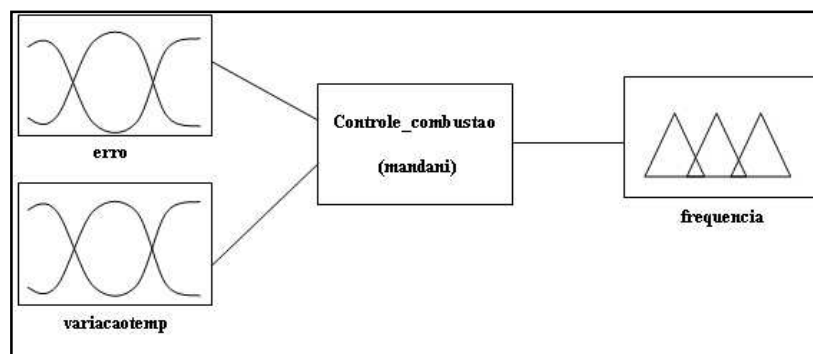


Figura 3.8 - Esquema do SLF desenvolvido para controlar a temperatura na zona de combustão do gaseificador com duas variáveis de entrada e uma de saída.

A variável “*erro*” é a diferença, em determinado instante, entre o SP e a temperatura a ser controlada (PV).

A variável “*variacao temp*” é a diferença entre a temperatura a ser controlada em determinado instante e a temperatura medida há quatro instantes anteriores. Ela informa o sentido da variação da temperatura. Se em um instante a variável é positiva, a temperatura a ser controlada está aumentando; se negativa, está diminuindo; se igual a zero, não há variação no tempo. Conhecer o sentido da variação da temperatura neste trabalho permite detectar uma situação que pode ocorrer quando a ventilação é muito alta e oferta uma massa de ar maior do que aquela necessária para combustão da biomassa, reduzindo a *temperatura na zona de combustão do gaseificador*, ao invés de aumentar. Permite também interferir nessa situação por meio de uma regra fuzzy.

A variável “*frequencia*” é o valor da frequência de trabalho que o inversor envia ao motor do sistema de ventilação. Quando o sistema de controle entra em ação, recebe as informações das variáveis de entrada, processando-as nos componentes

básicos do SLF (*fuzzificador, regras, máquina de inferência e defuzzificador*) para calcular a frequência a ser enviada ao inversor e manter o “erro” dentro de determinada faixa de temperatura.

3.2.1.1. Construção dos conjuntos fuzzy

A variável “erro” foi particionada em três conjuntos fuzzy: grande negativo (*grandeN*), *pequeno* e grande positivo (*grandeP*). Na Tabela 3.1 estão apresentados os conjuntos fuzzy, os parâmetros e os tipos de funções de pertinência utilizados e, na Figura 3.9, a representação gráfica desses conjuntos.

Tabela 3.1 - Partições da variável “erro” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes

Conjuntos Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>grandeN</i>	[-1200, -1200, -20, 0]	Trapezoidal
<i>pequeno</i>	[-20, 0, 20]	Triangular
<i>grandeP</i>	[0 20, 1200, 1200]	Trapezoidal

Os parâmetros do conjunto fuzzy *pequeno* do SLF proposto definem a faixa na qual o sistema de controle da ventilação do gaseificador deve manter a variável “erro” ($\pm 20^{\circ}\text{C}$).

A variável “*variacaotemp*” foi particionada em dois conjuntos fuzzy: *negativo* e *positivo*. Na Tabela 3.2 são apresentados os conjuntos fuzzy, os parâmetros e os tipos de funções de pertinência da variável “*variacaotemp*” e, na Figura 3.10, o gráfico dos conjuntos fuzzy dessa variável.

A variável “*frequencia*” foi particionada em três conjuntos fuzzy: *baixa, media* e *alta*. Na Tabela 3.3 são apresentados os conjuntos fuzzy, os parâmetros e os tipos de funções de pertinência da variável “*frequencia*” e, na Figura 3.11, o gráfico dos conjuntos fuzzy dessa variável.

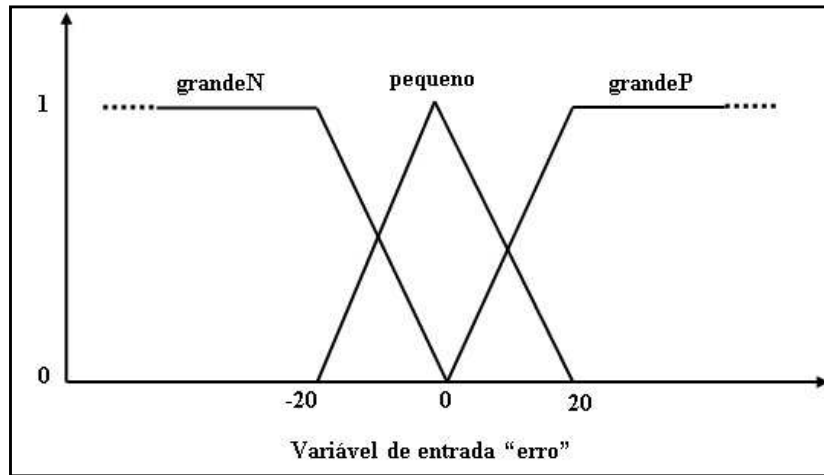


Figura 3.9 - Gráfico dos conjuntos fuzzy da variável “erro”.

Tabela 3.2 - Partições da variável “*variacaotemp*” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinência correspondentes

Conjunto Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>negativo</i>	$[-20, -20, 20]$	Triangular
<i>positivo</i>	$[-20, 20, 20]$	Triangular

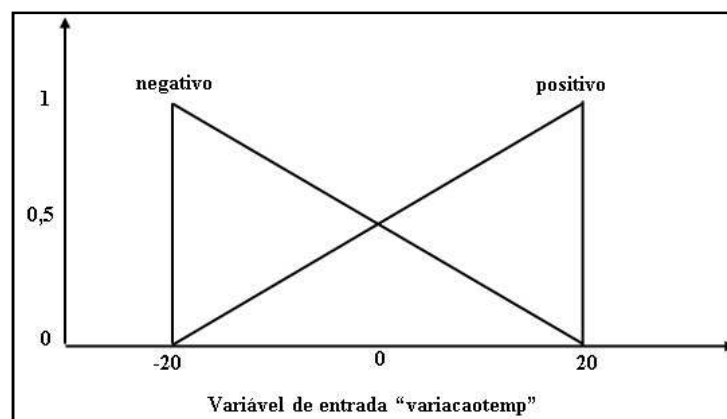


Figura 3.10 - Gráfico dos conjuntos fuzzy da variável “*variacaotemp*”.

Tabela 3.3 - Partições da variável “*frequencia*” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinências correspondentes

Conjunto Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>baixa</i>	[20, 40, 60]	Triangular
<i>media</i>	[40, 60, 80]	Triangular
<i>alta</i>	[60, 80, 100]	Triangular

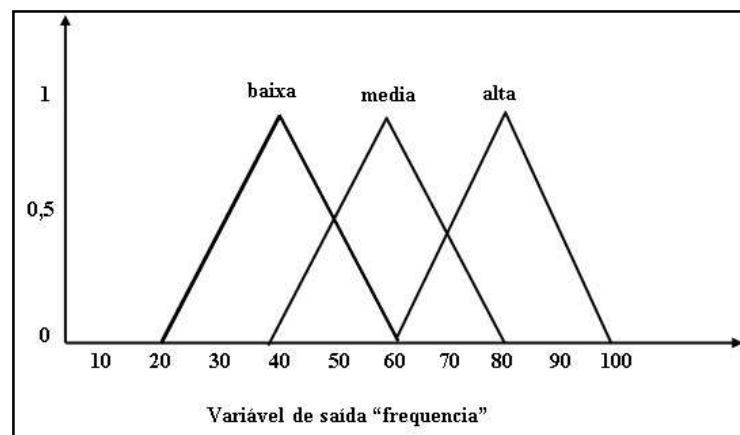


Figura 3.11 - Gráfico dos conjuntos fuzzy da variável “*frequencia*”.

O valor mínimo da variável “*frequencia*” foi definido em 20 Hz para garantir um fluxo mínimo de ar na gaseificação.

Conjunto de regras

Um conjunto de seis regras fuzzy do tipo *se erro é... e variacaotemp é... então frequencia é...*, foi construído de modo a combinar as duas variáveis de entrada e produzir como consequente um dos conjuntos fuzzy da variável de saída “*frequencia*”, como pode ser visto na Tabela 3.4.

Os consequentes das regras foram definidos com base nas informações obtidas no teste com o gaseificador, em que se observou a relação entre o aumento da frequência e o aumento das *temperaturas na zona de combustão do gaseificador e da chama*, até certo limite.

Tabela 3.4 - Conjunto de regras do Sistema Lógico Fuzzy

“erro”	“variacaotemp”	“frequencia”
gandeN	positiva	baixa
grandeN	negativa	baixa
pequena	positiva	media
pequena	negativa	media
grandeP	positiva	alta
grandeP	negativa	baixa

O método de defuzzificação utilizado para gerar o valor numérico da variável reposta “*frequencia*” foi o centro de massa, definido nos aportes teóricos.

3.2.2. Representação do sistema de controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador

Para comandar o sistema de ventilação do gaseificador e controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador*, construiu-se um algoritmo de controle baseado no SLF, que foi implementado nas plataformas de programação do Matlab: *Fuzzy logic toolbox* e *Simulink*.

O esquema de operação do sistema de controle, os equipamentos utilizados no experimento e o modo como eles se relacionam estão ilustrados na Figura 3.12.

No esquema apresentado na Figura 3.12, o sistema de ventilação do gaseificador (inversor, motor e ventilador) produz o ar primário da gaseificação. Os termopares acondicionados no gaseificador, representados por T1, T2, T3, T4, e o sensor de temperatura ambiente medem as temperaturas da zona de secagem, de pirólise, de combustão e de redução do gaseificador e a ambiente, que são armazenadas em um arquivo de dados.

A temperatura a ser controlada é a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* (T3), cujo controle está representado no diagrama de blocos da Figura 3.13.

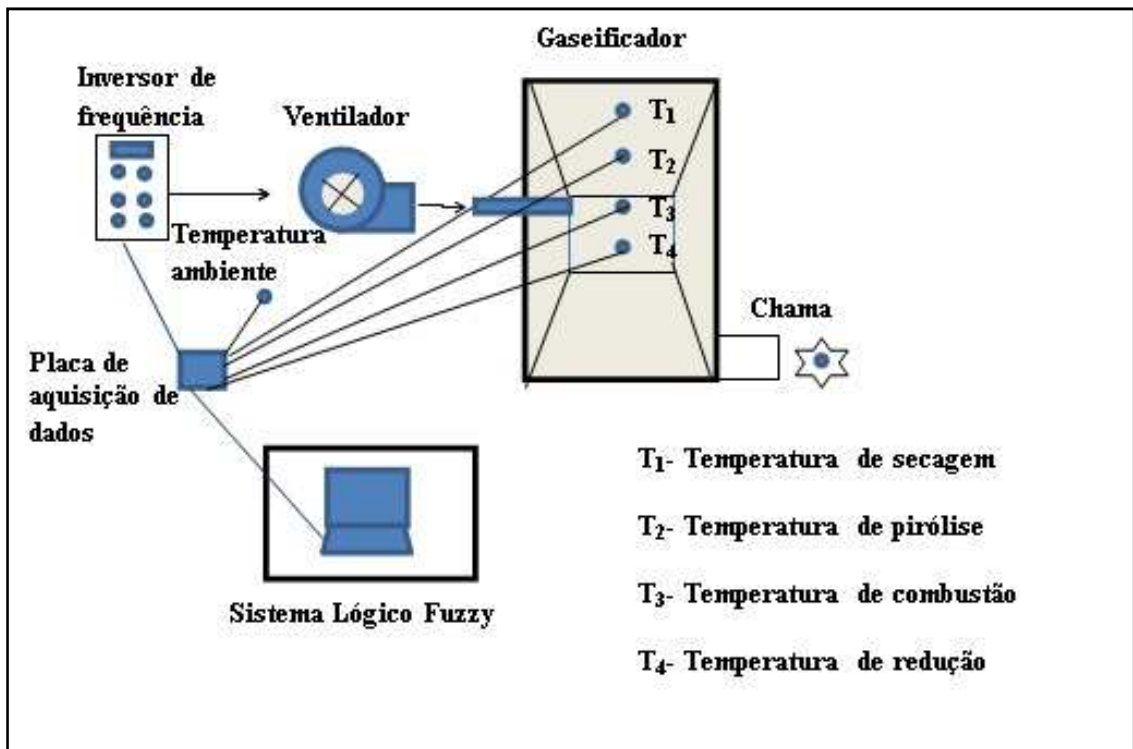


Figura 3.12 - Esquema de operação e equipamentos utilizados no controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador

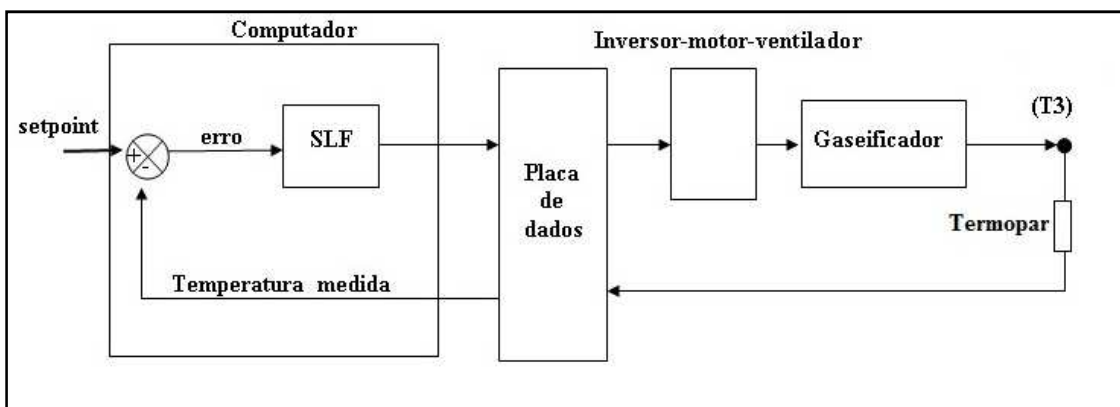


Figura 3.13 - Diagrama de blocos representativo do sistema de controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador.

No diagrama, a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* (T3), medida pelo termopar, é comparada ao *setpoint* para determinar o erro. Esse erro é processado no SLF, que determina a frequência do sistema de ventilação (inversor-motor-ventilador) que produz a massa de ar primário do processo de gaseificação. Dependendo da massa de ar primário, a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* aumenta, diminui ou permanece a mesma, com o objetivo de manter o erro na faixa estabelecida no conjunto fuzzy *pequeno* do SLF. O processo é repetido continuamente enquanto o algoritmo de controle estiver em ação.

O bloco Placa de dados, representado no diagrama, é o responsável pela transformação *analógico-digital-analógico* das variáveis do processo.

3.3. Projeto do combustor

O combustor, esquematizado na Figura 3.14, foi construído com tijolos refratários, revestidos, externamente, com massa de areia e cimento. Cinco entradas para ar ambiente foram adaptadas ao combustor, todas de aço, na forma cilíndrica. Duas de quatro polegadas de diâmetro, na região da queima do combustível, e três de seis polegadas de diâmetro, na região da mistura do ar ambiente com o ar quente produzido com a queima do gás. Um aparato em alvenaria na forma geométrica de paralelepípedo, e com tampa de vidro temperado removível, foi construído na parte superior do combustor, a fim de permitir a visualização da chama e o acesso ao interior da região da combustão do gás.

Em uma das extremidades do combustor foi construída a entrada cilíndrica para a conexão com o gaseificador. Na extremidade oposta, adaptou-se um ventilador (exaustor) acoplado a um motor elétrico da marca Eberle, de 559 W de potência para misturar o ar quente com o ar ambiente e produzir o ar quente de exaustão.

No interior do combustor foi inserido um tubo metálico para ajudar a circulação do ar frio e do ar quente, produzindo uma mistura mais homogênea.

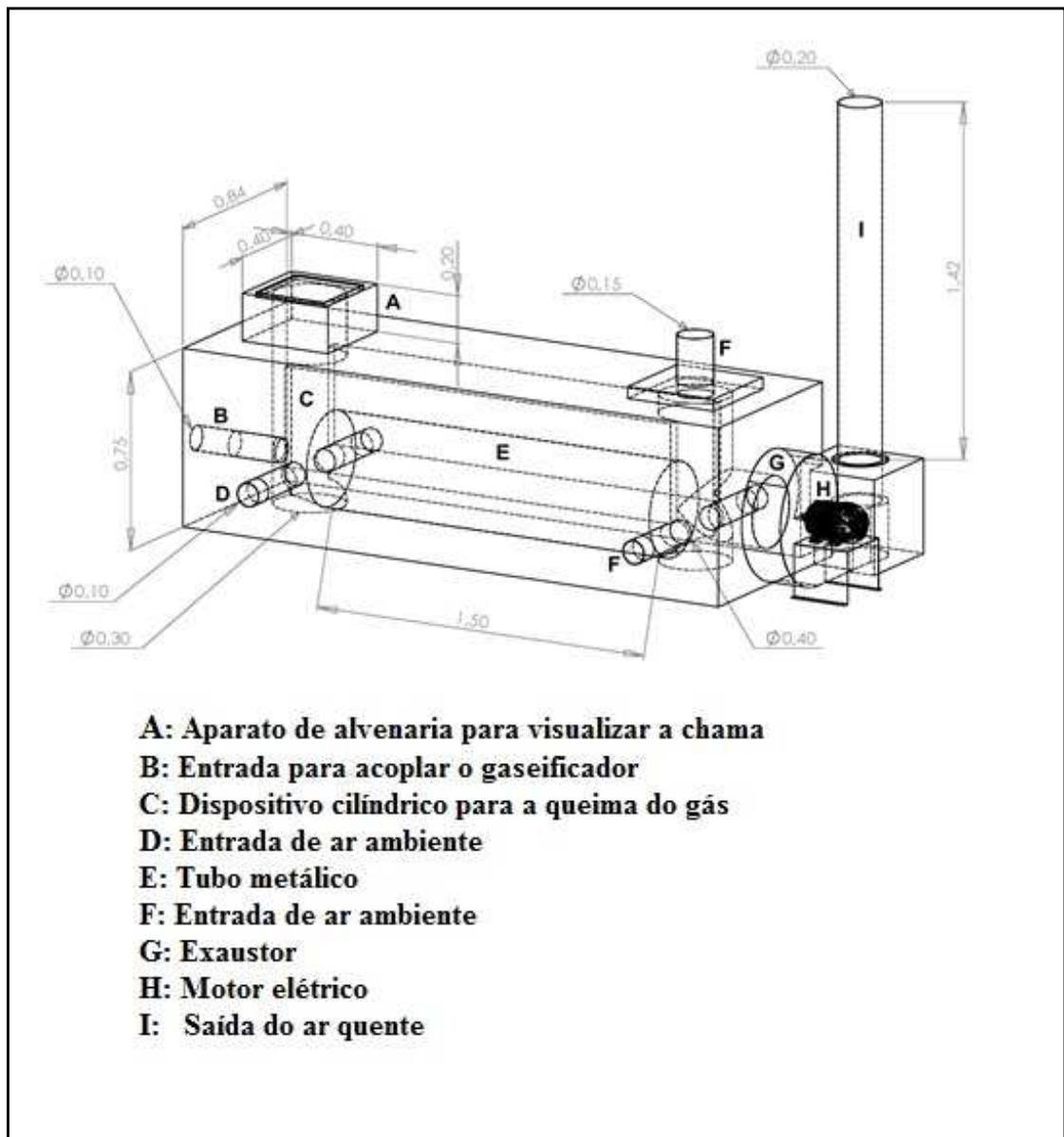


Figura 3.14 - Esquema do combustor e dos componentes utilizados para a queima do gás e para a mistura do ar quente com o ar ambiente.

3.4. Sistema de controle da temperatura do ar quente de exaustão

No controle da *temperatura do ar quente de exaustão* foram utilizados os seguintes equipamentos: um exaustor acoplado a um motor elétrico, um inversor de frequência, uma placa de aquisição de dados, um termopar do tipo K e um notebook, no qual está instalado o software de controle. Todos esses equipamentos já foram descritos anteriormente.

3.4.1. SLF para controlar a temperatura do ar quente de exaustão

As variáveis de entrada e de saída e as partições dos conjuntos fuzzy desse novo SLF foram as mesmas empregadas no controle da *temperatura na zona de combustão do gaseificador*, sendo alterados os parâmetros das variáveis “erro” e “frequencia”.

Os parâmetros dos conjuntos fuzzy da variável “erro” foram alterados observando-se os limites da temperatura do ar de exaustão obtidos no trabalho de Santos (2008), conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Partições da variável “erro” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinências correspondentes

Conjuntos Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>grandeN</i>	[-100, -100, -10, 0]	Trapezoidal
<i>Pequeno</i>	[-10, 0, 10]	Triangular
<i>grandeP</i>	[0 10, 100, 100]	Trapezoidal

Os parâmetros do conjunto fuzzy pequeno do SLF proposto definem a faixa na qual o sistema de controle da exaustão do combustor deve manter a variável “erro” ($\pm 10^{\circ}\text{C}$).

Os parâmetros da variável “frequência” foram alterados para que o motor do sistema de exaustão trabalhasse numa velocidade um pouco mais baixa do que a do motor do sistema de ventilação do gaseificador e respondesse de forma mais rápida à necessidade de aumentar a temperatura do ar de exaustão (Tabela 3.6).

O conjunto de regras fuzzy (Tabela 3.7) foi construído com seis regras, sendo os consequentes das regras definidos pelo conhecimento empírico: quando aumenta a frequência do motor, a temperatura de exaustão diminui.

O método de defuzzificação utilizado para gerar os valores das variáveis repostas (frequência dos inversores) foi o centro de massa, descrito nos aportes teóricos.

Tabela 3.6 - Partições da variável “*frequencia*” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinências correspondentes

Conjunto Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>baixa</i>	[10, 30, 50]	Triangular
<i>média</i>	[30, 50, 70]	Triangular
<i>alta</i>	[50, 70, 90]	Triangular

Tabela 3.7 - Conjunto de regras do Sistema Lógico Fuzzy

erro	variacaotemp	frequencia
<i>grandeN</i>	<i>positiva</i>	<i>Alta</i>
<i>grandeN</i>	<i>negativa</i>	<i>Media</i>
<i>pequena</i>	<i>positiva</i>	<i>Media</i>
<i>pequena</i>	<i>negativa</i>	<i>Media</i>
<i>grandeP</i>	<i>positiva</i>	<i>Baixa</i>
<i>grandeP</i>	<i>negativa</i>	<i>Media</i>

3.4.2. Representação do sistema de controle da temperatura do ar quente de exaustão

Na Figura 3.15 são apresentados o esquema de operação do sistema de exaustão do combustor e os equipamentos utilizados no controle desse sistema.

No esquema apresentado na Figura 3.15, o sistema de exaustão (inversor, motor elétrico e exaustor) mistura o ar quente proveniente da queima do gás (F) com o ar ambiente, produzindo o ar quente de exaustão. O ar produzido na mistura sai pelo tubo (B), podendo ser utilizado na secagem de grãos e outros fins.

Nesse processo são medidas a temperatura ambiente (T2) e a temperatura a ser controlada, a *temperatura do ar quente de exaustão* (T1), cujo controle está representado no diagrama de blocos da Figura 3.16.

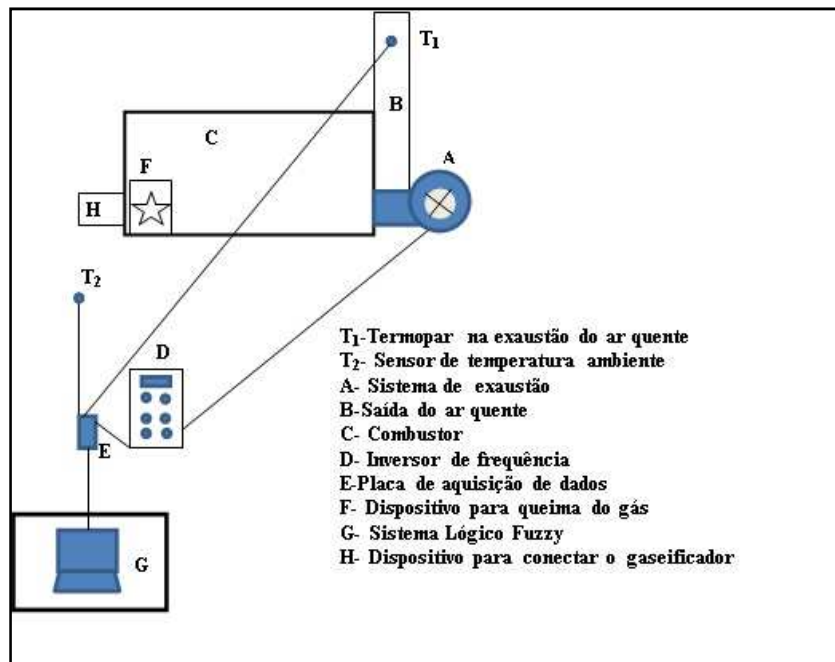


Figura 3.15 - Esquema de operação do sistema de exaustão do combustor e os equipamentos utilizados no controle da temperatura do ar quente de exaustão.

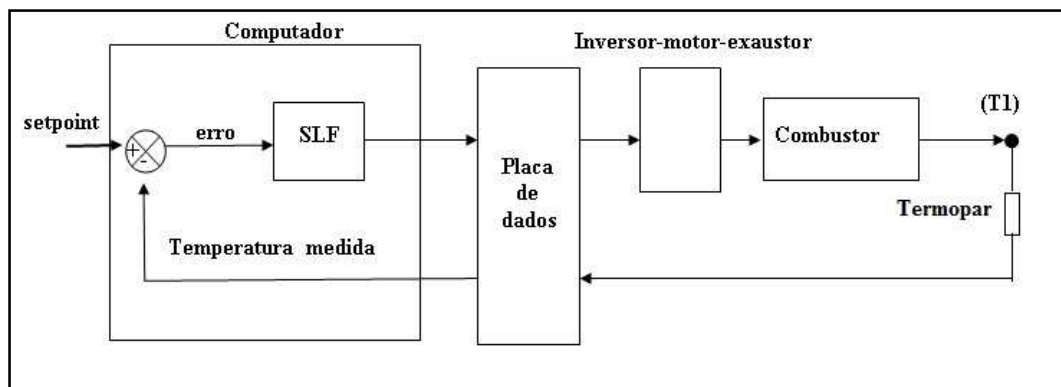


Figura 3.16 - Diagrama de blocos representativo do sistema de controle da temperatura do ar quente de exaustão.

No diagrama, a *temperatura do ar quente de exaustão* (T₁), medida pelo termopar é comparada ao *setpoint* para determinar o erro. Esse erro é processado no SLF, que determina a frequência do sistema de exaustão (inversor-motor-exaustor) que produz a mistura do ar quente com o ar ambiente. Dependendo da massa de ar quente e de ar ambiente na mistura, a *temperatura do ar quente de exaustão* aumenta, diminui ou

permanece a mesma, com o objetivo de manter o erro na faixa estabelecida no conjunto fuzzy *pequeno* do SLF. O processo é continuamente repetido enquanto o algoritmo de controle estiver em ação.

O bloco Placa de dados, representado no diagrama de blocos, é o responsável pela transformação *analógico-digital-analógico* das variáveis do processo.

3.5. Gaseificador/combustor

O gaseificador foi acoplado ao combustor utilizando a entrada B, cujo esquema foi apresentado na Figura 3.17, formando o conjunto gaseificador/combustor.

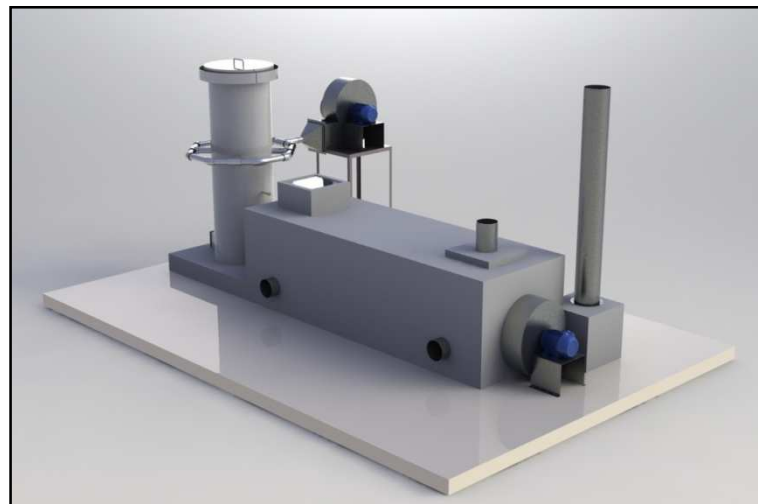


Figura 3.17 - Conjunto gaseificador/combustor.

Foi inserido no combustor um dispositivo metálico cilíndrico para que a queima do gás ocorra no seu interior, constituindo uma pré-câmara de combustão. Os objetivos desse dispositivo foram: minimizar a possibilidade de o ar aspirado pelo sistema de exaustão do combustor interferir no controle da *temperatura na zona de combustão do gaseificador*; facilitar o controle da *temperatura do ar quente exaustão* produzido no combustor; e impedir que os particulados e as cinzas provenientes da queima da biomassa sejam arrastados pelo sistema de exaustão.

3.5.1. Sistema de controle

No controle do sistema de ventilação do conjunto gaseificador/combustor foram utilizados os seguintes equipamentos: um ventilador acoplado a um motor elétrico, um exaustor acoplado a um motor elétrico, dois inversores de frequência, uma placa de aquisição de dados, dois termopares do tipo K e um computador, no qual está instalado o software de controle. Esses equipamentos já foram descritos anteriormente.

Na Figura 3.18 são apresentados o esquema de operação do sistema de ventilação do conjunto gaseificador/combustor e os equipamentos utilizados no controle desse sistema.

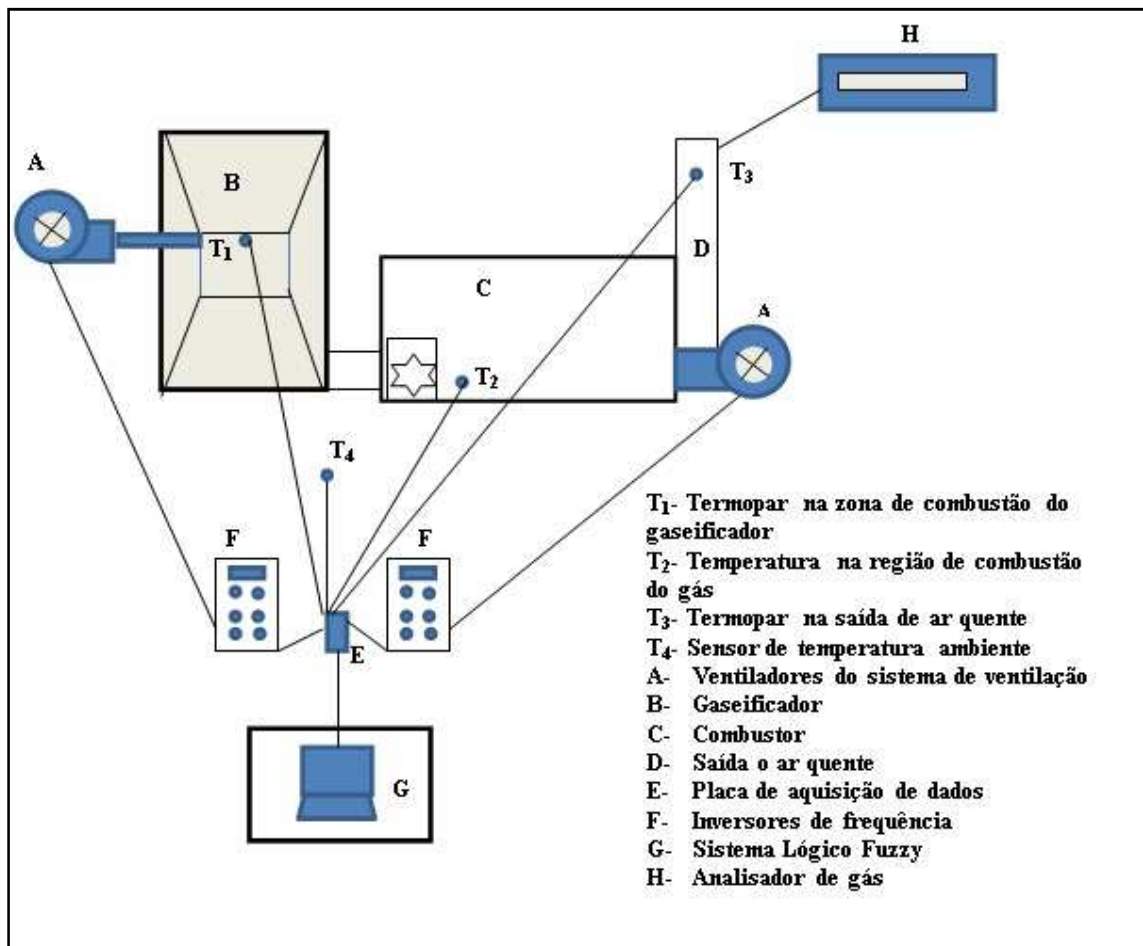


Figura 3.18 - Esquema de operação dos sistemas de ventilação e de exaustão do conjunto gaseificador/combustor e dos equipamentos utilizados no controle das temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão.

No esquema apresentado na Figura 3.18, o sistema de ventilação do gaseificador (inversor, motor elétrico e ventilador) produz o ar primário da gaseificação e o sistema de exaustão (inversor, motor elétrico e exaustor) produz a mistura do ar quente proveniente da queima do gás com o ar ambiente. São medidas as temperaturas na zona de combustão de gaseificador (T1), a ambiente (T4), na queima do gás (T2) e na saída do ar quente de exaustão (T3); e as concentrações de CO e CO₂ no ar de exaustão, utilizando um analisador de gás (H).

Neste processo as temperaturas a serem controladas são a *temperatura do ar quente de exaustão* (T3) e a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* (T1), cujo controle está representado no diagrama de blocos da Figura 3.19.

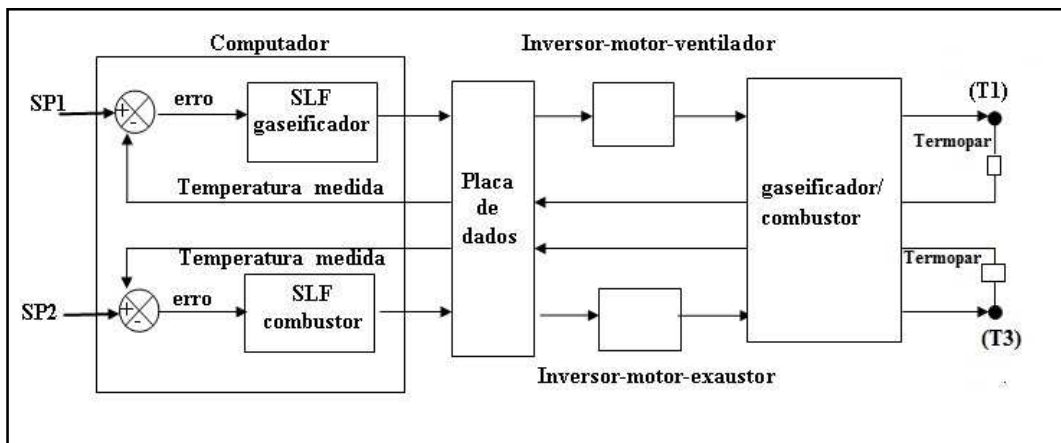


Figura 3.19 - Diagrama de blocos representativo do controle da temperatura na zona de combustão do gaseificador e da temperatura do ar quente de exaustão.

No diagrama, a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* (T1), medida pelo termopar, é comparada ao SP1 para determinar o erro. Esse erro é processado no SLF do gaseificador, que determina a frequência do sistema de ventilação (inversor-motor-ventilador) que produz o ar primário do processo de gaseificação do conjunto gaseificador/combustor. Dependendo da massa de ar, a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* aumenta, diminui ou permanece a mesma, com o objetivo de manter o erro na faixa estabelecida no conjunto fuzzy *pequeno* do SLF do gaseificador.

A *temperatura do ar quente de exaustão* (T3), medida pelo termopar, é comparada ao SP2 para determinar o erro. Esse erro é processado no SLF do combustor, que determina a frequência do sistema de exaustão (inversor-motor-exaustor), que

produz a mistura do ar quente gerado no conjunto gaseificador/combustor com o ar ambiente. Dependendo da quantidade de ar quente e de ar ambiente na mistura, a *temperatura de ar quente de exaustão* aumenta, diminui ou permanece a mesma, com o objetivo de manter o erro na faixa estabelecida no conjunto fuzzy *pequeno* do SLF.

O processo descrito é continuamente repetido enquanto o algoritmo de controle estiver em ação.

O bloco Placa de dados, representado no diagrama de blocos, é o responsável pela transformação *analógico-digital-analógico* das variáveis do processo.

O algoritmo de controle foi elaborado com base nos Sistemas Lógicos Fuzzy e implementado nas plataformas de programação do Matlab: *Fuzzy logic toolbox* e *Simulink*. O diagrama de blocos representativo da implementação do algoritmo no *simulink* se encontra nos anexos.

3.5.2. Concentração de CO e CO₂ no ar de exaustão

Para calcular as concentrações de CO e CO₂ presentes no ar de exaustão, foi utilizado um analisador de gás comercial Wuhan Cubic Optoelectronics, modelo Gasboard 3300 (Figura 3.20a).

As amostras do ar de exaustão foram colhidas com uma bomba elétrica de inflar (Figura 3.20b), que retirou amostras de ar na saída do ar quente de exaustão do conjunto gaseificador/combustor e as enviou, por meio de um tubo plástico, ao analisador de gás.



Figura 3.20 - Equipamentos utilizados para determinar as concentrações de CO e CO₂ no ar quente de exaustão: (a) analisador de gás; b) bomba de ar.

3.6. Métodos estatísticos de análise

Para avaliar a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy em manter a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e a *temperatura do ar quente de exaustão* nos valores estabelecidos, bem como a relação entre a *temperatura da zona de combustão do gaseificador* e a temperatura da chama com a frequência do inversor, foram aplicados aos dados de temperatura obtidos nos testes experimentais com o gaseificador/combustor os seguintes métodos estatísticos de análise de dados:

- Coeficiente de variação: a razão entre o desvio padrão e a média de uma variável é a medida estatística que informa a variabilidade, em torno da média, dos dados de temperatura obtidos nos testes. Gomes (1973) fez a seguinte classificação para o coeficiente de variação: Baixo - inferior a 10%, Médio - entre 10 e 20%, Alto - entre 20 e 30%, e Muito Alto - acima de 30%;
- Análise de variância (ANOVA): informa se existe diferença significativa entre as médias das temperaturas obtidas nas diversas frequências aplicadas ao motor do sistema de ventilação do gaseificador; e o teste de Tukey, separa essas médias em grupos de mesma média;
- O teste de *t de Student*, para determinar se existe diferença significativa entre a temperatura média e um valor de referência (SP);
- Tratamento de dados, para eliminar a presença de *outliers*, valores da variável temperatura que são consideradas fora do padrão, provocados por erros de medida devido aos ruídos e à transformação de dados analógicos em digitais, e valores do início e do final do processo, quando a gaseificação não está em regime permanente. O procedimento utilizado para determinar os *outliers* está em Devore (2006, p. 37).

Os cálculos estatísticos foram feitos com o software SPSS V.16.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram feitos sete testes com o gaseificador e com o conjunto gaseificador/combustor no Laboratório de Energias Alternativas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

No primeiro teste, avaliou-se o projeto do gaseificador, determinando-se as temperaturas nas diversas zonas de gaseificação, e a relação entre a frequência do motor e as temperaturas na zona de combustão do gaseificador e da chama obtida com a queima do gás.

Nos quatro testes seguintes, foram avaliados os Sistemas Lógicos Fuzzy desenvolvidos para controlar os sistemas de ventilação e de exaustão do conjunto gaseificador/combustor e manter a temperatura na zona combustão da gaseificação e a temperatura do ar de exaustão em valores estabelecidos. Nos dois últimos testes, foram avaliadas as respostas dos Sistemas Lógicos Fuzzy a situações em que são provocadas instabilidades da *temperatura na zona de combustão do gaseificador*.

Foram determinadas, também, a vazão e as concentrações de CO e CO₂ no ar quente de exaustão do conjunto gaseificador/combustor, para avaliar a possibilidade do seu uso em atividades agrícolas.

Os combustíveis utilizados nos testes foram: a lenha de eucalipto, o carvão vegetal e os chips de eucalipto (Figura 4.1). O comburente foi o ar ambiente, cuja composição está na Tabela 4.1. As propriedades termodinâmicas do ar ambiente medidas durante os testes estão na Tabela 4.2.

Os combustíveis utilizados em cada teste e os seus respectivos parâmetros estão apresentados na Tabela 4.3.

Nos testes 06 e 07 foi utilizado, simultaneamente, mais de um tipo de combustível.

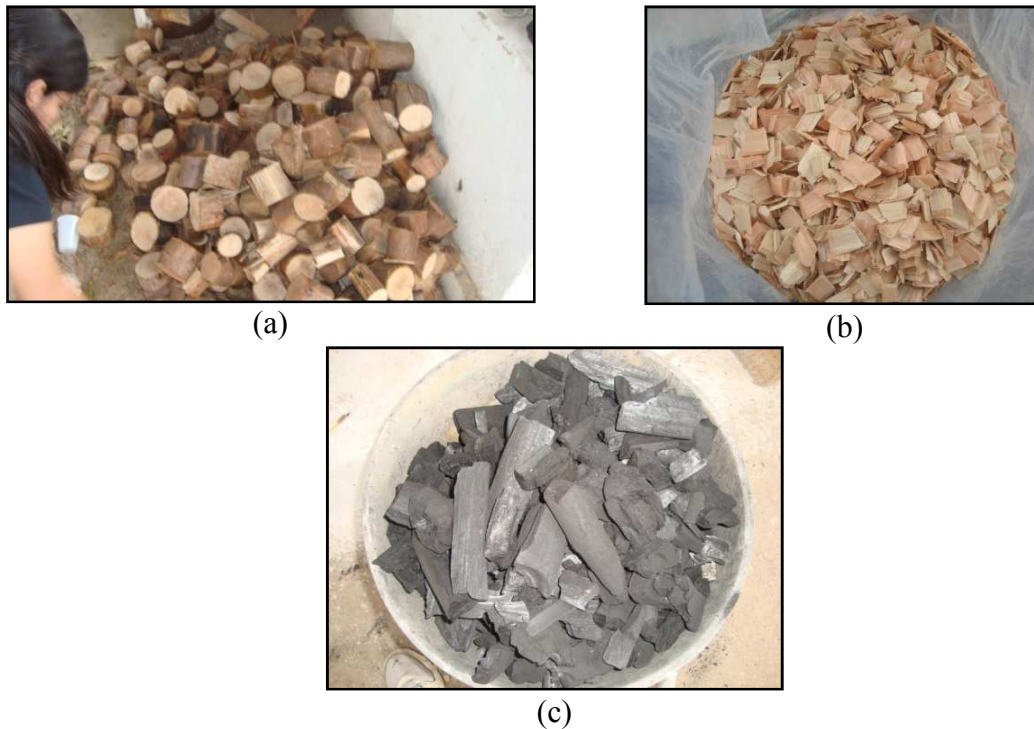


Figura 4.1 - Biomassas utilizadas durante os testes: (a) Lenha de eucalipto; (b) Chips de eucalipto; (c) Carvão vegetal.

Tabela 4.1 - Composição do ar ambiente, em % de volume e massa

Elementos	Volume (%)	Massa (%)
O ₂	21	23,2
N ₂	79	76,8

Fonte: Van Wylen et al. (2009).

Tabela 4.2 - Propriedades termodinâmicas do ar ambiente medidas durante os testes

Teste	Temperatura (°C)	Pressão atmosférica em Viçosa (atm)	Umidade relativa (%)	Entalpia KJ/kg (ar seco)
01	27,00	0,97	39,81	300,60
02	26,40	0,97	77,91	300,00
03	14,50	0,97	76,84	280,10
04	25,75	0,97	54,24	299,40
05	26,34	0,97	68,36	300,00
06	26,01	0,97	55,24	299,60
07	19,54	0,97	70,34	293,10

Tabela 4.3 - Combustíveis utilizados nos testes e os seus respectivos parâmetros

Testes	Combustível	Massa (kg)	Massa específica aparente (kg/m ³)	Umidade (%) b.u.	Consumo (kg/h)	Granulometria (mm)
01	Carvão vegetal	17,9	146,24	5,58	3,98	Comprimento: menor que 150 Diâmetro: menor que 100
02	Carvão vegetal	17,7	144,61	6,36	3,11	Comprimento: menor que 150 Diâmetro: menor que 100
03	Carvão vegetal	17,75	145,02	9,02	3,32	Comprimento: menor que 150 Diâmetro: menor que 100
04	Carvão vegetal	23,10	188,72	6,38	4,33	Comprimento: menor que 150 Diâmetro: menor que 100
05	Chips de eucalipto	25,70	215,69	14,43	14,04	Comprimento: ±40 Largura: ±20
06	Mistura carvão e chips de eucalipto	Carvão: 5,20 Chips: 18,60	Carvão: 169,93 Chips: 209,15	Carvão: 7,31 Chips: 14,43	11,44	Carvão Comprimento: menor que 150 Diâmetro: menor que 100 Chips Comprimento: ±40 Largura: ±20
07	Mistura de carvão, lenha e chips de eucalipto	Carvão: 4,20 Lenha: 7,72 Chips: 13,8	Carvão: 186,92 Lenha: 93,46 Chips: 225,49	Carvão: 6,34 Lenha: 10,50 Chips: 12,16	8,35	Lenha Diâmetro: 50 a 100 Comprimento: 60 a 100 Carvão Comprimento: menor que 150 Diâmetro: menor que 100 Chips Comprimento: ±40 Largura: ±40

4.1. Teste preliminar com o gaseificador

Foi feito um teste preliminar (Teste 01) para avaliar o projeto do gaseificador e coletar dados para subsidiar a construção dos Sistemas Lógicos Fuzzy do conjunto gaseificador/combustor. Nesse teste, coletaram-se medidas das temperaturas nas diversas zonas de gaseificação e da chama obtida com a queima do gás.

4.1.1. Teste 01

Neste teste, o sistema de ventilação do gaseificador foi constituído de um inversor de frequência e um motor elétrico trifásico acoplado a um ventilador centrifugo de pás retas radiais. As frequências do inversor foram estabelecidas, manualmente, nos seguintes valores: 40, 45, 50, 55 e 60 Hz. O combustível utilizado foi o carvão vegetal, com os parâmetros especificados na Tabela 4.2.

Para calcular as vazões volumétricas do ar primário no gaseificador foram determinadas a área do dispositivo de entrada de ar primário no gaseificador (0,0005 m²) e a velocidade do ar, em cada frequência.

O cálculo da velocidade média do ar foi feito com base na coleta de cinco medidas de velocidade em pontos distintos da entrada de ar.

A vazão volumétrica do ar primário do gaseificador foi calculada para cada uma das frequências, e os resultados estão na Tabela 4.4

Tabela 4.4 - Vazão volumétrica do ar primário no reator para cada uma das frequências do inversor

Frequência do inversor (Hz)	m ³ /h
40	4,12
45	4,46
50	4,54
55	4,90
60	5,11

A gaseificação se iniciou 30 minutos após a ignição da biomassa, durando 4 h e 30 min. Por questão de segurança, durante o período de gaseificação o gás foi queimado. Na Figura 4.2 visualiza-se a aparência da chama.



Figura 4.2 - Aparência da chama obtida na queima do gás.

Foram coletadas 305 amostras da temperatura nas zonas de secagem, pirólise, combustão e redução do gaseificador, e 192 amostras da temperatura da chama. Calcularam-se as medidas estatísticas dessas temperaturas, e os resultados estão na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Medidas estatísticas das temperaturas nas diversas zonas do gaseificador e da chama

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Secagem	131,00	516,00	248,74	109,09	43,86
Pirólise	254,00	598,00	402,85	85,78	21,29
Combustão	884,00	1200,00	1073,28	64,95	6,05
Redução	884,00	985,00	935,83	23,05	2,46
Chama	599,00	818,00	749,73	58,68	7,83

Observa-se na Tabela 4.5 que o coeficiente de variação da temperatura na zona de combustão e de redução do gaseificador foram baixos ($< 10\%$), o que mostra a estabilidade dessas temperaturas próximo ao seu valor médio. As temperaturas na zona de secagem e de pirólise apresentaram o coeficiente de variação muito alto ($> 30\%$), não se estabilizando próximas as suas médias.

Como o gaseificador não foi recarregado durante o teste, à medida que a biomassa era consumida, reduzia-se a altura da biomassa, deixando as zonas de secagem e de pirólise vazias antes do final do processo de gaseificação, o que provocou alta variabilidade nas temperaturas.

As temperaturas medidas nas diversas zonas do gaseificador e da chama foram plotadas na Figura 4.3.

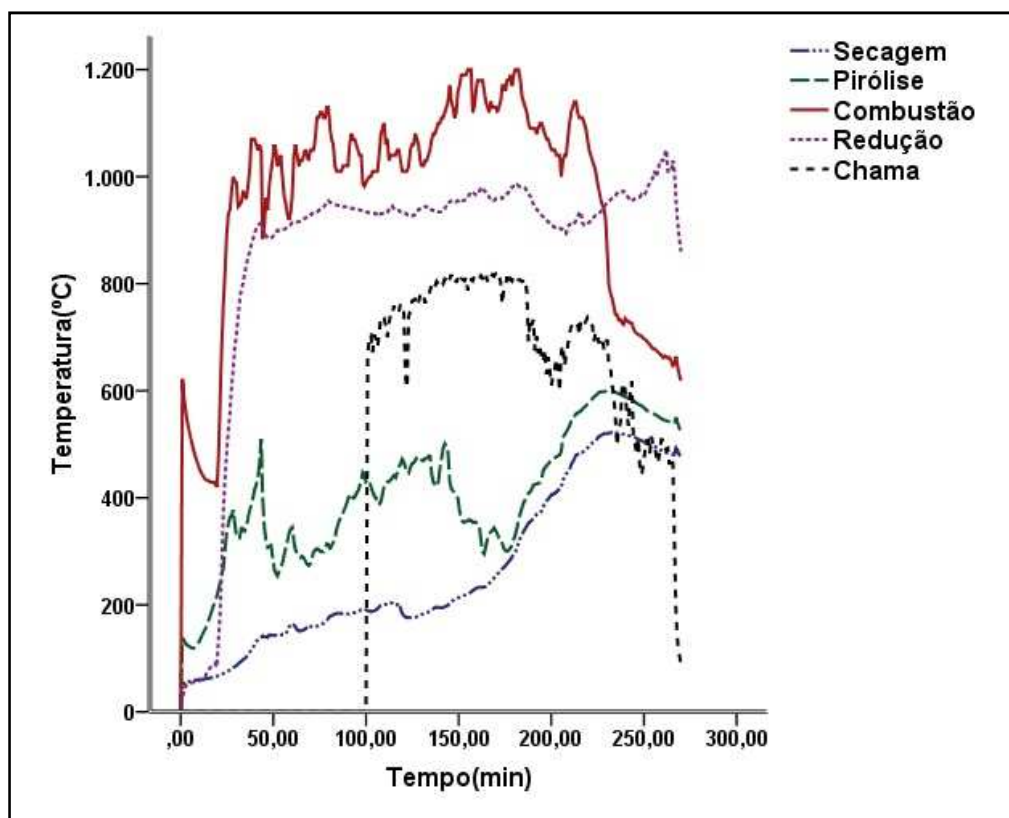


Figura 4.3 - Variação das temperaturas nas zonas de secagem, de pirólise, de combustão e de redução do gaseificador e da chama no teste 02.

O processo de gaseificação ocorreu de forma estável, e as temperaturas nas diversas zonas do gaseificador se mantiveram nas faixas estabelecidas na literatura, referidas nos aportes teóricos.

Para colher elementos que subsidiassem a construção do SLF, foram estudados os efeitos das cinco frequências do sistema de ventilação nas temperaturas na zona de combustão da gaseificação e da chama, utilizando-se a análise de variância (ANOVA).

Os resultados da ANOVA indicaram a existência de diferenças significativas entre as temperaturas médias na zona de combustão da gaseificação e as temperaturas médias da chama, para as respectivas frequências do sistema de ventilação.

As temperaturas médias na zona de combustão do gaseificador, para cada frequência, foram comparadas utilizando-se o teste de Tukey, em nível de 5% de significância. O resultado do teste é apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Resultado do teste de Tukey para a variável temperatura na zona de combustão do gaseificador

Frequência	Nº de amostras	Grupos para significância = 0.05	
		1	2
50 Hz	28	1038,36	
45 Hz	31	1044,19	
40 Hz	57	1047,42	
60 Hz	46		1105,91
55 Hz	49		1111,08
Sig.		0,955	0,994

O teste de Tukey separou as temperaturas médias em dois grupos. As temperaturas dentro do mesmo grupo não diferiram estatisticamente umas das outras, mas entre os grupos diferentes, sim.

Com base nos resultados do teste, pode-se afirmar que, para as frequências 40, 45 e 50 Hz, não se observou diferença significativa entre as temperaturas médias na zona de combustão do gaseificador.

Quando as frequências variaram para 55 Hz ou 60 Hz, ocorreu diferença significativa entre as temperaturas médias. Na Figura 4.4. estão plotadas as temperaturas médias de combustão em função da frequência.

Esses resultados permitem observar a relação direta entre o aumento da massa de ar na gaseificação e o aumento da *temperatura na zona de combustão do gaseificador*, desde que sejam considerados os limites de temperatura estabelecidos pela quantidade da massa de ar na gaseificação.

O resultado do teste de Tukey, em nível de 5% de significância, separou as temperaturas médias da chama em quatro grupos (não foram colhidos dados para a frequência de 50 Hz), como se vê na Tabela 4.4.

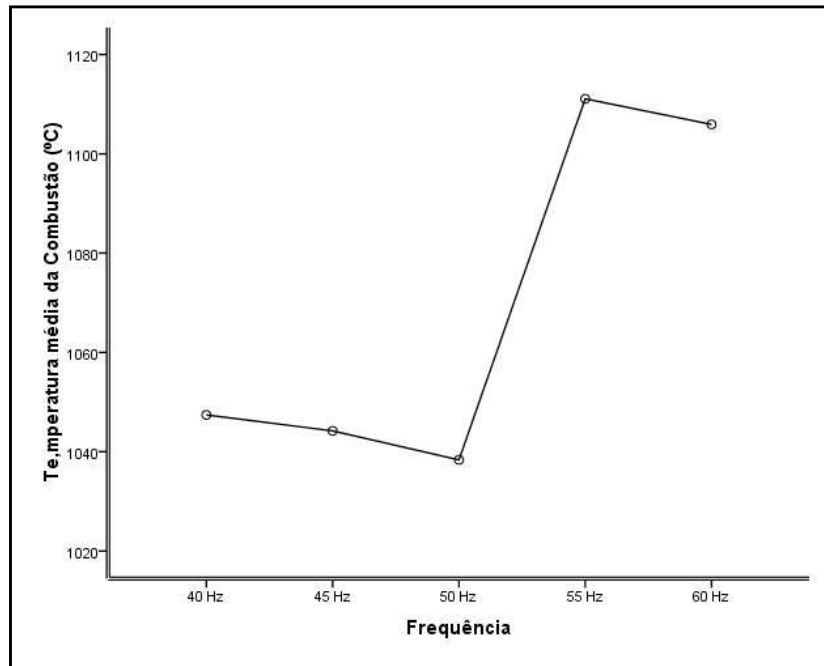


Figura 4.4 - Temperaturas médias na zona de combustão do gaseificador em função das frequências do inversor do sistema de ventilação.

Tabela 4.4 - Resultado do teste de Tukey para a variável temperatura da chama

Frequência	Nº de amostras	Grupos para significância = 0.05			
		1	2	3	4
40 Hz	32	671,91			
45 Hz	31		742,90		
55 Hz	50			770,02	
60 Hz	30				806,00
Sig.		1,000	1,000	1,000	1,000

As temperaturas médias da chama diferiram estatisticamente nos quatro grupos, permitindo concluir que, à medida que a frequência do sistema de ventilação aumenta, a temperatura da chama também aumenta, como pode ser observado na Figura 4.5.

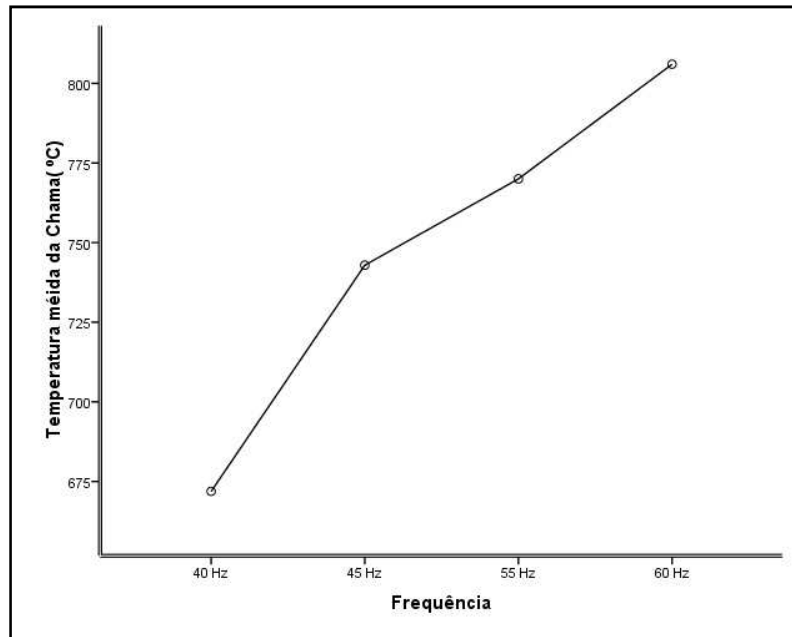


Figura 4.5 - Temperaturas médias da chama em função das frequências do inversor do sistema de ventilação.

4.2. Controle do sistema de ventilação do gaseificador/combustor

Para avaliar a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy em controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e a *temperatura do ar quente de exaustão* no conjunto gaseificador/combustor, foram feitos quatro testes (02, 03, 04 e 05). Nos testes 03, 04 e 05, o gás produzido no gaseificador foi queimado no combustor dentro de um dispositivo cilíndrico, com o objetivo de observar a sua influência no controle da *temperatura do ar quente de exaustão* e na concentração de CO e CO₂ no ar quente de exaustão.

4.2.1. Teste 02

No teste 02, o gaseificador não se encontrava conectado ao combustor, e avaliou-se a eficiência do SLF para controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador*. Foi utilizado como combustível o carvão vegetal, cujos parâmetros estão especificados na Tabela 4.3.

Foram usados quatro termopares conectados à placa de aquisição de dados e acondicionados nas zonas de secagem, pirolise combustão e redução do gaseificador. O

inversor de frequência foi ligado ao motor do sistema de ventilação, e a placa de aquisição de dados, conectada ao computador em que foi instalado o algoritmo de controle.

Após a ignição da biomassa, o sistema de ventilação foi ligado, manualmente, e o inversor permaneceu na frequência de 50 Hz até o início do processo de gaseificação, que ocorreu em cerca de 10 minutos.

A partir desse instante, o sistema de controle foi acionado, e o SP da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* foi estabelecido em 1000°C. Esse valor foi escolhido tendo como referência as temperaturas obtidas nos testes preliminares com o gaseificador.

O processo de gaseificação durou 5h45min, sendo o gás produzido, por medida de segurança, queimado na saída do gaseificador. A gaseificação ocorreu de forma estável durante todo o período.

Foram coletadas 553 amostras das temperaturas nas diversas zonas do gaseificador. As medidas estatísticas dessas temperaturas foram calculadas, e os resultados estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Medidas estatísticas das temperaturas nas diversas zonas de gaseificação

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Secagem	94,78	510,78	230,85	112,72	49,01
Pirólise	161,84	558,81	259,43	124,28	47,98
Combustão	652,45	1135,52	1032,92	34,20	3,31
Redução	546,23	1004,48	877,05	31,53	3,60

Observa-se, na Tabela 4.5, que os coeficientes de variação das temperaturas na zona de combustão e na de redução do gaseificador foram baixos, indicando que essas temperaturas se mantiveram estáveis e próximas aos seus valores médios durante o processo de gaseificação. As temperaturas da zona de pirólise e de secagem do

gaseificador apresentaram uma variabilidade muito alta (acima de 30%), como pode ser observado pelos valores dos coeficientes de variação.

As temperaturas medidas nas diversas zonas do gaseificador e ambiente foram plotados na Figura 4.6.

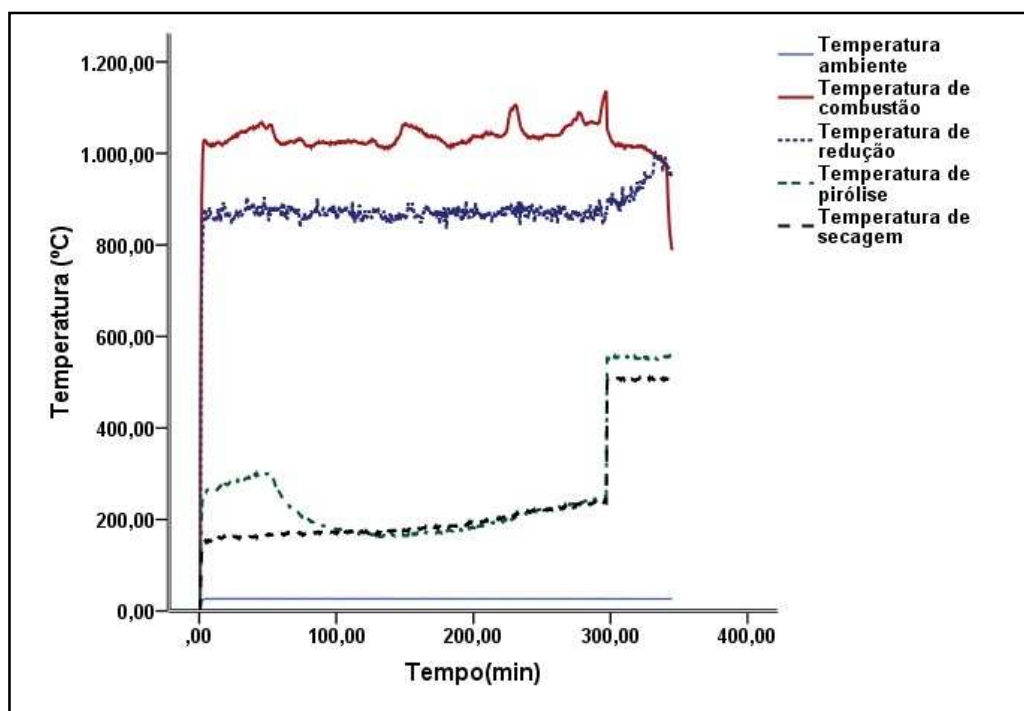


Figura 4.6 - Variação das temperaturas nas zonas de combustão, redução, pirólise, secagem do gaseificador e ambiente coletadas no teste.

Observa-se, na Figura 4.6, que as temperaturas nas zonas de combustão e redução do gaseificador se mantiveram, aproximadamente, estáveis durante a gaseificação, confirmando o que foi observado na Tabela 4.5. Somente no final do processo é que ocorreram variações mais acentuadas: a temperatura na zona de combustão iniciou um processo de queda e a de redução, de aumento. Esse fato ocorreu por não ter havido a recarga do gaseificador durante o teste. À medida que a biomassa era consumida, reduzia-se a altura da biomassa na zona de combustão do reator, até ficar vazia, não sendo mais possível controlar a temperatura nessa zona.

As variações das temperaturas nas zonas de secagem e pirólise foram mais acentuadas, pois ficaram sem a biomassa antes das zonas de combustão e redução.

Como o objetivo foi avaliar a eficiência do SLF, foram descartados os *outliers* dos dados da *temperatura na zona de combustão do gaseificador*: as temperaturas

inferiores a 981°C e superiores 1086°C. Em seguida, calcularam-se as medidas estatísticas dessa temperatura, os resultados estão na Tabela 4.6.

Tabela 4.6 - Medidas estatísticas da temperatura na zona de combustão do gaseificador após descarte dos *outliers*

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Combustão	981,19	1084,30	1033,34	18,21	1,76

Analisando as medidas estatísticas da Tabela 4.6, observa-se que a temperatura na zona de combustão estabilizou-se próximo a sua média, 1033,34°C, pois o coeficiente de variação foi baixo, 1,76%. O erro entre a temperatura média na zona de combustão e o SP foi de 3,3%, um pouco maior do que a faixa de erro estabelecida no SLF, que foi de 2%, mostrando que essa temperatura se manteve próxima ao SP durante o período de gaseificação. Essa inferência pode ser observada Figura 4.7, em que foram plotados a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e o SP, após descarte dos *outliers*.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média na zona de combustão do gaseificador e o SP, foi utilizado o teste de *t*, em nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade.

As análises estatísticas conduziram ao seguinte resultado: o SLF manteve a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* num valor próximo ao SP, mas não igual a ele.

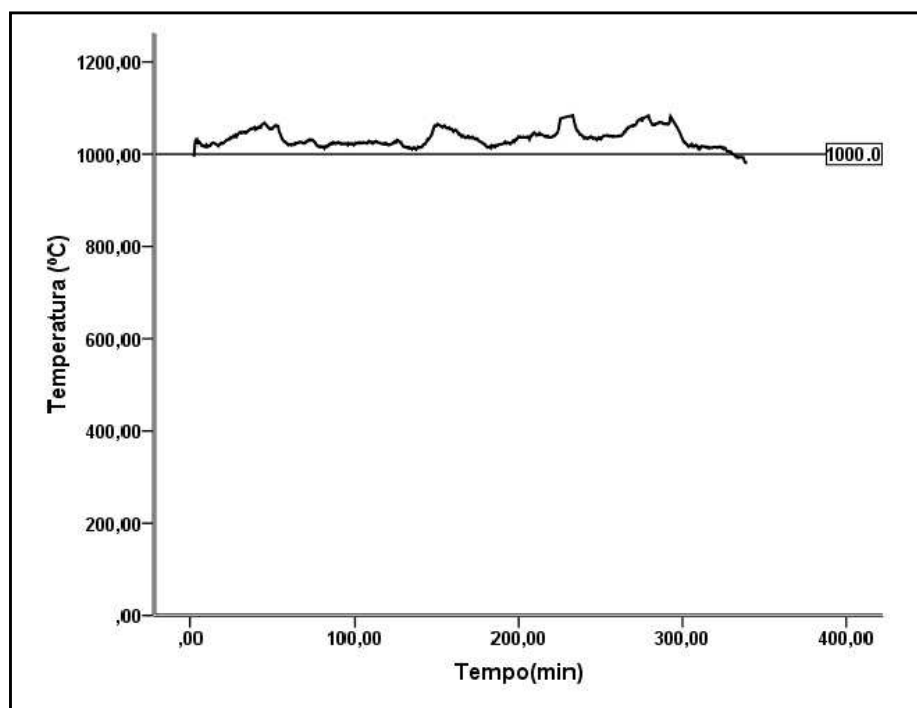


Figura 4.7 - Variação da temperatura na zona de combustão do gaseificador e o SP, após o descarte dos *outliers*.

4.2.2. Teste 03

A partir do teste 03 o gaseificador foi conectado ao combustor formando o conjunto gaseificador/combustor. No teste avaliaram-se a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy em manter a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e a *temperatura do ar quente de exaustão* do conjunto gaseificador/combustor em valores pretendidos. Nesse teste, foram localizados três termopares: um na zona de combustão do gaseificador, um na região da queima do gás e um no duto de saída do ar de exaustão. O combustível foi o carvão vegetal, cujos parâmetros estão descritos na Tabela 4.3.

Após a ignição, os sistemas de ventilação e exaustão foram ligados, manualmente, e os inversores permaneceram na frequência de 50 Hz, até o início do processo de gaseificação, que ocorreu em cerca de 20 minutos. A gaseificação se manteve estável durante 5h20min, sendo coletadas 523 amostras das temperaturas na zona de combustão, na região da queima do gás, da exaustão do ar quente e do ar ambiente.

As medidas estatísticas dessas temperaturas foram calculadas e estão na Tabela 4.7.

Tabela 4.7 - Medidas estatísticas das diversas temperaturas coletadas durante o teste

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Ambiente	13,91	14,94	14,50	0,21	1,35
Combustão	684,28	1094,90	1005,57	91,03	9,05
Exaustão	47,53	79,90	58,43	6,14	10,51
Queima do gás	219,65	450,21	387,83	46,61	12,02

Analisando as medidas estatísticas das temperaturas na Tabela 4.7, observou-se que a variabilidade da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* foi baixa e que os valores das temperaturas do ar quente de exaustão e da região da queima do gás foi média, como indicaram os respectivos coeficientes de variação na Tabela 4.10.

As temperaturas nas diversas regiões do conjunto gaseificador/combustor coletadas durante o teste foram plotadas na Figura 4.8.

A queda acentuada da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* no final do processo, observada na Figura 4.8, ocorreu quando não havia mais biomassa na zona de combustão do gaseificador. Mesmo que o inversor do sistema de ventilação trabalhasse na frequência máxima estabelecida no SLF, aumentado a massa de ar na gaseificação, não seria possível reverter a tendência de queda dessa temperatura, o que justifica o descarte dos *outliers* na análise de eficiência do SLF.

O objetivo do teste foi avaliar a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy para controlar a temperatura na zona de combustão do gaseificador em 1050°C e a temperatura do ar quente de exaustão em 60°C. Foram descartados os *outliers* da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* inferiores a 900°C, e os da temperatura do ar quente de exaustão inferiores a 43°C e superiores a 71°C.

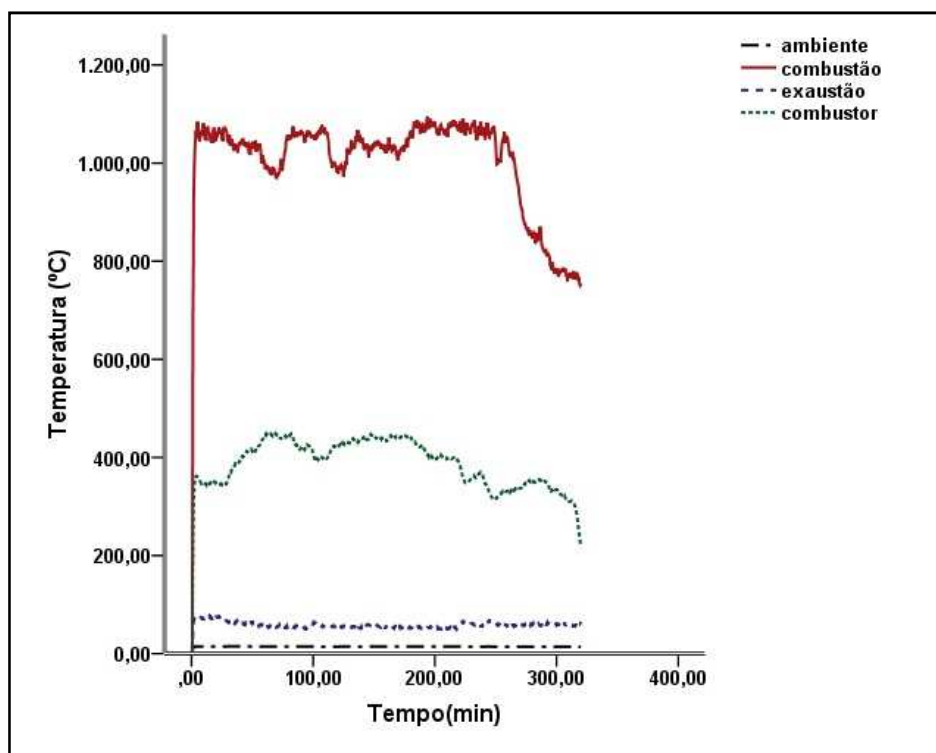


Figura 4.8 - Variação das temperaturas ambiente, na zona combustão do gaseificador, do ar quente da exaustão e na região da queima do gás no combustor coletadas durante o teste 04.

Após o descarte dos *outliers*, foram calculadas as medidas estatísticas dessas temperaturas, demonstradas na Tabela 4.8.

Tabela 4.8 - Medidas estatísticas da temperatura na zona de combustão do gaseificador e da temperatura do ar quente de exaustão após descarte dos *outliers*

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Combustão	906,40	1094,90	1041,54	31,88	3,06
Exaustão	47,53	70,64	57,13	4,22	7,38

Analisando as medidas estatísticas da Tabela 4.8, observou-se que a temperatura na zona de combustão do gaseificador estabilizou-se próximo a sua média, 1041,54°C, pois o coeficiente de variação foi baixo, 3,06%. O erro entre a temperatura média na zona de combustão do gaseificador e o SP foi de 0,85%, que está dentro da faixa de erro de 1,9% estabelecida no SLF, indicando que essa temperatura foi controlada no SP durante o período de gaseificação, o que pode ser observado na Figura 4.9.

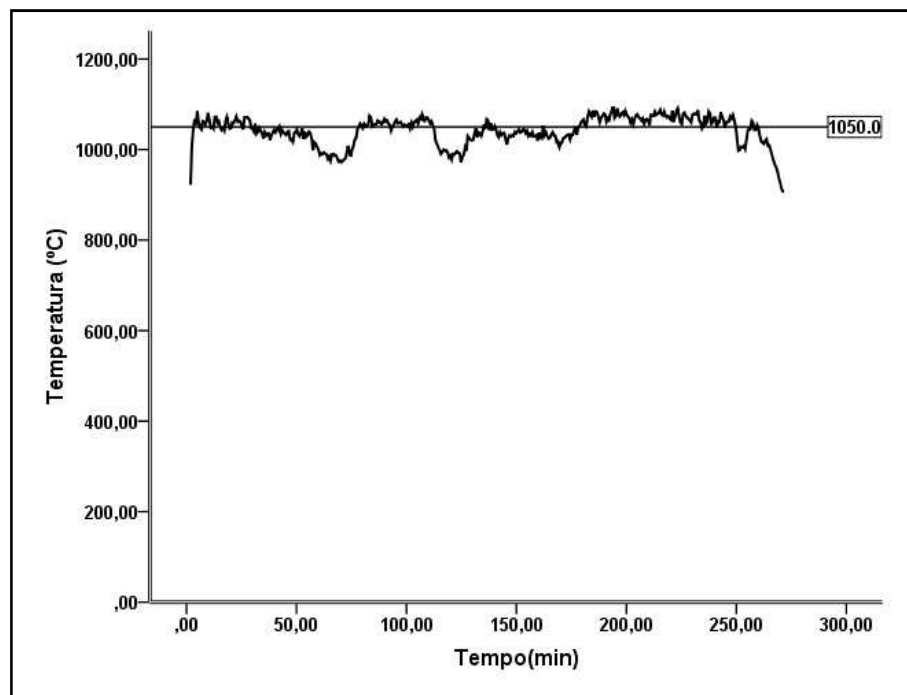


Figura 4.9 - Variação da temperatura na zona combustão do gaseificador e o SP após o descarte dos *outliers*.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média na zona de combustão e o SP, foi utilizado o teste de *t*, em nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve aceitar a hipótese de igualdade.

As análises estatísticas conduziram ao seguinte resultado: o SLF manteve a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* num valor igual ao SP.

Analisando as medidas estatísticas da Tabela 4.8, observa-se que a temperatura média do ar quente de exaustão ficou próxima ao SP, pois o coeficiente de variação foi baixo, 7,38%. O erro entre a *temperatura do ar quente de exaustão* e o SP foi de 4,78%, inferior ao particionamento do erro estabelecido no SLF. Com essas informações, é

possível afirmar que a *temperatura do ar quente de exaustão* permaneceu estável e próxima ao SP, como observado na Figura 4.10.

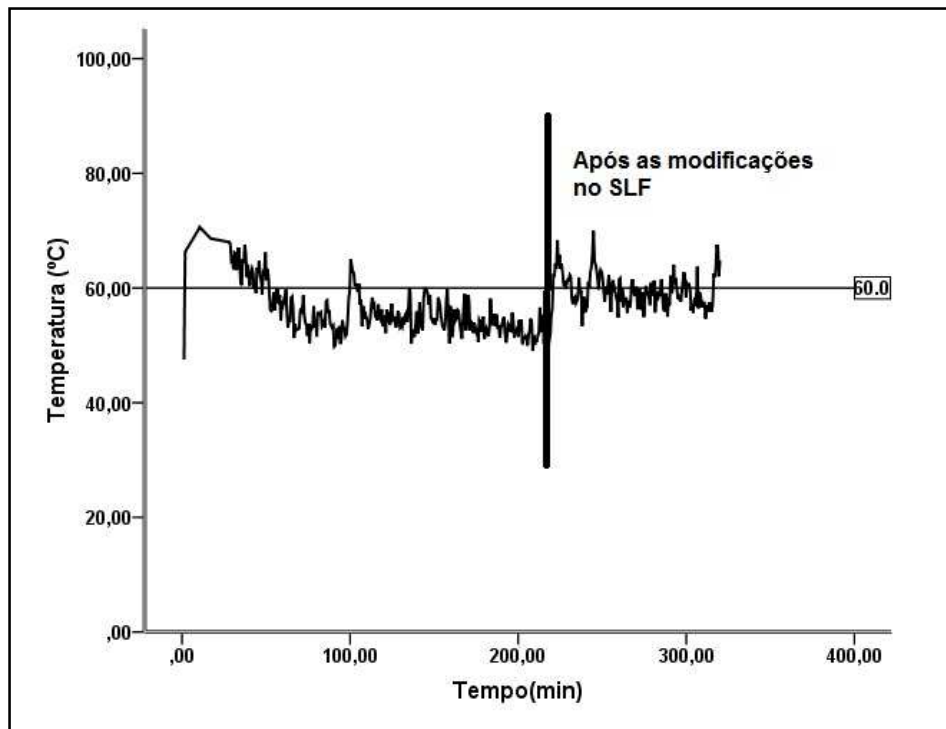


Figura 4.10 - Variação da temperatura do ar quente de exaustão comparados ao SP, antes e depois das modificações no SLF.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média de exaustão e o SP, foi utilizado o teste de t , ao nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade.

As análises estatísticas conduziram ao seguinte resultado: o SLF manteve a temperatura na zona de combustão da gaseificação estável e próxima ao SP.

4.2.2.1. Considerações sobre o controle da temperatura do ar quente de exaustão

- 1) Quando as três entradas de ar da região de mistura do ar quente com o ar frio estavam abertas, a *temperatura do ar quente de exaustão* permanecia inferior ao SP, mesmo com o motor do sistema de exaustão trabalhando em baixa frequência (próxima de 37 Hz);

2) Quando duas entradas de ar estavam fechadas, a *temperatura do ar quente de exaustão* subia e ultrapassava o SP, mesmo com o motor do sistema de exaustão trabalhando em frequência máxima, próxima de 60 Hz.

Essas observações sugeriram que modificações deveriam ser feitas no SLF que controlava a *temperatura do ar quente de exaustão* na tentativa de melhorar a sua eficiência. Com o teste em andamento, foram feitas as seguintes alterações:

- 1) O conjunto fuzzy pequeno da variável “*erro*” teve os seus parâmetros alterados de [-10, 0, 10] para [-5, 0, 5], mantendo-se o mesmo tipo de função;
- 2) Os parâmetros dos conjuntos fuzzy da variável “*frequencia*” foram alterados para [5, 25, 50]; [30, 55, 80] e [50, 60, 100], mantendo-se os mesmos tipos de funções fuzzy;
- 3) Uma das regras fuzzy foi alterada para: *se erro é grandeN e variacaotemp é negativo, então frequencia é alta.*

Após as modificações, mantidas abertas duas entradas de ar ambiente, foi possível observar:

- 1) Com as alterações nos parâmetros do conjunto fuzzy *pequeno* da variável “*erro*”, houve redução da faixa na qual o SLF tenta manter a temperatura do ar de exaustão;
- 2) As alterações nos parâmetros dos conjuntos fuzzy da variável “*frequência*” conduziram: a uma redução da frequência mínima de trabalho do motor para 30 Hz: diminuiu a vazão do ar atmosférico quando havia a necessidade de aumentar a temperatura; e a um acréscimo no valor da frequência máxima de trabalho do motor para 66 Hz: aumentou a vazão do ar atmosférico quando havia a necessidade de reduzir a temperatura;
- 3) A alteração da regra possibilitou que o motor do sistema de ventilação trabalhasse numa faixa de frequência mais alta quando a temperatura estava muito acima do SP, facilitando a redução da temperatura.

As medidas estatísticas da variável *temperatura do ar quente de exaustão* foram calculadas após as modificações no SLF, e os resultados estão apresentados na Tabela 4.9.

É possível ver que reduziu a variabilidade dos dados da *temperatura do ar quente de exaustão*. A temperatura média ficou mais próxima ao SP, e o erro entre a temperatura média de exaustão e o SP foi de 1,90%, inferior ao particionamento do erro de 8,33% estabelecido no SLF para o respectivo SP.

Tabela 4.9 - Medidas estatísticas da temperatura do ar quente de exaustão após as modificações no SLF

Temperatura	Medidas estatísticas				Coeficiente de variação (%)
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	
Exaustão	48,96	69,96	58,86	3,60	6,11

Conclui-se que as modificações melhoraram a eficiência do SLF e mantiveram a *temperatura do ar quente de exaustão* no valor estabelecido, como observado na Figura 4.10.

4.2.3. Teste 04

No teste anterior as modificações no SLF que controla a *temperatura do ar quente de exaustão* melhoraram a sua eficiência. No entanto, as modificações ocorreram somente nos parâmetros dos conjuntos fuzzy. Neste teste, o quinto, outras alterações foram feitas para avaliar a possibilidade de melhorar a eficiência do SLF.

As variáveis permaneceram as mesmas (“*erro*”, “*variacaotemp*” e “*frequencia*”), mas os conjuntos fuzzy das variáveis “*erro*” e “*frequencia*” foram modificados.

A variável “*erro*” foi particionada em cinco conjuntos fuzzy: grande negativo (*grandeN*), médio negativo (*medioN*), *pequeno*, médio positivo (*medioP*) e grande positivo (*grandeP*), como mostram a Tabela 4.10 e a Figura 4.11.

A variável “*frequencia*” foi particionada em cinco conjuntos fuzzy: *muitobaixa*, *baixa*, *média*, *alta* e *muitoalta*, como mostram a Tabela 4.11 e a Figura 4.12.

Tabela 4.10 - Partições da variável “erro” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinências correspondentes

Conjuntos Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>grandeN</i>	[-100, -100, -35, -20]	Trapezoidal
<i>medioN</i>	[-35, -20, -5]	Triangular
<i>pequeno</i>	[-5, 0, 5]	Triangular
<i>medioP</i>	[5, 20, 35]	Triangular
<i>grandeP</i>	[20, 35 100, 100]	Trapezoidal

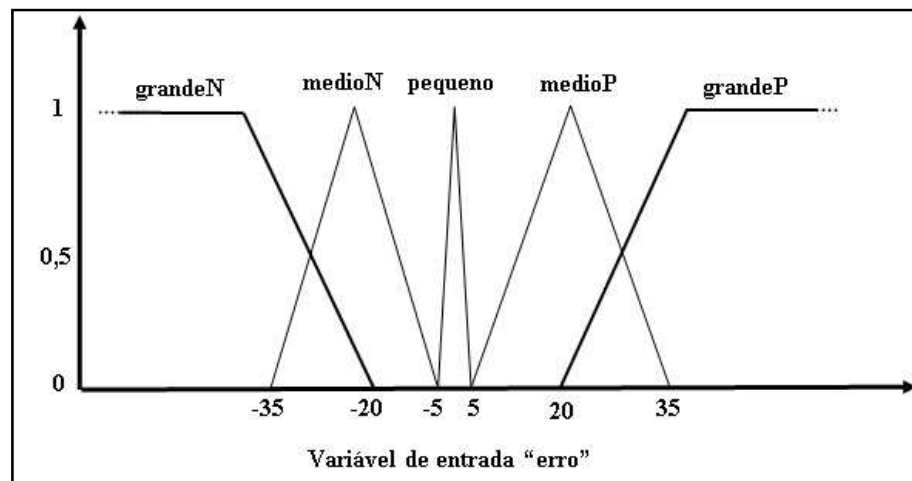


Figura 4.11 - Conjuntos fuzzy da variável “erro”.

Tabela 4.11 - Partições da variável “frequencia” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinências correspondentes

Conjunto Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>muito baixa</i>	[0,0 30]	Triangular
<i>baixa</i>	[10, 30, 50]	Triangular
<i>media</i>	[30, 50, 70]	Triangular
<i>alta</i>	[50, 70, 90]	Triangular
<i>muito alta</i>	[70, 100,100]	Triangular

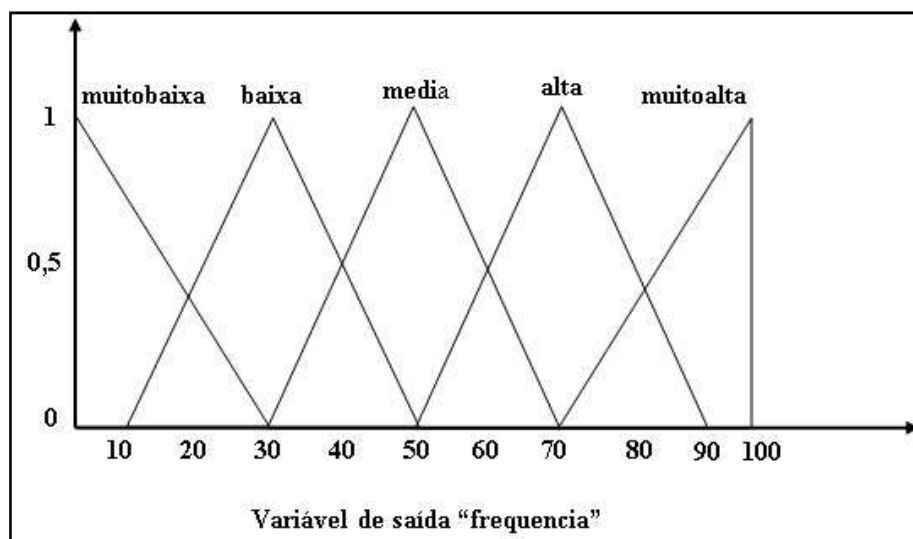


Figura 4.12 - Conjuntos fuzzy da variável “frequencia”.

O novo conjunto de regras fuzzy foi construído com 10 regras, por meio da combinação das duas variáveis de entrada. Os consequentes das regras foram definidos pelo conhecimento empírico: *quando aumenta a frequência do motor, a temperatura de exaustão diminui* (Tabela 4.12).

Tabela 4.12 - Novo conjunto de regras do Sistema Lógico Fuzzy

“erro”	“variacaotemp”	“frequencia”
<i>grandeN</i>	<i>Positivo</i>	<i>muitoalta</i>
<i>grandeN</i>	<i>Negativo</i>	<i>alta</i>
<i>medioN</i>	<i>Positivo</i>	<i>alta</i>
<i>medioN</i>	<i>Negativo</i>	<i>media</i>
<i>pequena</i>	<i>Positivo</i>	<i>baixa</i>
<i>pequena</i>	<i>Negativo</i>	<i>baixa</i>
<i>medioP</i>	<i>Positivo</i>	<i>media</i>
<i>medioP</i>	<i>Negativo</i>	<i>baixa</i>
<i>grandeP</i>	<i>Positivo</i>	<i>media</i>
<i>grandeP</i>	<i>Negativo</i>	<i>muito baixa</i>

Essas alterações produziram um refinamento da resposta do sistema de ventilação. Ao serem criados os conjuntos fuzzy *medioN* e *medioP* para a variável “erro”, e *muitobaixo* e *muitoalto* para a variável “frequencia”, o sistema de ventilação respondeu de forma mais suave à aproximação com o SP.

O combustível utilizado no teste foi o carvão vegetal, com os parâmetros descritos na Tabela 4.3. Após a ignição, os dois sistemas de ventilação foram ligados, manualmente, e os inversores permaneceram na frequência de 50 Hz, até o início do processo de gaseificação, que ocorreu em cerca de 20 minutos.

A gaseificação permaneceu estável por um período de 5h20min. Durante o teste foram coletadas 701 amostras das temperaturas: ambiente, na zona de combustão do gaseificador, na exaustão do ar quente e na região de queima do gás.

O objetivo do teste foi estabilizar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* em 1100°C e a *temperatura do ar quente de exaustão* em 60°C. Esses valores foram estabelecidos como SP dos Sistemas Lógicos Fuzzy.

Foram descartados os *outliers* da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* inferiores a 982°C e superiores a 1197°C, e os da *temperatura do ar quente de exaustão* inferiores a 50°C e superiores a 63°C. Após o descarte dos *outliers*, as medidas estatísticas dessas temperaturas foram calculadas, e os seus valores estão na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 - Medidas estatísticas das diversas temperaturas coletadas no teste 05

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Ambiente	24,17	26,50	25,58	0,59	2,31
Combustão	983,60	1186	1107,39	42,45	3,83
Exaustão	50,00	63,00	56,86	2,40	4,22
Queima do gás	255,48	366,09	327,65	21,26	6,49

As temperaturas coletadas durante o teste foram plotados na Figura 4.13.

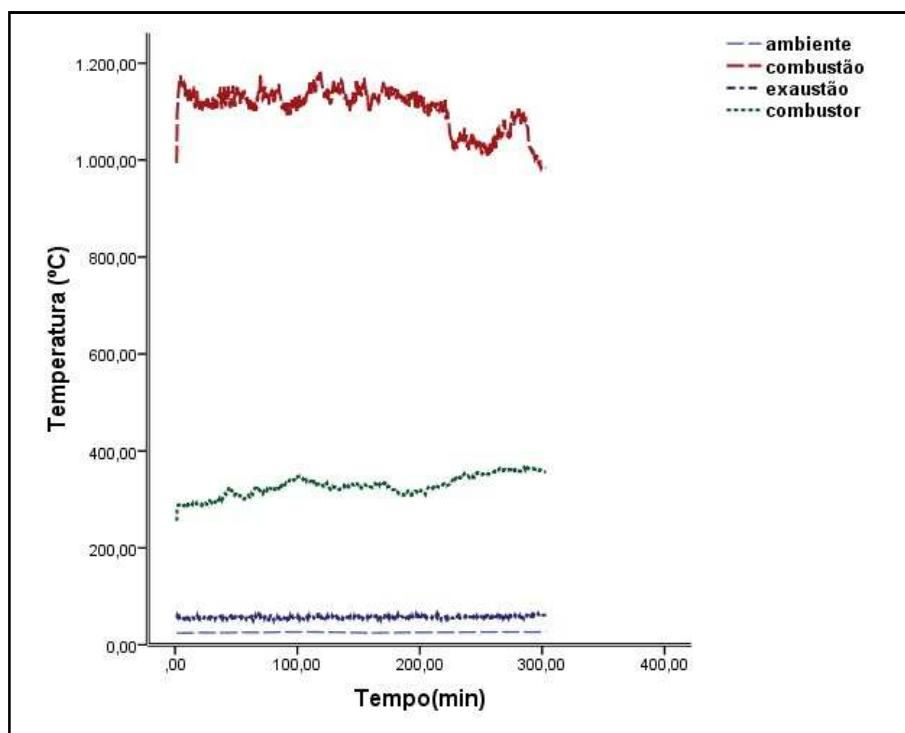


Figura 4.13 - Variação das temperaturas ambiente, na zona combustão do gaseificador, do ar quente da exaustão e na região da queima do gás no combustor coletadas no teste 05.

Analisando as medidas estatísticas da Tabela 4.13, pode-se afirmar que a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* se estabilizou próxima ao seu valor médio (1107,39°C), pois o coeficiente de variação foi baixo, 3,83%. O erro entre a temperatura média e o SP foi de 0,67%, menor que particionamento do erro de 1,82% estabelecido no SLF para o respectivo SP.

Com essas informações, é possível afirmar que a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* permaneceu estável e próxima do SP, como observado Figura 4.14.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média na zona de combustão e o SP, foi utilizado o teste de *t*, em nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade.

A análise estatística permitiu afirmar que o SLF manteve a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* muito próxima ao SP, mas não igual a ele.

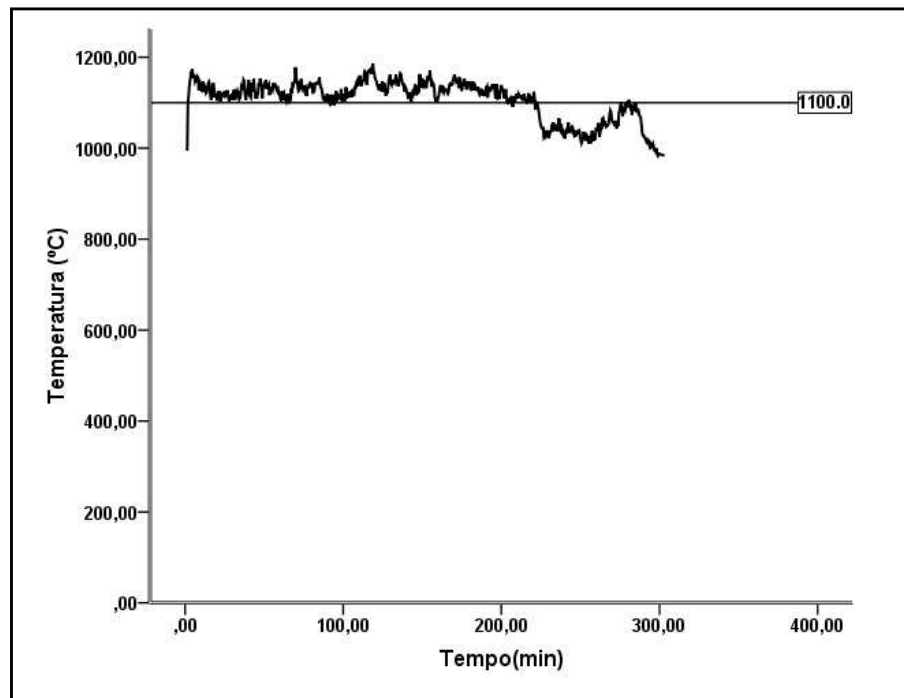


Figura 4.14 - Variação da temperatura na zona combustão do gaseificador e o SP.

Entende-se, com base no teste de t , que se numa série de dados a variabilidade é muito pequena, diminui a probabilidade de que o teste de t aceite a hipótese de igualdade entre duas médias, o que torna o teste mais rigoroso quanto à hipótese. Observe-se que esse fato ocorreu com os dados da *temperatura na zona de combustão do gaseificador*: mesmo com um coeficiente de variação muito pequeno (3,83%) e um erro mínimo (0,67%) entre a temperatura média na zona de combustão e o SP, o teste de t não confirmou a hipótese de igualdade entre as médias.

Analisando as medidas estatísticas da *temperatura do ar quente exaustão* (Tabela 4.13), observa-se que ela se estabilizou em um valor próximo ao da média (56,86°C), pois o coeficiente de variação, 4,22%, foi baixo. O erro entre a temperatura média do ar quente de exaustão e o SP foi de 5,23%, menor que o particionamento do erro de 8,33% estabelecido no SLF para o respectivo SP.

Com base nessas informações, pode-se afirmar que a *temperatura do ar quente de exaustão* se manteve estável durante o teste, com um valor muito próximo ao SP, como pode ser observado na Figura 4.15.

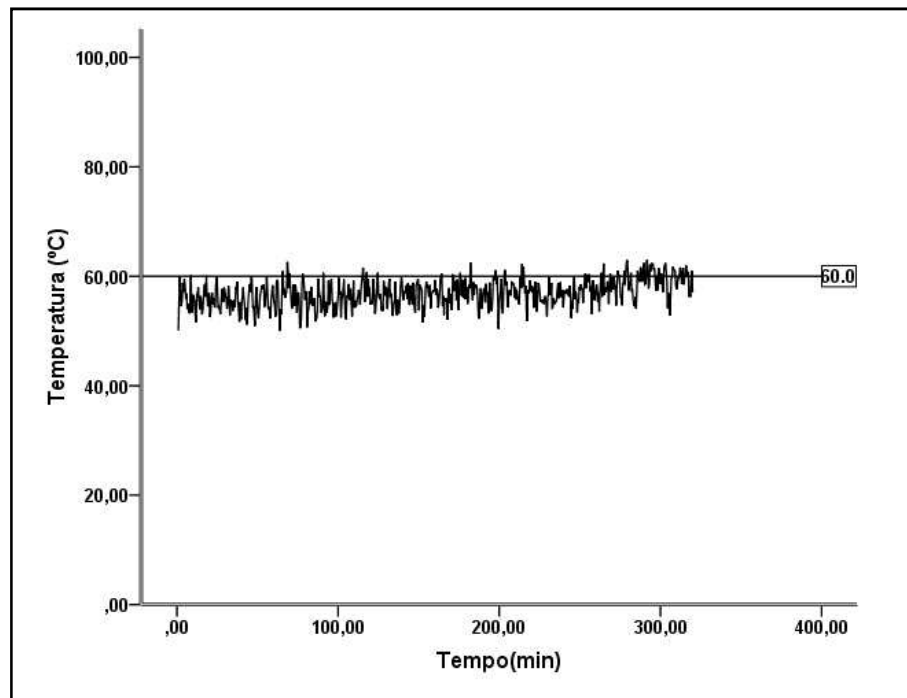


Figura 4.15 - Variação da temperatura do ar quente de exaustão e SP.

Para testar a hipótese de igualdade entre temperatura média de exaustão e o SP, foi utilizado o teste de t , ao nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade.

Os resultados estatísticos permitem afirmar que o SLF manteve a temperatura de exaustão muito próxima ao SP.

Se comparado com o teste anterior, o teste 04 mostra que não há evidências de que as alterações no SLF tenham melhorado ou piorado a sua eficiência para controlar a *temperatura do ar quente de exaustão*. No entanto, elas serão mantidas nos próximos testes.

4.2.4. Teste 05

Nos testes anteriores, o SLF desenvolvido para controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* respondeu adequadamente ao objetivo de mantê-la próxima ao SP. No entanto, outras modificações foram feitas para avaliar a possibilidade melhorar sua eficiência.

No teste 05, os conjuntos fuzzy foram os mesmos utilizados no teste 04 para controlar a *temperatura do ar quente de exaustão*, modificando-se, apenas, os parâmetros da variável “erro” e o conjunto de regras fuzzy, como mostram as Tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14 - Partições da variável “erro” nos respectivos conjuntos fuzzy, com parâmetros e funções de pertinências correspondentes

Conjuntos Fuzzy	Parâmetros	Funções de pertinência
<i>grandeN</i>	[-1200, -1200, -500, -240]	Trapezoidal
<i>medioN</i>	[-500, -240, -20]	Triangular
<i>pequeno</i>	[-20, 0, 20]	Triangular
<i>medioP</i>	[20, 240, 500]	Triangular
<i>grandeP</i>	[240, 500, 1200, 1200]	Trapezoidal

Tabela 4.15 - Conjunto de regras do novo Sistema Lógico Fuzzy

“erro”	“variacaotemp”	“frequencia”
<i>gandeN</i>	<i>positivo</i>	<i>muitobaixa</i>
<i>grandeN</i>	<i>negativo</i>	<i>baixa</i>
<i>medioN</i>	<i>positivo</i>	<i>baixa</i>
<i>medioN</i>	<i>negativo</i>	<i>media</i>
<i>pequena</i>	<i>positivo</i>	<i>baixa</i>
<i>pequena</i>	<i>negativo</i>	<i>baixa</i>
<i>medioP</i>	<i>positivo</i>	<i>media</i>
<i>medioP</i>	<i>negativo</i>	<i>alta</i>
<i>grandeP</i>	<i>positivo</i>	<i>alta</i>
<i>grandeP</i>	<i>negativo</i>	<i>muitoalta</i>

O combustível utilizado no teste foi os chips de eucalipto, com os parâmetros descritos na Tabela 4.3.

Após a ignição do gaseificador, os dois sistemas de ventilação foram ligados, manualmente, e os inversores permaneceram na frequência de 50 Hz, até o início do processo de gaseificação, que ocorreu em 15 minutos.

A gaseificação permaneceu estável durante 1h25min, sendo coletadas 189 amostras das temperaturas na zona de combustão, do ar de exaustão, na região da queima do gás e a ambiente.

As medidas estatísticas dessas temperaturas foram calculadas e estão na Tabela 4.16.

Tabela 4.16 - Medidas estatísticas das diversas temperaturas

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Ambiente	25,66	26,96	26,34	0,31	1,17
Combustão	455,70	705,32	650,79	18,35	2,81
Exaustão	49,85	67,56	56,58	3,85	6,80
Queima do gás	365,27	608,67	546,54	21,26	3,88

Observa-se na Tabela 4.16 que os coeficientes de variação foram baixos, o que indica a estabilidade das temperaturas, como visto na Figura 4.16.

O objetivo do teste foi controlar a temperatura de combustão em 650°C e a temperatura de exaustão em 60°C.

Para avaliar os Sistemas Lógicos Fuzzy foram descartados os *outliers* da temperatura na zona de combustão do gaseificador inferiores a 620°C e superiores a 683°C; e os da temperatura do ar quente de exaustão inferiores a 44°C e superiores a 67°C. As medidas estatísticas dessas temperaturas, após o descarte dos *outliers*, foram calculadas e estão na Tabela 4.17.

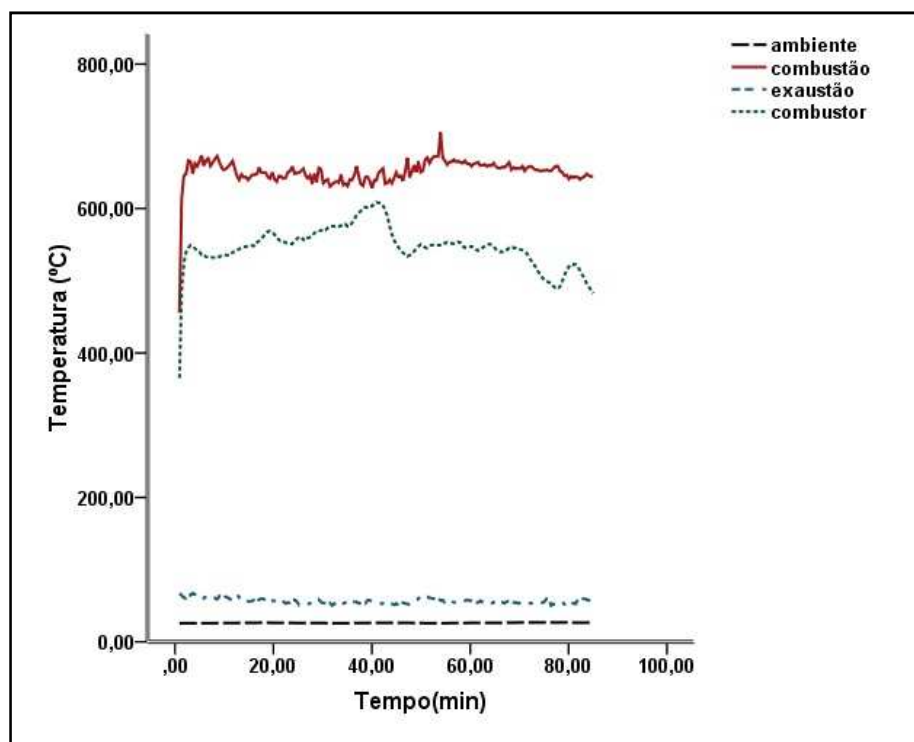


Figura 4.16 - Variação das temperaturas ambiente, na zona combustão do gaseificador, do ar quente da exaustão e na região da queima do gás no combustor coletadas durante o teste 06.

Tabela 4.17 - Medidas estatísticas das temperaturas na zona de combustão do gaseificador e no ar quente de exaustão após o descarte dos *outliers*

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Combustão	627,95	673,20	651,75	10,50	1,61
Exaustão	49,65	66,19	56,46	3,71	6,57

Analisando as medidas estatísticas da Tabela 4.17, observa-se que a *temperatura da zona combustão do gaseificador* se estabilizou próxima ao seu valor médio (651,75°C), pois o coeficiente de variação foi baixo, 1,61%. O erro entre a temperatura média e o SP foi de 0,00%, inferior ao particionamento do erro de 3,08% definido no SLF para o respectivo SP. Com essas informações, pode-se afirmar que a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* durante o teste se manteve estável e próxima ao SP, como pode ser observado na Figura 4.17.

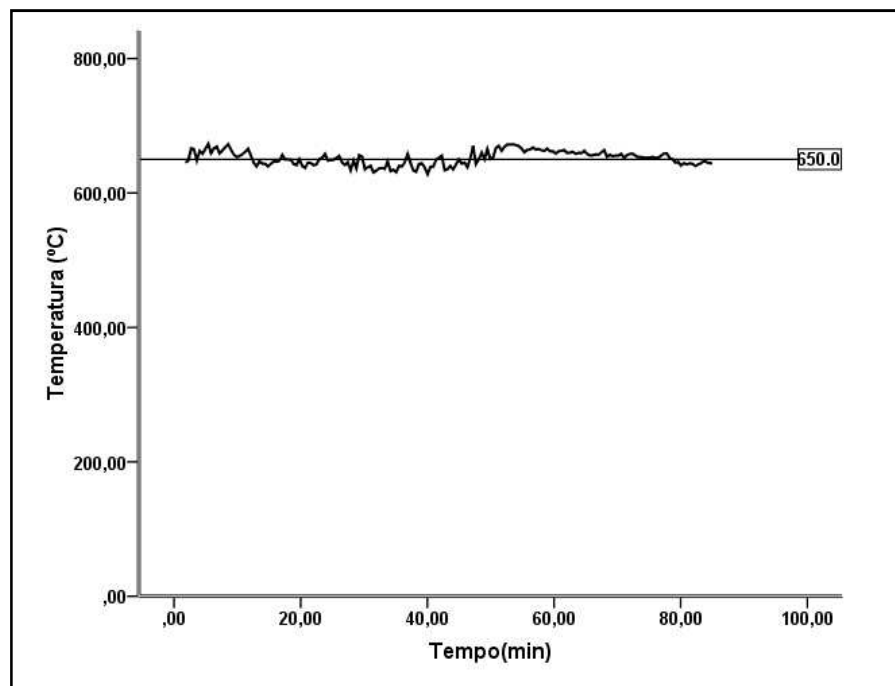


Figura 4.17 - Variação da temperatura na zona de combustão do gaseificador e o respectivo SP durante o teste 06.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média na zona de combustão do gaseificador e o SP, fez-se o teste de t , ao nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve aceitar a hipótese de igualdade.

Analisando os resultados estatísticos é possível afirmar que o SLF manteve a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* estável e igual ao SP, e as modificações contribuíram para melhorar a eficiência do SLF em manter a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* no SP.

Analisando as medidas estatísticas na Tabela 4.17, observa-se que a *temperatura do ar quente exaustão* se estabilizou próxima a sua média, pois o

coeficiente de variação foi baixo, 6,57%. O erro entre a temperatura de exaustão e o SP foi de 5,90%, inferior ao particionamento do erro de 8,33% estabelecido no SLF para o respectivo SP.

Com essas informações, pode-se afirmar que a *temperatura do ar quente de exaustão* durante o teste se manteve estável e próxima ao SP, como pode ser observado na Figura 4.18.

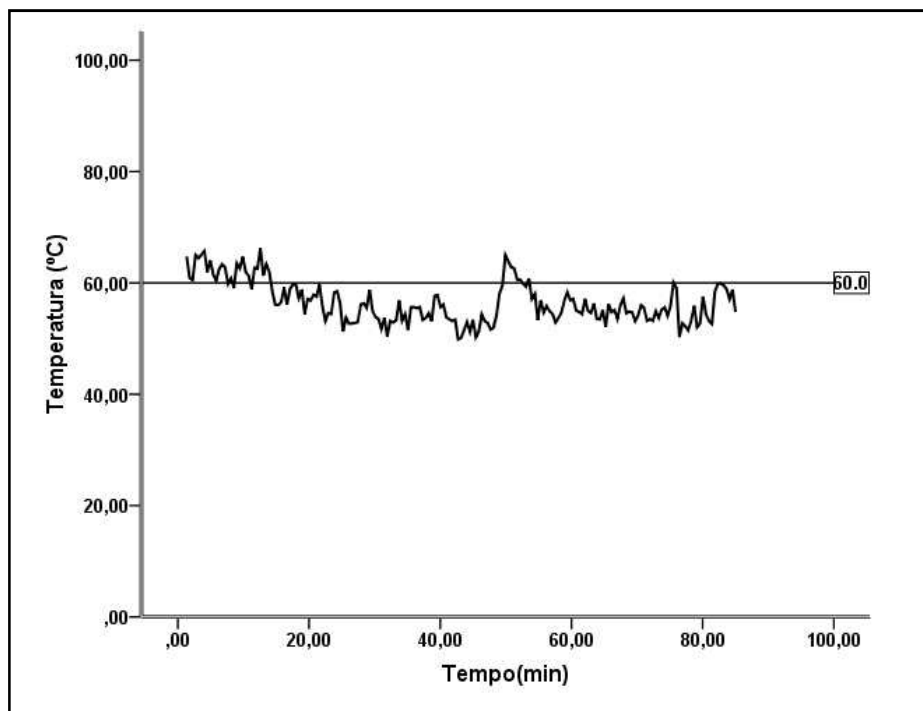


Figura 4.18 - Variação da temperatura do ar quente de exaustão e o SP durante o teste 06.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média de exaustão e o SP, aplicou-se o teste de t , em nível de 95% de confiança. O resultado indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade.

Os resultados estatísticos conduziram à seguinte conclusão: o SLF manteve a temperatura do ar quente de exaustão estável, em um valor próximo ao SP.

4.2.4.1. Considerações sobre os testes 02, 03, 04 e 05

Nos testes de 02 a 05, foram ajustados os parâmetros dos Sistemas Lógicos Fuzzy com o objetivo de aprimorar a sua eficiência em manter as temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão em valores estabelecidos.

Observou-se, com os resultados dos testes, que o SLF controlador da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* foi mais eficiente do que o controlador da *temperatura do ar quente de exaustão*. Controlar o ambiente interno do gaseificador é mais fácil, pois as interferências na *temperatura da zona de combustão do gaseificador* ocorrem devido aos seguintes fatores: tipo de gaseificador, características do combustível e quantidade de ar na gaseificação.

No combustor, algumas variáveis não controláveis e externas ao processo, tais como temperatura ambiente, velocidade e umidade do ar, interferem na eficiência do SLF. Outro fator que também dificultou o controle da *temperatura do ar quente de exaustão* foi a ausência de um dispositivo para regular as entradas do ar ambiente.

4.3. Desestabilização da temperatura na zona de combustão do gaseificador

Após os testes para ajustar os parâmetros e analisar a eficiência dos dois Sistemas Lógicos Fuzzy, foram feitos mais dois testes, o 06 e o 07. O objetivo de cada um desses testes foi avaliar as respostas dos Sistemas Lógicos Fuzzy à instabilidade da *temperatura na zona de combustão do gaseificador*, provocada pela utilização, no mesmo teste, de mais de um tipo de combustível acondicionado dentro do reator, em camadas.

Nos dois testes, o dispositivo cilíndrico para queima do gás foi removido. Observou-se que o seu uso contribuiu para o acréscimo da temperatura na região da estrutura de alvenaria de acesso ao interior do combustor, o que poderia danificá-la. Duas entradas de ar na região de mistura do ar quente com o ar ambiente permaneceram abertas.

4.3.1. Teste 06

No teste 06, foram usados dois tipos de combustível: o carvão vegetal e os chips de eucalipto, com os parâmetros especificados na Tabela 4.3. O carvão foi

acionado no interior do reator até a região de entrada de ar primário, e o restante do espaço, preenchido com os chips de eucalipto.

Após a ignição, os sistemas de ventilação e de exaustão foram ligados, manualmente, e os inversores permaneceram na frequência de 50 Hz, até o início do processo de gaseificação, que ocorreu em 10 minutos. A gaseificação durou 2h5min.

Foram coletadas 237 amostras das temperaturas: ambiente, da zona de combustão do gaseificador, na queima do gás e do ar quente de exaustão.

As medidas estatísticas dessas temperaturas foram calculadas e estão na Tabela 4.18.

Tabela 4.18 - Medidas estatísticas das diversas temperaturas coletadas no teste 07

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Ambiente	24,66	26,69	26,01	0,63	2,42
Combustão	611,93	994,44	701,50	105,25	15,00
Exaustão	57,99	101,52	77,46	9,59	12,38
Queima do gás	437,36	608,67	537,21	31,87	5,93

Observa-se, na Tabela 4.18, que os coeficientes de variação das temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão não foram baixos, o que indica que essas temperaturas não se estabilizaram próximas as suas respectivas médias, como pode ser visto na Figura 4.19.

No início do teste, ocorreu uma variação acentuada da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e da *temperatura do ar quente de exaustão*, quando o combustível queimado foi o carvão vegetal, como observado na Figura 4.19. A *temperatura na zona de combustão do gaseificador* alcançou o valor máximo de 994,44°C, e a *temperatura do ar quente de exaustão*, o de 101,52°C, como mostram as medidas estatísticas da Tabela 4.18.

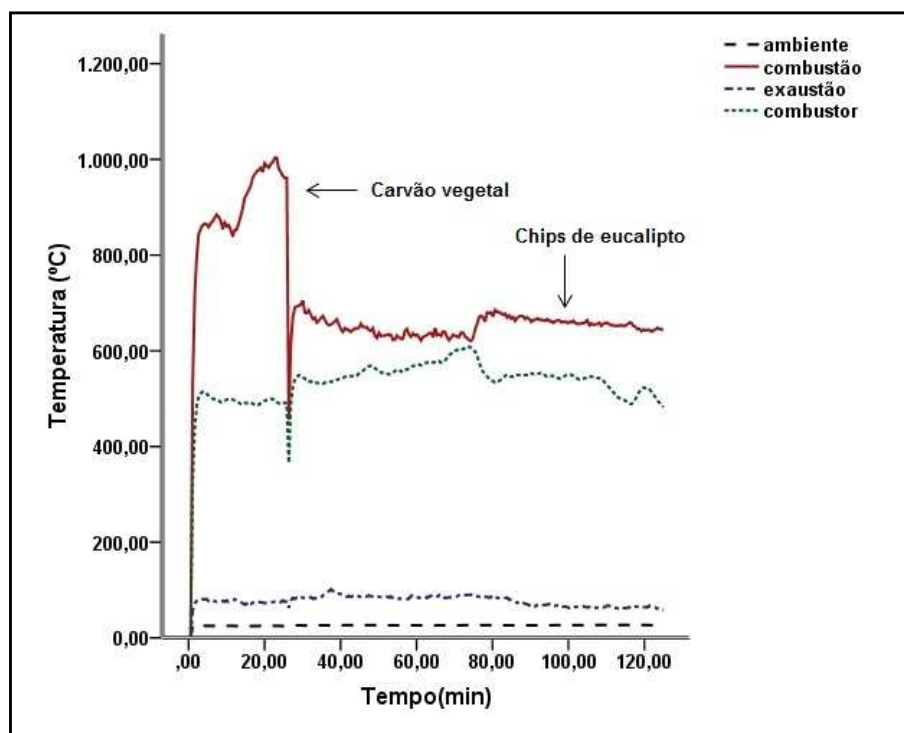


Figura 4.19 - Variação das temperaturas ambiente, na zona combustão do gaseificador, do ar quente do exaustão e na região da queima do gás no combustor coletadas no teste 07.

Durante o período inicial do teste foi atribuído ao SP da *temperatura na zona de combustão do gaseificador* o valor de 1000°C e à *temperatura do ar quente de exaustão*, o de 60°C.

Os Sistemas Lógicos Fuzzy não mantiveram as temperaturas próximas aos seus respectivos SP. Os motores elétricos dos sistemas de ventilação e de exaustão trabalharam com velocidade máxima, mas não conseguiram aumentar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e reduzir a *temperatura do ar quente de exaustão*, indicando a interferência do uso conjunto dos dois tipos de combustível nas temperaturas da zona combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão.

Após algum tempo, a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* começou a cair rapidamente, sugerindo que começava a entrar na zona de combustão do gaseificador os chips de eucalipto. A partir desse instante, foram estabelecidos novos valores como SP: 650 °C para a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e 75°C para a *temperatura do ar quente de exaustão*.

Para avaliar a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy, foram desconsideradas as temperaturas coletadas nos primeiros 37 minutos, durante os quais não foi possível

controlar as temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão. Após desconsiderar essas temperaturas iniciais, foram descartados os *outliers* das temperaturas na zona de combustão do gaseificador inferiores a 601°C e superiores a 692°C; e as do ar quente de exaustão inferiores a 34°C e superiores a 117°C.

As medidas estatísticas das temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão do conjunto gaseificador/combustor foram calculadas e estão na Tabela 4.19.

Tabela 4.19 - Medidas estatísticas das temperaturas na zona de combustão de gaseificador do ar quente de exaustão após o descarte dos *outliers*

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Combustão	620,68	685,24	650,02	15,46	2,38
Exaustão	57,99	101,52	77,14	10,79	13,98

Analisando as medidas estatísticas da Tabela 4.19, observa-se que a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* se estabilizou próxima à média, pois o coeficiente de variação foi muito baixo, 2,38%. O erro entre a temperatura de combustão e o SP foi de 0,00%, menor do que o particionamento do erro de 3,08% estabelecido no SLF para o SP. Com essas informações, afirma-se que a temperatura se estabilizou no SP, como pode ser observado na Figura 4.20.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média na zona de combustão do gaseificador e o SP, procedeu-se ao teste de *t*, em nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve aceitar a hipótese de igualdade.

Os resultados estatísticos permitem afirmar que a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* se manteve igual ao SP.

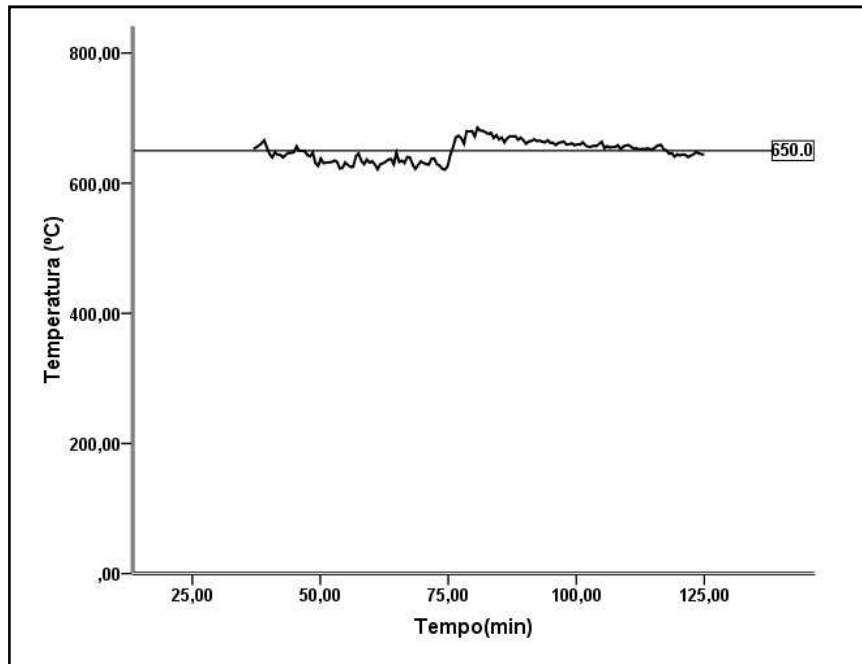


Figura 4.20 - Variação da temperatura na zona de combustão do gaseificador e o SP.

Analisando as medidas estatísticas da *temperatura do ar quente exaustão* na Tabela 4.19, observa-se que a temperatura média do ar quente de exaustão foi 77,14°C, um valor próximo ao SP, 75°C, mas com um coeficiente de variação considerado médio, 13,98%. O erro entre a temperatura média de exaustão e o SP foi de 2,85%, inferior ao particionamento do erro de 6,67% estabelecido no SLF para o respectivo SP.

Mesmo com o erro entre a temperatura média do ar quente de exaustão e o SP mantido na faixa estabelecida no SLF, não é possível concluir que a *temperatura do ar quente de exaustão* se estabilizou próxima ao SP, pois o coeficiente de variação de 13,98% não foi baixo, indicando que a *temperatura do ar quente de exaustão* não se estabilizou próxima a sua média, como visto na Figura 4.21.

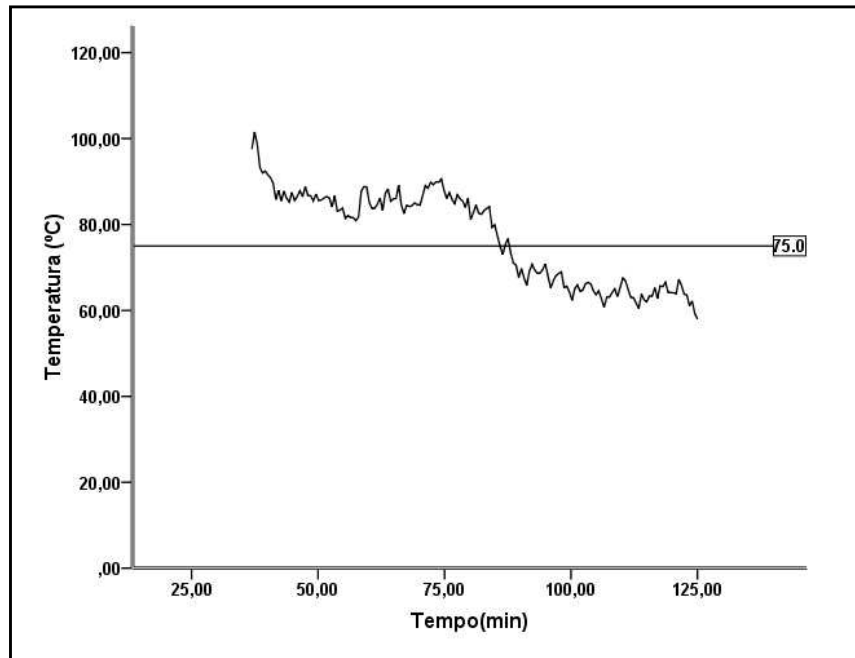


Figura 4.21 - Variação da temperatura do ar quente de exaustão e o SP no teste 08.

Para testar a hipótese de igualdade entre a temperatura média do ar de exaustão e o SP, foi utilizado o teste de t , em nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade.

Os resultados estatísticos permitem observar que o SLF não foi eficiente para manter a *temperatura do ar quente de exaustão* estável e próxima ao SP, mesmo desconsiderando as temperaturas medidas nos primeiros 37 minutos e os *outliers*.

4.3.2. Teste 07

No teste 07, foram utilizados, simultaneamente, três tipos de combustível: o carvão vegetal, a lenha de eucalipto e os chips de eucalipto, com os parâmetros especificados na Tabela 4.3.

Os combustíveis foram acondicionados no reator em quatro camadas, a primeira de carvão vegetal, com aproximadamente 40 cm de altura, até alcançar a entrada de ar do gaseificador. A segunda camada foi de lenha de eucalipto, com aproximadamente 30 cm de altura; a terceira foi de chips de eucalipto, com aproximadamente 30 cm de altura; e o restante foi preenchido com uma nova camada de lenha de eucalipto.

Como no teste anterior, as camadas de combustíveis foram utilizadas para desestabilizar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador*, a fim de avaliar as respostas dos Sistemas Lógicos Fuzzy.

Após a ignição, os sistemas de ventilação e de exaustão foram ligados manualmente, e os inversores permaneceram na frequência de 50 Hz, até o início do processo de gaseificação, que ocorreu em 15 minutos. A gaseificação permaneceu estável durante 3h5min.

Foram coletadas 497 amostras das temperaturas na zona de combustão do gaseificador, na região da queima do gás, do ar quente de exaustão e a ambiente. Na Figura 4.22, estão plotadas as medidas das temperaturas coletadas durante o teste.

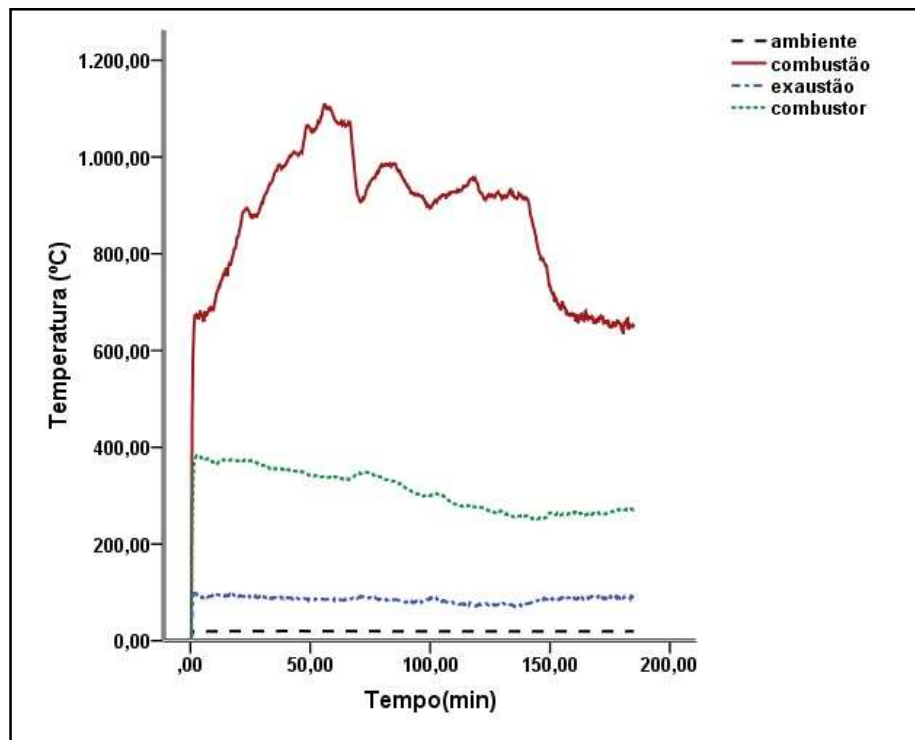


Figura 4.22 - Variação das temperaturas ambiente, na zona combustão do gaseificador, do ar quente da exaustão e na região da queima do gás no combustor coletadas durante o teste 07.

Foram descartados os *outliers* da *temperatura na zona combustão do gaseificador* inferiores a 376°C e superiores a 1300°C; e os da *temperatura do ar quente de exaustão* inferiores a 69°C e superiores a 102°C.

Após o descarte desses *outliers*, calcularam-se as medidas estatísticas das diversas temperaturas, e os resultados estão na Tabela 4.20.

Tabela 4.20 - Medidas estatísticas das diversas temperaturas após o descarte dos *outliers*

Temperatura	Medidas estatísticas				
	Mínima (°C)	Máxima (°C)	Média (°C)	Desvio padrão (°C)	Coefficiente de variação (%)
Ambiente	19,11	20,04	19,49	0,22	1,12
Combustão	444,87	1108,57	871,36	136,48	15,66
Exaustão	69,43	98,13	85,39	6,10	7,14
Queima do gás	249,53	383,10	310,92	42,95	13,81

Foram estabelecidos os seguintes *setpoints*: 900°C para a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e 80°C para a *temperatura do ar quente de exaustão*.

Analisando as medidas estatísticas da Tabela 4.20, observa-se que a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* não se estabilizou próxima a sua média (871,36°C), pois o coeficiente de variação, de 15,66%, não foi baixo. O erro entre a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e o SP foi de 3,18%, maior do que o particionamento do erro de 2,22% estabelecido no SLF para o respectivo SP. Com esses resultados, pode-se afirmar que a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* não se estabilizou próxima ao SP, como pode ser observado na Figura 4.23.

Para testar a hipótese de igualdade entre *temperatura na zona de combustão do gaseificador* e o SP, foi utilizado o teste de *t*, em nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade.

As análises estatísticas conduzem ao seguinte resultado: o SLF não manteve a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* estável e próxima ao SP.

Analisando as medidas estatísticas da *temperatura do ar quente de exaustão* da Tabela 4.20, observa-se que ela se estabilizou próxima a sua média, 85,39°C, pois o coeficiente de variação de 7,14% foi baixo. O erro entre a temperatura de exaustão e o SP foi de 6,73%, maior que o particionamento do erro de 6,25% estabelecido no SLF para o respectivo SP. Esses resultados conduzem à afirmação de que a *temperatura do ar quente de exaustão* se estabilizou próxima à média, mas não ao SP, como pode ser observado na Figura 4.24.

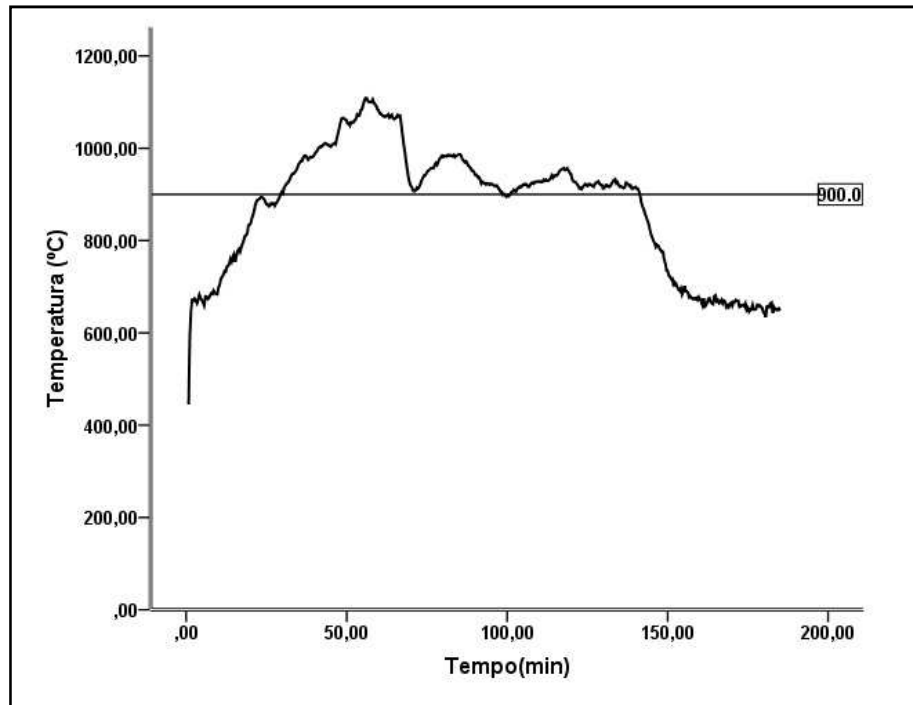


Figura 4.23 - Variação da temperatura na zona combustão do gaseificador e o SP.

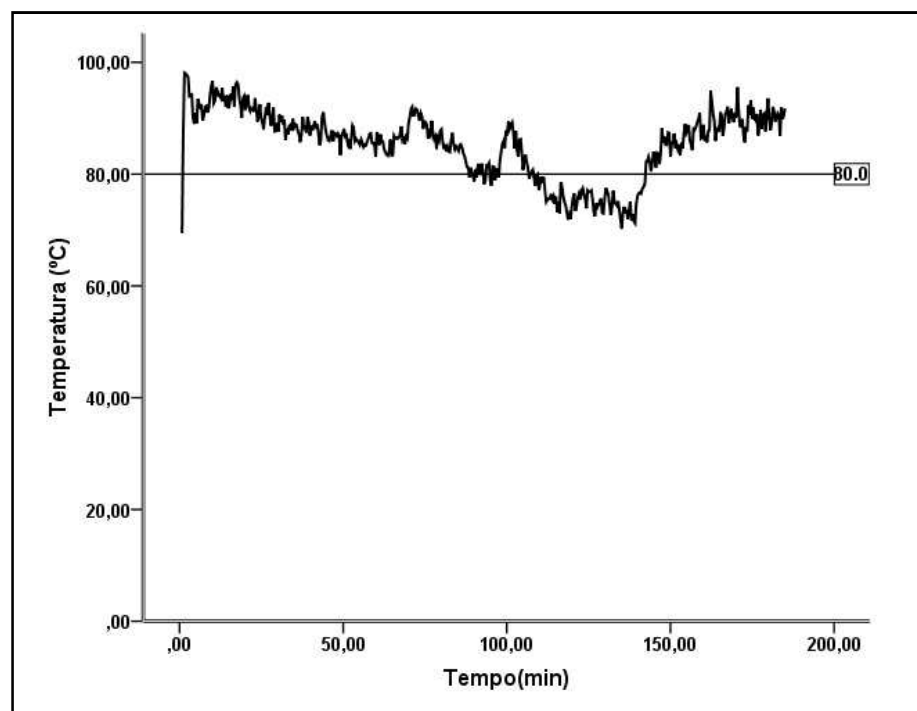


Figura 4.24 - Variação da temperatura do ar quente de exaustão e o SP durante o teste 07.

Para testar a hipótese de igualdade entre temperatura do ar de exaustão e o SP, foi utilizado o teste de t , em nível de 95% de confiança. O resultado do teste indicou que se deve rejeitar a hipótese de igualdade. Os resultados estatísticos indicam que o SLF não estabilizou a *temperatura do ar quente de exaustão* no SP.

4.3.2.1. Considerações sobre os testes 06 e 07

Como observado durante os testes, o SLF desenvolvido para controlar a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* num valor estabelecido não se mostrou eficiente.

Quando se utiliza mais de um tipo de combustível, acomodado em camadas dentro do reator, pode ocorrer uma intersecção vazia entre os intervalos de variação da temperatura de combustão de cada um dos combustíveis, o que impede de se atribuir um SP que pertença a essa intersecção. Por exemplo, nos testes em que foi utilizado o carvão vegetal, a *temperatura na zona de combustão do gaseificador* variou de 900°C a 1200°C, e no teste em que foi utilizado os chips de eucalipto, de 600°C a 800°C. Ao acomodar esses dois combustíveis no reator, não ocorre a intersecção entre as duas faixas de temperatura, o que torna impossível estabelecer um SP que atenda as duas faixas de temperatura.

No teste 06, o controle da temperatura de combustão só foi possível a partir do instante em que o combustível na zona de combustão da gaseificação foi os chips de eucalipto.

No teste 07, a disposição dos combustíveis no reator impediu que um só tipo de combustível permanecesse na zona de combustão por um período que estabilizasse a temperatura e permitisse o seu controle.

O SLF desenvolvido para controlar a temperatura do ar quente de exaustão também se mostrou menos eficiente nos testes 06 e 07, se comparados com os testes 03, 04 e 05. Contribuíram para esse fato:

- 1) A remoção do dispositivo cilíndrico utilizado para a queima do gás criou dificuldades para a mistura do ar quente com o ar frio, dificultando controle da *temperatura do ar quente de exaustão*. Ele evitava o contato direto do ar ambiente com o fogo na região da queima do gás, impedindo que a chama fosse arrastada para a região de mistura do ar pela ação do sistema de exaustão;
- 2) A ausência de um dispositivo para regular as entradas de ar ambiente;

3) Interferências externas ao processo de combustão, tais como: temperatura ambiente, velocidade do ar e umidade relativa do ar ambiente.

Essas considerações permitiram afirmar de que não é viável o uso de mais de um tipo de combustível, simultaneamente, dispostos em camada, no processo de gaseificação em que o objetivo é o controle das temperaturas na zona de combustão do gaseificador e do ar quente de exaustão.

4.4. Vazão e concentração de CO e CO₂ no ar quente de exaustão

As vazões volumétricas do ar quente de exaustão foram calculadas com base na velocidade média do ar, obtidas de cinco medidas na seção transversal do duto de saída do ar, nas frequências de 30 Hz a 66 Hz, valores mínimo e máximo da frequência do inversor do sistema de exaustão estabelecidos no SLF.

Foram feitos os cálculos das medidas estatísticas das vazões e os resultados estão apresentados na Tabela 4.21.

Tabela 4.21 - Medidas estatísticas da vazão volumétrica do ar de exaustão

	Mínima (m ³ /h)	Máxima (m ³ /h)	Média (m ³ /h)	Desvio padrão (m ³ /h)	Coefficiente de variação (%)
Vazão	3,34	7,33	5,44	1,64	30,15

Durantes os testes com o conjunto gaseificador/combustor foram coletadas, aleatoriamente, amostras da concentração de CO e CO₂ no ar quente de exaustão, com o objetivo de verificar a possível influencia do dispositivo cilíndrico utilizado para a queima do gás e avaliar a qualidade do ar quente exaustão.

Foram calculadas as medidas estatísticas das concentrações de CO e CO₂ no ar quente de exaustão das amostras com e sem o uso do dispositivo cilíndrico para a queima do gás. Os resultados dos cálculos estatísticos estão na Tabela 4.22.

Tabela 4.22 - Medidas estatísticas das concentrações de CO e CO₂ no ar quente de exaustão durante os testes com e sem o uso do dispositivo cilíndrico

Medidas estatísticas	Concentração de CO (ppm)		Concentração de CO ₂ (ppm)	
	Com uso do dispositivo	Sem uso do dispositivo	Com uso do dispositivo	Sem uso do dispositivo
Mínima	1400,00	200,00	10900,00	8400,00
Máxima	4200,00	700,00	20700,00	15000,00
Média	2665,22	395,24	16343,48	11309,52
Desvio padrão	695,18	195,93	2382,67	1972,03

Na Tabela 4.22, observa-se que a concentração média de CO, sem o dispositivo, está acima dos limites sugeridos para a ambientação animal, que segundo Whates e Cobb-Vantress (*apud* ZANATTA, 2007, p. 80), é de 10 ppm. Quando o dispositivo cilíndrico foi utilizado, a concentração de monóxido de carbono aumentou aproximadamente 500%, indicando que o dispositivo contribuiu, ainda mais, para a presença de CO no ar quente de exaustão.

Uma possível explicação para a alta concentração de CO é que parte do monóxido de carbono presente no gás produzido no gaseificador não sofreu combustão e foi para o ar quente de exaustão.

Na Figura 4.25 estão plotadas as concentrações de CO no ar quente de exaustão obtidas nos testes com e sem o uso do dispositivo cilíndrico para a queima do gás.

Observa-se, na Tabela 4.22, que a concentração média de CO₂ aumentou pouco mais de 40%, quando foi utilizado o dispositivo cilíndrico para a queima do gás. No entanto, com ou sem o uso do dispositivo, a concentração média de CO₂ no ar de exaustão está acima dos valores máximos recomendáveis para a exposição contínua em instalações animais, que é de 3000 ppm, segundo Whates (*apud* ZANATTA, 2007, p. 82).

Na Figura 4.26 foram plotadas as concentrações CO₂ no ar quente de exaustão, obtidas nos testes em que foi utilizado o dispositivo cilíndrico para a queima do gás e nos testes em que não foi utilizado o dispositivo.

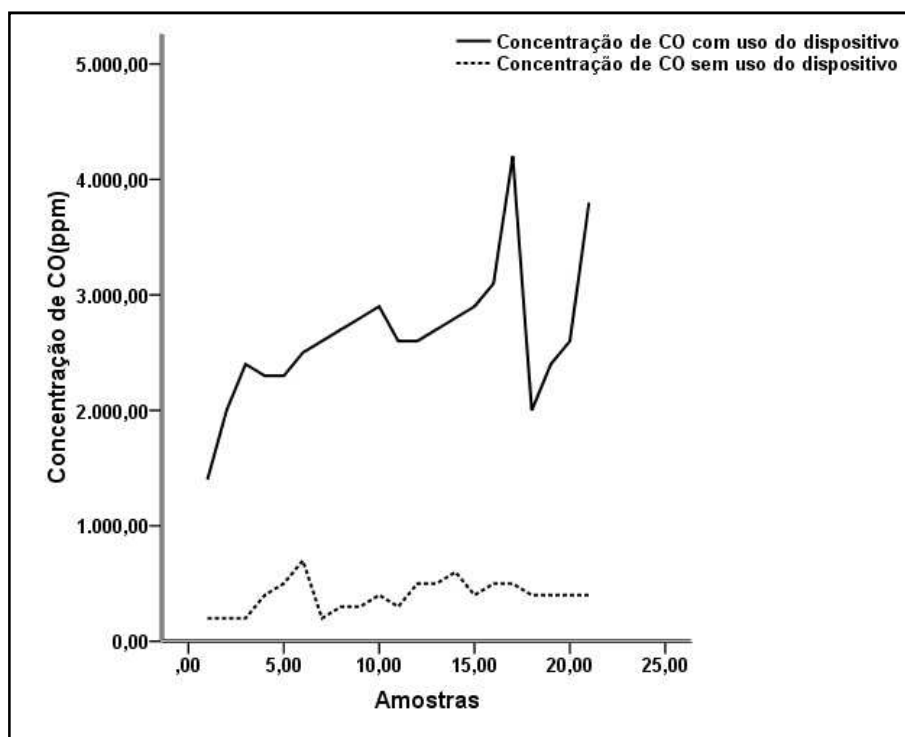


Figura 4.25 - Variação da concentração de CO no ar de exaustão com e sem o uso do dispositivo cilíndrico para a queima do gás.

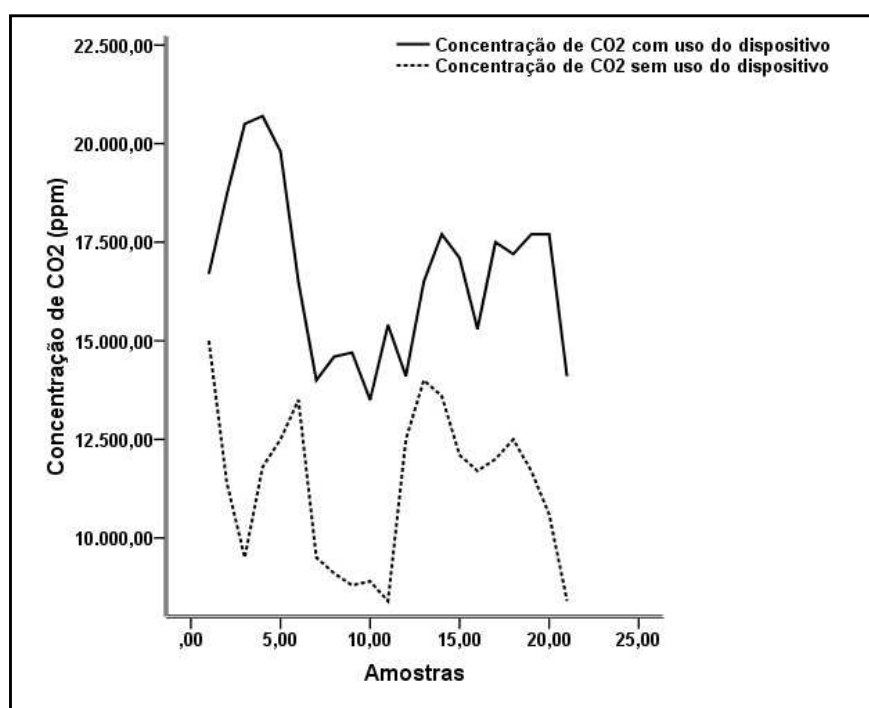


Figura 4.26 - Variação da concentração de CO₂ no ar quente de exaustão com e sem o uso do dispositivo cilíndrico para a queima do gás.

Para que o conjunto gaseificador/combustor seja utilizado na produção de ar quente para instalações animais, recomenda-se reavaliar o projeto do combustor, principalmente na região em que ocorre a queima do gás produzido no gaseificador, para melhorar a combustão desse gás e reduzir as concentrações de CO e CO₂ presentes no ar quente de exaustão.

Não se observou a presença de fumaça no ar quente de exaustão, o que torna a sua aplicação viável para a secagem de grãos, desde que sejam observadas as recomendações de vazão e temperatura para o tipo de produto a ser processado.

5. CONCLUSÃO

O conjunto gaseificador/combustor produziu ar quente e limpo na temperatura estabelecida, portanto pode ser utilizado em atividades agrícolas, tais como: secagem de grãos, ambientação animal etc., atentando para as concentrações de CO e CO₂ permitidas para as aplicações a que se destinar.

Os resultados obtidos nas condições experimentais em que foram realizados os estudos permitem concluir que:

Da construção do gaseificador

- O equipamento desenvolvido produziu gás de forma estável em todos os testes, não apresentado entupimentos da grelha ou vazamentos.
- O anel tubular de aço desenvolvido e acoplado às entradas de ar para o interior do reator permitiu o uso de um sistema de ventilação capaz de controlar a quantidade do ar na gaseificação, o que foi fundamental para a produção do gás de forma estável.
- Observou-se durante os testes a perda de calor acentuado pelo equipamento para o ambiente, devido ao alto coeficiente de transferência de calor do aço e ao elevado gradiente de temperatura. Em projetos futuros, o isolamento térmico no interior do reator deve ser considerado.
- Verificou-se a necessidade de se desenvolver um dispositivo de alimentação contínua da biomassa para o reator, que contribuiria com o controle da temperatura na zona de combustão.

Da construção do combustor do gás

- As entradas de ar, em forma tubular, facilitam o fluxo do ar ambiente para o interior do reator.
- Há a necessidade de melhorias no combustor.
- As melhorias podem ser viabilizadas com dispositivos que controlem a entrada de ar na região da mistura do ar quente com ar ambiente.
- O dispositivo cilíndrico utilizado para a queima do gás, posicionado imediatamente após a saída do reator, contribuiu para o controle da temperatura do ar quente de exaustão.
- O dispositivo cilíndrico impede que o sistema de exaustão arraste a chama produzida com a queima do gás para a região de mistura do ar quente com o ar ambiente.

Do Sistema Lógico *Fuzzy*

- É possível manter *a temperatura na zona de combustão do gaseificador* em valores próximos ao SP utilizando-se um SLF.
- É possível controlar *a temperatura do ar quente de exaustão* em valores próximos ao SP por meio do SLF.
- O SLF é mais eficiente para controlar a temperatura do ar quente de exaustão quando se utiliza o dispositivo cilíndrico para a queima do gás.
- A utilização de um único tipo de combustível melhora a eficiência do SLF.

Do ar quente de exaustão gerado no conjunto gaseificador/combustor

- Durante os testes a vazão do ar quente de exaustão variou de 3,34 a 7,33 m³/h, não sendo observada a presença de fumaça, o que permite a sua utilização na secagem de grãos, consideradas as recomendações de vazões mínimas e de temperatura do ar de secagem, para as condições climáticas e tipo de produto a ser processado.
- As concentrações de CO e CO₂ presentes no ar quente de exaustão foram maiores do que aquelas recomendadas para o uso em instalações animais. É recomendável reavaliar o projeto do combustor, principalmente na região em que ocorre a queima do gás produzido no reator, com vistas a melhorar a combustão desse gás e reduzir as concentrações de CO e CO₂ no ar quente de exaustão.
- Quando foi utilizado o dispositivo cilíndrico para a queima do gás aumentou as concentrações de monóxido e dióxido de carbono no ar quente de exaustão.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, M.; JACQUES, M.A.P. Estudo comparativo de controladores Mamdani e Sugeno para controle de tráfego em interseções isoladas. **Transporte**, v. 16, n. 2, p. 24-31, 2008.

ARANTES, M.D.C. et al. Gaseificação de materiais lignocelulósicos para geração de energia elétrica. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 4, p. 525-533, 2008.

BARRETO-NETO, A.A.; SOUSA FILHO, C.R. Application of fuzzy logic to the evaluation of runoff in a tropical watershed. **Environmental Modelling & Software**, n. 23, p. 244-253, 2008.

BARROS, L.C.; BASSANEZI, R.C. **Tópicos da lógica fuzzy e biomatemática**. Campinas: UNICAMP/IMECC, 2006. 354 p.

BILOBROVEC, M.L; MARÇAL, R.F.M.; KOVALESKI, J.L. Implementação de um sistema de controle inteligente utilizando a lógica fuzzy. In: SIMPÓSIO DA ENGENHARIA DA PRODUÇÃO, 11, 2004, Bauru. **Trabalhos apresentados...** Bauru, 2004. Disponível em: <<http://www.pg.utfpr.edu.br/ppgep/Ebook/ARTIGOS/8.pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2010.

BILOBROVEC, M. **Sistema especialista em lógica fuzzy para o controle, gerenciamento e manutenção da qualidade em processo de aeração de grãos**. 2005. 74 f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Produção) – Universidade Tecnológica do Paraná, Ponta Grossa, PR.

CANEPPELE, F.L.; SERAPHIM, O.J. Aplicação da teoria fuzzy no controle de sistemas de geração de energias alternativas. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 3, p. 24-41, 2010.

COELHO, B.F.V.M. **Modelo de previsão da evolução do biodiesel no Brasil utilizando a lógica Fuzzy**. 2007. 55 f. Dissertação (Mestrado em Administração e Economia) – Instituto Brasileiro de Mercado de Capitais, Rio de Janeiro, RJ.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS – CEMIG. **Gaseificação de Biomassa**. Belo Horizonte: Divisão de análise e desenvolvimento energético. 1986.

CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. Caracterização da biomassa. In: _____. **Biomassa para energia**. 2.ed. Campinas: Unicamp, 2009. cap. 2, p. 31-62.

CRAMESCO, C.P.; GABRIEL FILHO, L.R.A.; CATANEO, A. Metodologia de determinação de funções de pertinência de controladores Fuzzy para a avaliação energética de empresas de avicultura de postura. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 1, p. 21-39, 2010.

CRUZ, L.F. et al. Modelo Fuzzy para obtenção do tempo de aeração em silos verticais. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 16, n. 2, 2001.

DERMIBAS, A.H.; DERMIBAS, I. Importance of rural bioenergy for developing countries. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, n. 48, p. 2386-2398, 2007.

DEVORE, J.L. **Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências**. 6.ed. São Paulo: Thomson, 2006.

DIAS, A.H. et al. **Teoria Fuzzy aplicada à automação da condução racional da aeração de grãos de milho**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROINFORMÁTICA, 5, 2005, Londrina. **Trabalhos apresentados...** Londrina: SBI-Agro, 2005.

GATES, R.S.; CHAO, K.; SINGRIMIS, N. **Identifying design parameters for fuzzy control of staged ventilation control systems**. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/journal/01681699>>. Acesso em: 02 fev. 2011.

GOMES, F.P. **Curso de estatística experimental**. 5.ed. Piracicaba: ESALQ/USP, 1973. 430 p.

GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. 2.ed. Campinas: Unicamp, 2009. cap. 9, p. 241-327.

GOTTSCHALK, K.; NAGY, L.; FARKAS, I. Improved climate control for potato stores by fuzzy controllers. **Computers and Electronics in Agriculture**, Hungary, n. 40, p. 127-140, 2003.

HIGMAN, C.; VAN DER BURGT, M. **Gasification**. 2.ed. Gulf Professional Publishing, 2008. 456 p.

KIRUBAKARAN, V. et al. A review on gasification of biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2007.

LEUNG, D.C.; YIN, X.L.; WU, C.Z. A review on the development and commercialization of biomass gasification technologies in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, England, v. 8, n. 6. p. 565-580, 2004.

LORA, E.E.S. et al. Gaseificação. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.E.S.; GÓMEZ, E.O. **Biomassa para energia**. 2.ed. Campinas: Unicamp, 2009. cap. 9, p. 241-332.

LORA, E.S.; ANDRADE, R.V. Biomass as energy source em Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, n. 13, p. 180-191, 2009.

LORA, E.S.; HAPP, J.F.; CORTEZ, L.A.B. Caracterização e disponibilidade da biomassa. In: CORTEZ, L.A.B.; LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus: EDUA/EFEI, 1997. p. 5-38.

MANZINE, L.G.; TEIXEIRA, N.M. Utilização de teoria Fuzzy para o enquadramento tarifário de energia elétrica em agroindústria. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 21, n. 4, p. 63-80, 2006.

MARTIN, S. **Gaseificador da biomassa para aquecimento de ar para a secagem de produtos agrícolas**. 2005, 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

MARTIN, S.; SILVA, J.N.; TINÔCO, 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**, Viçosa, v. 14, n. 4, p. 258-267, 2006.

MENDEL, J.M. Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial. **Proceedings of the IEEE**, v. 83, 1995.

MENDES, L.M.; SILVA, J.R.; TRUGILHO, P.F. **Gaseificação de carvão vegetal ou madeira para geração de energia em pequena escala**. Lavras: UFLA/FAEPE, 1998. 98 p.

OLIVEIRA, H.L.; AMENDOLA, M.; NÄÄS, I.A. Estimativa das condições de conforto térmico para avicultura de postura usando a teoria dos conjuntos fuzzy. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, n. 2, p. 300-307, 2005.

PANDAROFI, H. et al. Uso da lógica fuzzy na caracterização do ambiente produtivo para matrizes gestante. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 83-92, 2007.

PEREIRA, D.F. et al. Sistema de controle fuzzy para a estimativa do bem-estar de matrizes pesadas. **Engenharia na Agricultura**, Jaboticabal, v. 28, n. 4, p. 624-634, 2008.

PERISSINOTTO, M. et al. Conforto térmico de bovinos leiteiros confinados em clima subtropical e mediterrâneo pela análise de parâmetros fisiológicos utilizando a teoria dos conjuntos fuzzy. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 5, 2009.

SCHIASSI, L. et al. Metodologia fuzzy aplicada à avaliação do aumento da temperatura corporal em frangos de corte. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 16, n. 2, p. 180-191, 2008.

SANTOS, W.R. **Controle e avaliação de um conjunto de gaseificador-combustor de fluxo concorrente, utilizando como combustível a biomassa de eucalipto**. 2008. 67 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SANTOS, I.S. **Reator de gaseificação de biomassa em fluxo contracorrente**. 2003. 76 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SANTOS, I.S.D. et al. Reator de gaseificação da biomassa em fluxo contracorrente para aquecimento de ar de secagem. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 18, n. 5, p. 382-389, 2010.

SANTOS, W.R. et al. Controle de temperatura do ar atmosférico aquecido por um conjunto gaseificador combustor da biomassa de fluxo concorrente, visando aquecimento de aviários. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 18, n. 2, 2010.

SHARMA, A.K.R. Experimental study on 75 kW_{th} downdraft(biomass) gasifier system. **Renewable Energy**, Murthal, IN, n. 34, p. 1726-1733, 2009.

SILVA, J.N.; SAIKI, E.T.; VILARINHO, M.C.; SOBRINHO, J.C. Gaseificador/combustor a cavacos de lenha na secagem de café despulpado. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 3, 2000, Campinas. **CD-ROM...** Campinas, 2000.

VIEIRA, A.C. **Gaseificação de briquetes de casca de eucalipto**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

VAN WYLEN, G.J.; SONNTAG, R.E.; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. São Paulo: Edgard Blücher, 2009. 659 p.

VARGENS, J.M.; TANSCHKEIT, R.; VELLASCO, M.M.B.R. Previsão de produção agrícola baseada em regras linguísticas e lógica fuzzy. **Revista Controle e Automação**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 2, p. 114-120, 2003.

WANDER, P.R. **Utilização de resíduos de madeira e lenha como alternativas de energia renováveis para o desenvolvimento sustentável da região nordeste do estado do Rio Grande do Sul**. 2001. 106 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.

WEBER, L.; KLEIN, P.A.T. **Aplicação da lógica fuzzy em software e hardware**. Canoas: ULBRA, 2003.

ZANATTA, F.L. **Gaseificador de biomassa no aquecimento de aviários e sua relação com conforto térmico, qualidade do ar e desempenho produtivo de frangos de corte**. 2007. 105 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ZANATTA, F.L. **Desenvolvimento e avaliação de um gaseificador de biomassa e estudo do potencial de produção de biogás com resíduos agrícola e da avicultura**. 2011. 87 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

ZADEH, L.A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.

ZADEH, L.A. Is there a need for fuzzy logic? **Information Sciences**, Elsevier, n.178, p. 2751-2779, 2008.

APÊNDICE

No Apêndice estão apresentados os resultados das ANOVAS utilizadas para verificar a relação entre as frequências e a temperatura na zona de combustão; e dos testes de t utilizados para avaliar a eficiência dos Sistemas Lógicos Fuzzy. E o algoritmo utilizado para controlar os sistemas de ventilação e exaustão do conjunto gaseificador/combustor implementado no simulink.

Tabela 1A - Resultado da anova da temperatura de combustão no teste 01

Combustão	Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
Between groups	227411,743	4	56852,936	18,089	0,000
Within groups	647454,873	206	3142,985		
Total	874866,616	210			

Tabela 2A - Resultado da anova da temperatura da chama no teste 01

Chama	Sum of squares	df	Mean square	F	Sig.
Between groups	310827,494	3	103609,165	80,846	0,000
Within groups	178136,408	139	1281,557		
Total	488963,902	142			

Tabela 3A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de combustão e SP no teste 02

		Temperatura de combustão	
Test Value = 1000	t	37,576	
	df	480	
	Sig. (2-tailed)	0,000	
	Mean difference	38,16758	
	95% confidence interval of the difference	Lower	36,1717
		Upper	40,1634

Tabela 4A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de combustão e o SP no teste 03

		Temperatura na zona de combustão	
Test Value = 1050	t	0,708	
	df	384	
	Sig. (2-tailed)	0,479	
	Mean difference	0,74926	
	95% confidence interval of the difference	Lower	-1,3304
		Upper	2,8289

Tabela 5A - Resultado do teste t de comparação da temperatura média de exaustão e o SP no teste 03

		Temperatura de exaustão	
Test Value = 60	t	-5,826	
	df	521	
	Sig. (2-tailed)	0,000	
	Mean difference	-1,56675	
	95% confidence interval of the difference	Lower	-2,0951
		Upper	-1,0385

Tabela 6A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de combustão com o SP no teste 04

		Combustão	
Test Value = 1100	t	5,402	
	df	646	
	Sig. (2-tailed)	0,000	
	Mean difference	8,67388	
	95% confidence interval of the difference	Lower	5,5210
		Upper	11,8268

Tabela 7A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de exaustão com o SP no teste 04

		Exaustão	
Test Value = 60	t	-30,921	
	df	699	
	Sig. (2-tailed)	0,000	
	Mean difference	-3,04992	
	95% confidence interval of the difference	Lower	-3,2436
		Upper	-2,8563

Tabela 8A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de combustão com o SP no teste 05

		Combustão	
Test Value = 650	t	,587	
	df	187	
	Sig. (2-tailed)	0,558	
	Mean difference	0,78638	
	95% confidence interval of the difference	Lower	-1,8542
		Upper	3,4270

Tabela 9A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de exaustão com o SP no teste 05

		Temperatura de exaustão (°C)	
Test Value = 60	t	-12,978	
	df	185	
	Sig. (2-tailed)	0,000	
	Mean difference	-3,53273	
	95% confidence interval of the difference	Lower	-4,0698
		Upper	-2,9957

Tabela 10A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de combustão com o SP no teste 06

		Combustão	
Test Value = 650	t	-,114	
	df	163	
	Sig. (2-tailed)	,909	
	Mean difference	-,13899	
	95% confidence interval of the difference	Lower	-2,5453
		Upper	2,2673

Tabela 11A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura de exaustão com o SP no teste 06

		Exaustão	
Test Value = 75	t	2,015	
	df	163	
	Sig. (2-tailed)	0,046	
	Mean difference	1,63981	
	95% confidence interval of the difference	Lower	0,0330
		Upper	3,2467

Tabela 12A - Resultado do teste de t de comparação da temperatura média de combustão com SP no teste 07

		Combustão	
Test Value = 900	t	13,298	
	df	350	
	Sig. (2-tailed)	0,000	
	Mean difference	49,19376	
	95% confidence interval of the difference	Lower	41,9181
		Upper	56,4695

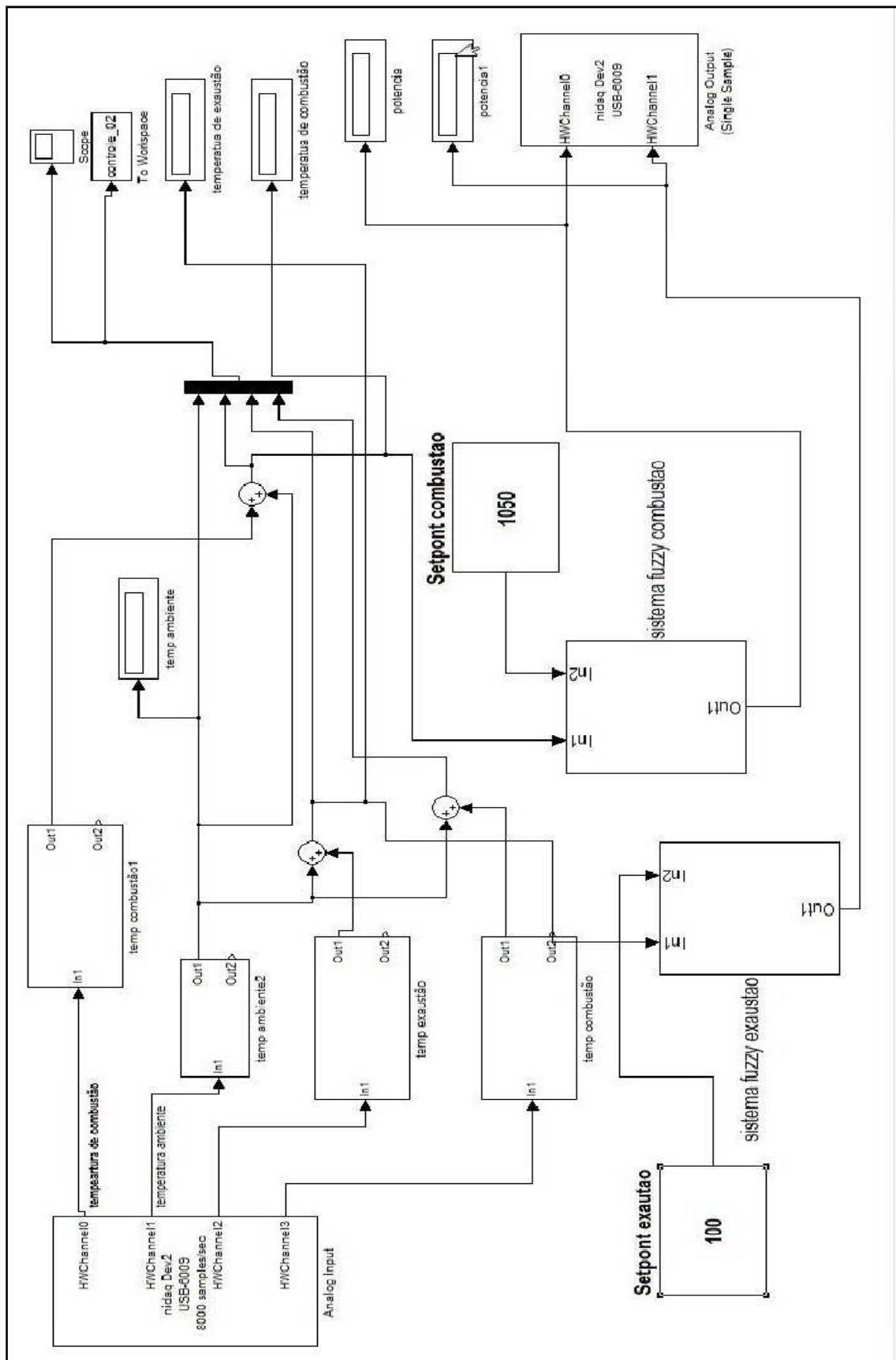


Figura 1A - O algoritmo de controle do sistema de ventilação e de exaustão do conjunto gaseificador/combustor implementado no simulink.