

RÚBEN CHRISTIAN BARBOSA

**MODELAGEM DINÂMICA E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR
PARA AUTOMAÇÃO DE UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

B238m
2015 Barbosa, Rúben Christian, 1989-
 Modelagem dinâmica e desenvolvimento de um controlador
 para automação de um gaseificador de biomassa / Rúben
 Christian Barbosa. – Viçosa, MG, 2015.
 viii, 87f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.76-79.

1. Gaseificadores. 2. Automação. 3. Biomassa
- Gaseificação. 4. Energia de biomassa. 5. Combustão -
Controle. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de
Engenharia Agrícola. Programa de Pós-graduação em
Engenharia Agrícola. II. Título.

CDD 22. ed. 665.772

RÚBEN CHRISTIAN BARBOSA

**MODELAGEM DINÂMICA E DESENVOLVIMENTO DE UM CONTROLADOR
PARA AUTOMAÇÃO DE UM GASEIFICADOR DE BIOMASSA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

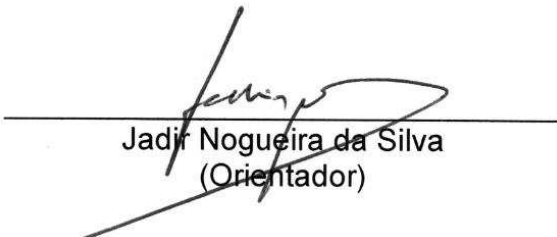
APROVADA: 10 de julho de 2015.



Paulo Marcos de Barros Monteiro
(Coorientador)



André Gomes Tôres



Jadir Nogueira da Silva
(Orientador)

À minha família, e amigos que
sempre apoiaram e
acreditaram em meu êxito no
decorrer da pós-graduação.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Viçosa, ao departamento de Engenharia Agrícola e ao Departamento de Engenharia Florestal, assim como aos professores e técnicos.

Ao Professor Jadir Nogueira da Silva, pela confiança, pela orientação e suporte na preparação e execução do projeto.

Ao Professor Volkhard Sholz, pelas críticas feitas ao experimento, e ideias que contribuíram para o sucesso do projeto.

Aos Professores Paulo Marcos de Barros Monteiro e José Helvecio Martins pela co-orientação, apoio e conselhos.

Ao Professor Marcio Arêdes Martins, que emprestou material laboratorial para execução das análises de gases.

Às minhas irmãs, meu pai e minha mãe que ajudaram na revisão textual, e sempre acreditaram em meu êxito.

Aos meus colegas de pós-graduação Michael de Oliveira Resende, Felipe Santos Dalólio, e aos estagiários Rafael Crouze e Ana Cláudia Vieira, pela paciência e disponibilidade em ajudar na execução dos experimentos.

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

"Seja você quem for, seja qual for a posição social que você tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa, tenha sempre como meta muita força, muita determinação e sempre faça tudo com muito amor e com muita fé em Deus, que um dia você chega lá. De alguma maneira você chega lá." (Ayrton Senna)

SUMÁRIO

RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivos.....	5
1.1.1. Objetivo Geral	5
1.1.2. Objetivos Específicos.....	5
2. APORTES TEÓRICOS.....	6
2.1. Gaseificação de Biomassa	6
2.1.1. História.....	8
2.1.2. Fundamentos Teóricos Da Gaseificação – Variáveis Envolvidas	11
2.1.3. Variáveis do Processo	14
2.1.4. Tipos De Gaseificadores.....	19
2.2. Controle de Sistemas Dinâmicos	26
2.2.1. Controladores	30
2.2.3. Identificação de Sistemas	34
2.3. Controle Digital	37
2.3.1. Família Arduino.....	39
2.3.2. Aquisição de Temperatura	41
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	44
3.1. Caracterização do Combustível.....	46
3.2. Modelagem e Identificação do Sistema	47
3.3. Desenvolvimento do Controlador.....	48
3.3.1. Detalhamento do Sistema.....	49
3.3.2. Metodologia para Construção do Controlador	49

3.4. Análise do gás obtido na gaseificação utilizando o controlador	51
3.4.1. Eficiência da gaseificação.....	52
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1. Caracterização da Biomassa	54
4.2. Modelagem e Identificação do Sistema	56
4.3. Determinação dos Parâmetros do PID	62
4.4. Análise do gás obtido na gaseificação utilizando o controlador	71
4.4.1 Eficiência da Gaseificação	72
5. CONCLUSÕES	74
REFERÊNCIAS	76
APÊNDICE A – Códigos utilizados.....	80
APÊNDICE B – Diagrama elétrico do controlador.....	87

RESUMO

BARBOSA, Rúben Christian, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2015. **Modelagem Dinâmica e Desenvolvimento de um Controlador para Automação de um Gaseificador de Biomassa.** Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Coorientadores: Paulo Marcos de Barros Monteiro e José Helvecio Martins.

Objetivou-se neste trabalho apresentar o projeto e teste da automatização de um gaseificador de biomassa de leito fixo do tipo concorrente. Para entendimento do problema foi apresentado o estado das fontes energéticas no mundo, apontando a utilização da biomassa, como energia renovável, uma possível solução para os problemas ambientais de escassez de fontes energéticas não renováveis. Observa-se que a gaseificação é um processo viável para transformação de biomassa em energia, sendo que a gaseificação carece de métodos confiáveis e automáticos de operação. Para solução do problema, propôs-se a implementação de um controlador automático. Foram realizados seis experimentos, dos quais os três primeiros foram utilizados para a identificação e modelagem do sistema dinâmico. A partir da modelagem estimou-se os parâmetros do controlador automático do tipo PID, o qual foi implementado com a ajuda de um Arduino UNO. Nos três testes seguintes o controlador foi testado no sistema dinâmico. A pesquisa demonstrou a eficácia do controlador e do modelo aproximado do gaseificador de biomassa, com um gás de boa qualidade e com PCI passível de ser aplicado em diversas atividades agrícolas.

ABSTRACT

BARBOSA, Rúben Christian, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2015. **Dynamic Modeling and Development of a Controller for Automation of a Biomass Gasifier.** Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Co-advisers: Paulo Marcos de Barros Monteiro and José Helvecio Martins.

The aim of this work present the project and test automation of a gasifier fixed bed biomass competitor type. For understanding of the problem was presented the state of energy sources in the world, pointing to the use of biomass as renewable energy, a possible solution to the environmental problems of scarcity of non-renewable energy sources. Observe what, gasification is a viable project for the transformation of biomass into energy, and gasification lacks reliable and automated methods of operation. To solve the problem, proposed the implementation of an automatic controller. Six experiments, of which the first three were used for the identification and modeling of the dynamic system were performed. From modeling was estimated parameters of the automatic PID controller which is implemented with the help of an Arduino UNO. In the three following tests the driver has been tested in dynamic system. The study demonstrated the effectiveness of the controller and the approximate model of the biomass gasifier with a good quality gas and PCI that can be applied to various agricultural activities.

1. INTRODUÇÃO

No contexto global atual, os principais assuntos relativos ao uso e exploração de energia são mudanças climáticas e esgotamento das fontes de energia convencionais. Como solução para a diminuição de emissão de gases causadores das mudanças climáticas, foram propostos vários protocolos e acordos entre os países. Estes acordos visam o desenvolvimento de processos mais limpos e eficientes para a obtenção da energia, mediante o aproveitamento mais intensivo de fontes de energia renováveis.

O relatório Statistical Review of World Energy de 2015 elaborado pela British Petroleum - BP (BRITISH PETROLEUM, 2015) aponta que a maior parte das fontes energéticas utilizadas são não renováveis, e que as reservas equivalentes a serem exploradas de óleo, gás natural e carvão mineral têm estimativas de exploração de 50, 50 e 100 anos, respectivamente. A utilização dessas fontes não renováveis também é causadora de mudanças climáticas, assim como a degradação do meio ambiente e impactos à saúde humana (INTERACADEMY COUNCIL, 2010). Tais informações indicam a necessidade de desenvolvimento e aprimoramento das técnicas de produção de combustíveis renováveis. De acordo com o mesmo relatório da BP, o Brasil destaca-se como um dos principais países produtores de biocombustíveis. No comparativo com outros países, apenas os Estados Unidos produzem mais combustíveis renováveis que o Brasil.

Obter energia a partir de biomassa é considerado um processo limpo, já que o carbono liberado pelo processo de combustão é o mesmo que a biomassa retirou da atmosfera no processo de fotossíntese. Biomassa é o termo utilizado para qualquer tipo de matéria orgânica oriunda de fontes vegetais ou animais, ou de seus processos de transformação naturais ou artificiais. A biomassa tem em comum a origem direta ou indireta a partir do processo de fotossíntese, o que permite a formação periódica e a produção não limitada no tempo, considerada, dessa forma, renovável (ZHANG e SMITH, 2007).

No Brasil, a biomassa é uma fonte significativa de energia. Com a finalidade de obter energia, a utilização desta pode proporcionar vantagens, como

diversificação da matriz energética, independência externa de combustíveis fósseis, desenvolvimento sustentável, utilização de mão-de-obra local e desenvolvimento das comunidades rurais isoladas. A utilização da biomassa também é reconhecida por apresentar características vantajosas do ponto de vista ambiental, quando comparada aos combustíveis fósseis, considerando a emissão de gases do efeito estufa.

A utilização de diferentes tipos de biomassas (como eucalipto, carvão vegetal, capim-elefante, podas e aparos de jardinagem e resíduos agrícolas), com a finalidade de obtenção de combustíveis, é potencialmente viável mediante o processo de gaseificação. Países tropicais em desenvolvimento, tal qual o Brasil, tem um grande potencial de produção de biomassa para obtenção de energia (RAHMAN, MOSTAFIZ, *et al.*, 2013).

A biomassa merece atenção especial porque, no curto ou médio prazo, oferece as opções mais promissoras aos combustíveis líquidos à base de petróleo para o setor de transporte (INTERACADEMY COUNCIL, 2010).

Como processo de conversão da biomassa em energia tem-se a gaseificação, um processo termoquímico de alta eficiência e considerado limpo. As razões para utilização de gaseificação de biomassa são numerosas e dependem muito das condições locais. A gaseificação de biomassa pode reduzir a dependência de regiões e países às flutuações nos preços de combustíveis importados. Além dos motivos anteriores, existem inúmeras circunstâncias em que a gaseificação apresenta vantagens significativas sobre a queima direta de biomassa ou de combustíveis fósseis (ZANATTA, 2011).

O gás obtido a partir da gaseificação da biomassa tem diversas aplicações, como a combustão em motores alternativos de combustão interna (MACI) e turbinas a gás (TG) para geração de energia mecânica e elétrica (acionamento de máquinas de fluxo), para a geração direta de calor, ou como matéria-prima na obtenção de combustíveis líquidos, tais como diesel, gasolina, metanol, etanol, amônia, hidrogênio e outros produtos químicos (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Existe um difundido e sustentado esforço no mundo para a melhoria de projetos de gaseificadores por meio da pesquisa, inovação, desenvolvimento de protótipos e a promoção da implementação e abrangência dos campos de aplicação dessa tecnologia, principalmente direcionada para segmentos da economia, tais como geração de eletricidade, biocombustíveis líquidos e a obtenção de insumos de elevado valor agregado por meio de rotas químicas adequadas (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Na busca por melhorar a eficiência da gaseificação da biomassa, vê-se necessário o desenvolvimento de um controlador automático para o processo termoquímico de gaseificação. Tal processo é de extrema complexidade, devido ao controle necessário sobre o fornecimento do agente oxidante ao processo. A substituição do operador humano pelo controlador automático apresenta-se como uma alternativa plausível para melhorar a eficiência do processo e garantir sua repetibilidade com diversas biomassas.

Praticamente todos os aspectos das atividades diárias são afetados por sistemas de controle. A busca por repetibilidade, precisão, eficiência e confiabilidade exige um sistema de malha fechada sem a presença de um operador, ou seja, de um controlador automático.

Controle automático representa um papel vital no avanço da engenharia e da ciência. Possui uma extrema importância em sistemas de alto grau tecnológico, como sistemas de pilotagem de aviões, mísseis, veículos espaciais, dentre outros, além de ter-se tornado uma parte integrante e importante dos processos industriais e fabris modernos (OGATA, 1982).

Nas indústrias, o controle automático é utilizado para operações onde são necessários o controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e fluxo. Sistemas de controle automáticos propiciam meios para atingir desempenho ótimo de sistemas dinâmicos, bem como melhoria da qualidade e diminuição dos custos de produção.

Um controlador automático compara o valor real da saída do processo com o valor desejado, determina o desvio, e produz um sinal de controle que reduz o desvio a um valor nulo ou muito pequeno. O modo como o controlador automático produz o sinal de controle é denominado ação de controle (OGATA, 1982).

No processo de gaseificação existe a necessidade de controlar a vazão de ar fornecida para a combustão da biomassa, quando se realiza a gaseificação à razão de equivalência de ar em metros cúbicos fornecido por quilograma de biomassa, a qual deve ficar em torno de 20% a 40% da relação ar-combustível estequiométrica.

Com vistas ao aprimoramento do processo de gaseificação, o projeto centrou-se no desenvolvimento da automatização do gaseificador com o uso de um controlador proporcional integral derivativo (PID), apto a garantir melhor relação de ar-combustível possível, e conferindo-lhe confiabilidade, eficiência, menor custo, sendo enfim, mais amigável e seguro para o operador.

O trabalho foi dividido em cinco capítulos com intuito de facilitar o entendimento do leitor. O primeiro capítulo contém a introdução, enquanto o segundo capítulo faz a apresentação dos aportes teóricos do projeto, a gaseificação, sistemas de controle, controle digital, controladores, com as respectivas bibliografias.

O terceiro capítulo tem em foco a descrição da metodologia da execução do projeto, desde a identificação do sistema, modelagem, projeto do controlador, passando pelo sistema de instrumentação e atuador do sistema, até o equipamento de análise de gases.

O quarto capítulo traz o relato dos resultados obtidos com o gaseificador nas etapas de identificação do sistema, testes do controlador desenvolvido e resultado da análise dos gases.

Por fim, no último e quinto capítulo abordam-se as conclusões e discussões do projeto.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo Geral

Modelar e desenvolver um controlador automatizado de um gaseificador concorrente de biomassa.

1.1.2. Objetivos Específicos

- a) Caracterizar a biomassa como combustível;
- b) Identificar e modelar o sistema de gaseificação;
- c) Desenvolver e avaliar o desempenho de um controlador do processo de gaseificação de biomassa; e
- d) Avaliar a capacidade do sistema proposto no aproveitamento da energia da biomassa lenha.

2. APORTES TEÓRICOS

Objetivando a construção do conhecimento que viabilizasse o desenvolvimento do trabalho, realizou-se uma breve revisão teórica sobre gaseificação de biomassa, estado da arte da gaseificação, controle de sistemas dinâmicos, controle de sistemas dinâmicos utilizando-se sistemas digitais, assim como modelagem e identificação dos sistemas dinâmicos.

2.1. Gaseificação de Biomassa

Gaseificação é o processo termoquímico de converter um insumo sólido ou líquido num gás (também chamado de *producer gás* ou *gás pobre*) com características basicamente combustíveis, através de sua oxidação parcial a temperaturas intermediárias (reações termoquímicas numa faixa de temperaturas de 800 °C a 1100 °C e pressão até 33 bar), temperaturas acima da temperatura de pirólise e abaixo da temperatura de combustão (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

No processo de gaseificação são supridas quantidades restringidas de oxigênio, na forma de oxigênio puro ou simplesmente ar atmosférico, dependendo do uso final do gás. O material carbonoso sólido pode também ser gaseificado na presença de quantidades relativas de vapor de água superaquecido sendo incorporada ao agente de gaseificação, com o objetivo de produzir uma mistura gasosa conhecida como gás de síntese, rica em hidrogênio e monóxido de carbono (REZENDE, 2012).

A gaseificação utilizando ar como fonte de oxigênio produz um gás de baixo poder calorífico, de aproximadamente 5 MJ Nm⁻³, e contendo ao redor de 50% em volume de nitrogênio na mistura gasosa de saída do reator (base seca). Quando a gaseificação é realizada utilizando somente oxigênio puro ou mistura de ar com vapor de água, o gás obtido no processo tem maior poder calorífico, pois fica isento ou com baixos teores de nitrogênio livre na mistura, podendo alcançar um poder calorífico de 10 a 15 MJ Nm⁻³ (REZENDE, 2012).

O gás obtido a partir da gaseificação da biomassa tem diversas aplicações, como a combustão em motores alternativos de combustão interna (MACI) e turbinas

a gás (TG) para geração de energia mecânica e elétrica (acionamento de máquinas de fluxo), para a geração direta de calor, ou como matéria prima na obtenção de combustíveis líquidos, tais como diesel, gasolina, metanol, etanol, amônia, hidrogênio, e outros produtos químicos (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

A Figura 1 mostra um diagrama das etapas do processo de gaseificação de biomassa. A pirólise constitui a primeira fase do processo, na qual se forma carvão vegetal, alcatrão e gases. No processo, uma pequena fração da biomassa é oxidada, com a finalidade de elevar a temperatura de reação até valores compreendidos entre 800 °C e 1100 °C, dependendo principalmente da quantidade e do tipo de agente de gaseificação utilizado. Com esta oxidação é possível atingir o nível de temperatura adequado, para realizar a etapa de pirólise e para a gaseificação propriamente dita dos produtos gerados na pirólise (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

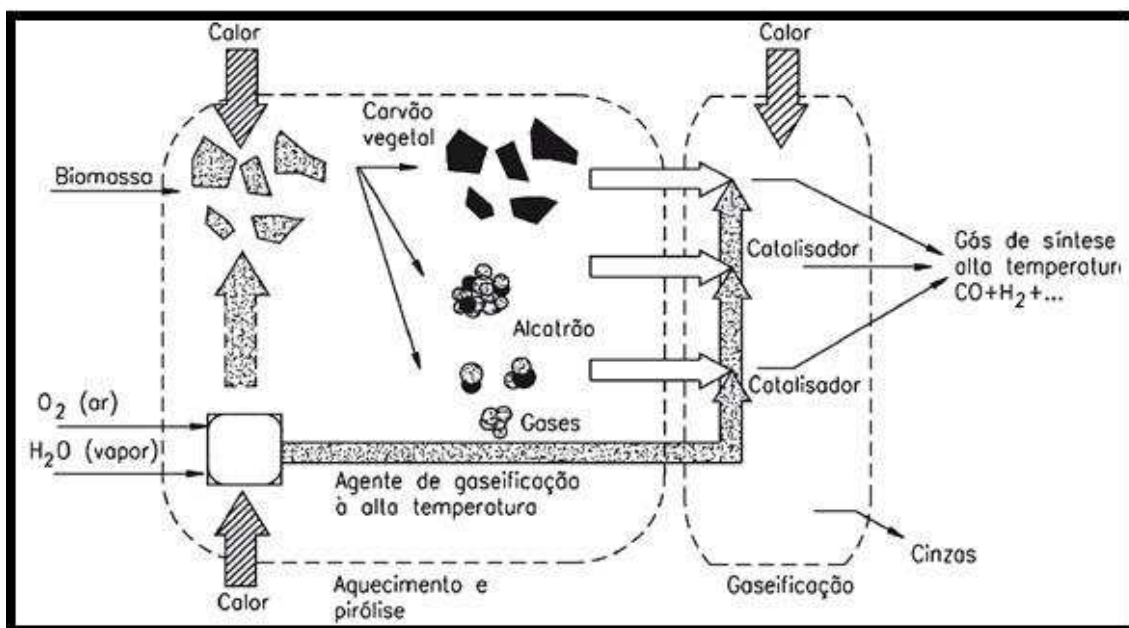


Figura 1 - Principais Etapas da Gaseificação de Biomassa (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

As razões para utilização de gaseificação de biomassa são numerosas e dependem muito das condições locais. A gaseificação de biomassa pode reduzir a dependência de regiões e países às flutuações nos preços dos combustíveis importados. Além disso, existem muitas circunstâncias em que a gaseificação

apresenta vantagens significativas sobre a queima direta de biomassa ou de combustíveis fósseis (ZANATTA, 2011).

A cogeração a partir de combustíveis sólidos via gaseificação tem sido desenvolvida para pequenas plantas com gaseificadores de leito fixo para biomassa de alta densidade acoplado a motores do ciclo Otto, e para projetos de larga escala pressurizados com carvão fóssil. Para biomassa polidispersa, recomendam-se sistemas de leito fluidizado (SCHLITTLER, GOMES, *et al.*, 2009).

Existem duas principais aplicações de gaseificação. A primeira é a geração de calor combinado com energia elétrica, onde um gás combustível de qualidade média para alta é necessário; a segunda é a obtenção de gás de síntese, de elevada qualidade que pode ser reformado em reator catalítico ou fermentativo para obtenção de combustíveis líquidos ou insumos químicos (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008)

Em relação à tecnologia, algumas considerações precisam ser feitas: a gaseificação é um processo tecnicamente mais complicado que a combustão direta de biomassa, devendo-se ter especial atenção com os aspectos de segurança, já que o gás produzido é tóxico. Deve-se considerar também que, dependendo das características termodinâmicas do sistema integrado de geração de energia, poderá haver uma redução de eficiência global do sistema como consequência do consumo de energia adicional devido ao maior número de máquinas de fluxo operando, perdas de energia pela falta de sistemas de recuperação em processos intermediários de transformação e energia (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

2.1.1. História

A gaseificação teve origem no fim do século XVIII. A forma mais antiga de produção de gás a partir de materiais orgânicos foi chamada de destilação seca. Valendo-se deste princípio, a primeira companhia de gás de carvão iniciou operações em Londres em 1812 para iluminação pública. Outro método de gaseificação, desenvolvido no século XIX, foi o chamado gaseificador contracorrente, projetado por Bishoff em 1839. Esse desenho foi modificado em

1857 por Siemens e utilizado por toda a Europa pelos cem anos seguintes (SÁNCHEZ, 2010).

O problema dos primeiros gaseificadores era a produção de alcatrão e a remoção das cinzas. Para resolver esses problemas, várias alternativas foram propostas, envolvendo a existência de duas zonas de reação e a reinjeção dos produtos da pirólise no reator para promover o craqueamento do alcatrão (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Por volta do início da Primeira Guerra Mundial, gaseificavam-se principalmente lignito e turfa, devido a abundância e a possibilidade de serem fornecidos nas especificações requeridas. Em regiões onde esses combustíveis não eram disponíveis, as instalações foram modificadas para gaseificação de biomassa. O tipo de reator mais utilizado até aquele momento era o gaseificador de leito fixo, chamado por alguns de autores de leito móvel, sendo que em operação contínua, à medida que o combustível é alimentado e as cinzas retiradas, o leito se move do topo para o fundo do reator. Com o surgimento das linhas de distribuição de gás natural, por volta de 1930, quase todas as plantas foram desativadas (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Os gaseificadores de leito fluidizado surgiram pouco antes da Segunda Guerra Mundial, e os reatores de leito arrastado também surgiram nessa época. Durante a Segunda Guerra Mundial, houve escassez de combustíveis líquidos na Europa e intensificou-se a procura por combustíveis viáveis, o que resultou no ressurgimento de muitas atividades de desenvolvimento e implantação de gaseificadores. Foram desenvolvidas pequenas unidades de gaseificação, chamadas gasogênios; tais unidades eram utilizadas em veículos (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

No final da Segunda Guerra Mundial, começaram a ser utilizados os gaseificadores operando com pressões acima da atmosférica. Mas como a Guerra chegou ao fim, o fornecimento de combustível líquido de origem fóssil se reestabeleceu e todos os veículos foram reconvertidos para o uso de gasolina e diesel (petróleo muito barato) (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Até o início da década de 70, as pesquisas para uso e melhora dos gaseificadores ficaram paradas, porém, devido às crises do petróleo em 1973 e 1979, houve um crescimento nos esforços no desenvolvimento de gaseificação de biomassa. Nessa época, o interesse maior era em unidades de pequeno porte, em especial, a do tipo topo aberto.

Durante a década de 80, pesquisas teóricas e experimentais de gaseificação de biomassa, foram intensificadas. Já na década de 90, os esforços foram para o processo de cogeração de calor e energia elétrica, abrindo porta para os sistemas de grande porte.

Como foi observado por Cortez, Lora e Gómez (2008), estudos recentes destacam como as principais barreiras técnicas da tecnologia da gaseificação de biomassa:

- a) pré-tratamento e condicionamento da biomassa polidispersa – a biomassa deve ter propriedades físico-químicas, entre outras, adequadas ao processo de conversão térmica e ter viabilidade econômica em cada etapa do seu ciclo de aproveitamento;
- b) limpeza e condicionamento do gás de gaseificação – os gases devem ser tratados e purificados física e quimicamente para seu uso posterior na geração de eletricidade e como fonte de insumo de produção de biocombustíveis líquidos e hidrogênio;
- c) controle do processo – controle operacional das emissões;
- d) materiais de construção dos sistemas – novas rotas indicam um caminho muito promissor no desenvolvimento de novos materiais para reatores, recipientes, peças, etc.;
- e) integração dos processos – trata-se da integração das plantas de gaseificação aos acionamentos primários, à rede de distribuição de energia elétrica ou diretamente ao consumidor em sistemas de geração distribuída ou, ainda, a integração das unidades de gaseificação nas biorefinarias.

Unidades de gaseificação baseadas em sistemas modulares em pequena escala estão surgindo como tecnologias muito promissoras para suprimento de

energia elétrica e utilidades, principalmente em áreas rurais muito pouco ou não atendidas pelo sistema geral de energia elétrica. As principais tecnologias de reatores utilizados, nesse caso particular, são os reatores autotérmicos, reatores onde ocorre oxidação parcial ou de aquecimento direto, em que um terço do ar estequiométrico é usado na gaseificação (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Os sistemas modulares de gaseificação em pequena escala podem ter algumas vantagens, tais como: menor impacto ambiental em relação com tecnologias de combustível fóssil; eletrificam regiões isoladas onde o custo de ligação à rede é proibitivo; podem ser sistemas flexíveis de geração de energia elétrica ou também transformados outros produtos de elevado valor agregado; podem requerer mínimo controle operacional.

2.1.2. Fundamentos Teóricos Da Gaseificação – Variáveis Envolvidas

Para determinar a composição de equilíbrio do gás produzido, deve-se realizar o modelamento do gaseificador através de equações termoquímicas. Essas equações preveem o estado de equilíbrio das reações básicas envolvidas na gaseificação em função dos principais parâmetros, pressão, temperatura, umidade do combustível, teor de oxigênio no agente gaseificador e tipo de combustível (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

No processo de gaseificação, existe uma etapa de pirólise precedendo a etapa de gaseificação, e as reações envolvidas podem ser analisadas separadamente.

O processo que a biomassa submetida à ação do calor sofre é descrito da seguinte maneira:

- 1) Pirólise – Decomposição térmica que ocorre entre 280 °C e 450 °C.

A secagem e pirólise da biomassa (com liberação da água dos voláteis e do alcatrão) ocorrem em três fases:

- evaporação da água;

- decomposição dos carboidratos (hemicelulose, celulose, lignina) entre 250 °C e 300°C;
- produção de alcatrão e ácidos leves entre 350 °C e 450 °C.

Produtos:

- gases não condensáveis (CO, CO₂, H₂, CH₄, O₂);
- carvão vegetal;
- condensado: alcatrão e ácidos.

As reações químicas que ocorrem na zona de combustão são basicamente a combinação de oxigênio do ar com o carbono e o hidrogênio.

O esquema simplificado pode ser dado por:

madeira + calor coque + gases + alcatrão + condensáveis

- 2) Gaseificação – Durante os processos de gaseificação, ocorrem principalmente reações exotérmicas de oxidação (combustão) e reações endotérmicas de redução envolvendo fases sólida e gasosa (Tabela 1):

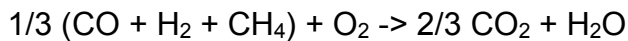
Tabela 1 – Reações da Gaseificação (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Reações heterogêneas gás-sólido	H (kJ mol ⁻¹)	Reações homogêneas gás-gás	H (kJ mol ⁻¹)
Oxidação do carbono	$C + \frac{1}{2} O_2 = CO$ -110,6 $C + O_2 = CO_2$ -393,8	$C + H_2O = CO + H_2$	-41,2
Reação de Boudouard	$C + CO_2 = 2CO$ 172,6	$CH_4 + H_2O = CO + 3H_2$	201,9
Reação de gás d'água	$C + H_2O = CO + H_2$ 131,4		
Formação de metano	$C + 2H_2 = CH_4$ -74,93		

3) Craqueamento do alcatrão

alcatrão + vapor + calor \rightarrow CO + CO₂ + CH₄ + ...

Além dessas reações, temos que destacar a oxidação de parte dos produtos da pirólise:

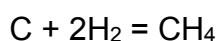
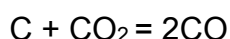


As reações de oxidação do carbono são fortemente exotérmicas, rápidas e podem ser consideradas irreversíveis nas temperaturas normais de gaseificação. As reações de Boudouard e de gás d'água são endotérmicas. A reação de Boudouard passa a ser mais importante na faixa de temperatura de 800 °C a 900 °C, ocorrendo em todo o leito, ao contrário das reações de formação de dióxido e monóxido de carbono que só ocorrem obviamente com a presença de oxigênio (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Os fatores que afetam a composição de equilíbrio dos gases são:

- temperatura;
- pressão;
- umidade;
- teor de oxigênio no agente gaseificador;
- tipo de combustível.

Em casos de leito fluidizado, com o aumento da taxa de aquecimento, aumenta a velocidade de degradação, tanto no ambiente de reação oxidante quanto inerte. Na gaseificação em leito fluidizado não se observam zonas separadas de pirólise, oxidação e redução, sendo que todos os processos ocorrem em todo o volume do leito simultaneamente. Assim a modelagem dos gaseificadores de leito fluidizado pode ser representada pelo conjunto de equações 1:



2.1.3. Variáveis do Processo

A gaseificação é um processo de oxidação parcial determinado pelas quantidades de ar e combustível introduzidas ao reator, sendo estas as principais variáveis no processo. Porém, os tipos de reatores e suas características construtivas também exercem influência no processo termoquímico de conversão do combustível.

As variáveis de maior influência sobre a gaseificação são:

1. **Fator de ar:** de acordo com a literatura sobre gaseificação em leito fixo e fluidizado, o fator ar, ou razão de equivalência, é uma das variáveis operacionais mais importantes na gaseificação com ar. Esta corresponde ao valor da relação ar-combustível real utilizada durante o processo dividida pela relação ar-combustível teórica como mostrado na equação 2.

$$F.A. = \frac{(R_{A/C})_{real}}{(R_{A/C})_{est}} \quad (2)$$

em que,

$(R_{A/C})_{est}$ = Relação ar-combustível estequiométrica

$(R_{A/C})_{real}$ = Relação ar-combustível real

A relação ar-combustível estequiométrica, em metro cúbico, em condições normais de pressão e temperatura por quilograma de biomassa, pode ser expressa em função dos dados da análise elementar do combustível (em base úmida) por meio da Equação 3.

$$\left(\frac{RA}{B}\right)_{est} = 0,0889(C^u + 0,375 \cdot S^u) + 0,265(H^u - 0,0333)O^u \quad (3)$$

em que,

RA = Quantidade de ar, Nm³;

B = Quantidade de biomassa, kg;

- C^u = Fração elementar de carbono presente na biomassa, %;
- S^u = Fração elementar de enxofre presente na biomassa, %;
- H^u = Fração elementar de hidrogênio presente na biomassa, %;
- O^u = Fração elementar de oxigênio presente na biomassa, %.

Valores típicos da análise elementar e da relação ar-combustível estequiométrica para eucaliptos considerando-se uma umidade de 15% (em base úmida) são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Análise elementar e estequiométrica para madeira de eucaliptos com 15% de umidade (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Biomassa	Análise elementar (base de trabalho)					$(R_{A/C})_{est}$
	C^u	H^u	O^u	N^u	S^u	
Pedaços de Madeira	48,09	5,98	47,67	0,08	0,00	4,33
Eucaliptos	45,97	5,81	44,42	0,30	0,00	4,15
Blocos de madeira	49,07	5,09	43,45	0,48	0,02	4,26

Fatores de ar convencionais em gaseificação de biomassa em leito fluidizado estão compreendidos na faixa de 0,2 e 0,4, sendo adequado afirmar que, no processo de gaseificação, cada quilograma de combustível precisa de 20% a 40% da quantidade de ar estequiométrica.

Em reatores de leito fixo a relação ar-combustível depende principalmente da capacidade de processamento, e, portanto, das características físicas do reator (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008). O fator de ar pode ser calculado a partir de um teste, quantificando a quantidade total de biomassa consumida, a vazão do ar e o tempo total do teste, conforme a Equação 4.

$$(R_{\%})_{real} = \frac{\dot{V}_{ar} t}{m_{biomassa}} \quad (4)$$

em que

$$R_{\%} = \text{Relação ar-combustível, Nm}^3 \text{ kg}^{-1};$$

$$\dot{V}_{\text{ar}} = \text{Vazão do agente de gaseificação, Nm}^3 \text{ s}^{-1};$$

$$t = \text{Tempo, s};$$

$$m_{\text{biomassa}} = \text{Quantidade de biomassa, kg.}$$

Por outro lado, alguns autores apresentam como fator principal a velocidade superficial do agente de gaseificação (definida como o quociente entre a vazão volumétrica de gás produzida e a área transversal do reator).

2. **Temperatura:** Na análise termodinâmica, a temperatura deve estar condicionada principalmente pelas quantidades de ar e combustível que participam na reação, isto é, pelo fator de ar utilizado. A composição elementar e as características imediatas (voláteis e carbono fixo principalmente) do combustível a ser gaseificado têm um efeito considerável sobre esta variável. Em todos os casos, durante o processo, deve-se garantir que a temperatura tenha o valor adequado para que o carbono presente no combustível seja transformado por completo e não se acumule nas cinzas, o que constitui uma “perda” de energia no sistema. A temperatura tem um efeito considerável sobre a concentração dos compostos combustíveis no gás produzido no processo de transformação termoquímica. Altas temperaturas favorecem a concentração de H₂ e CO, enquanto, a concentração de metano diminui. O que é justificado pelo Princípio de L^ê Chatelier, segundo o qual maiores temperaturas favorecem os reagentes nas reações exotérmicas, enquanto nas reações endotérmicas são favorecidos os produtos. A Figura 2 mostra o efeito da temperatura considerando-se um modelo heterogêneo.

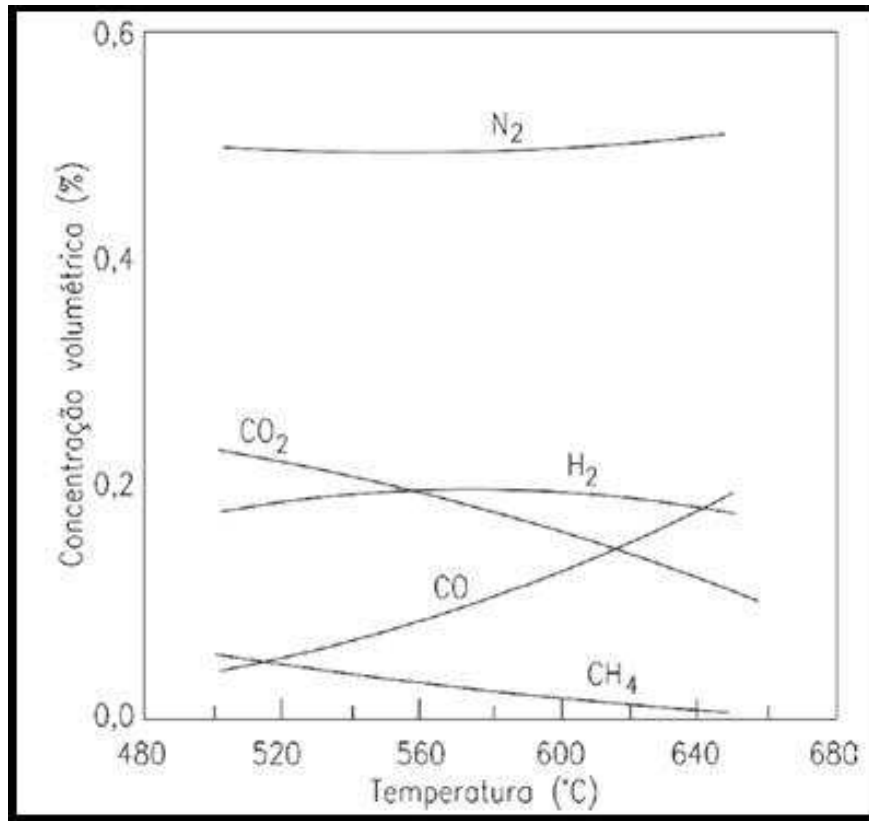


Figura 2 – Efeito da Temperatura na Composição do Gás Combustível (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Em gaseificadores de leito fixo (concorrente e contracorrente), a temperatura no interior do reator pode variar numa faixa (pela heterogeneidade decorrente das reações do processo) dando origem a regiões de alta temperatura, podendo alcançar valores até de 1200 °C. Nos reatores de leito fluidizado, a temperatura de operação está limitada pela temperatura de sinterização das partículas que compõem a mistura (inertes, cinzas), a qual dificilmente supera os 950 °C.

3. **Capacidade de produção de gás:** A vazão do gás é expressa em Nm³, representa o gás gerado por unidade de massa de combustível alimentado ao sistema. A produção de gás tem uma ligação direta com o fator de ar e o tempo de residência dos gases na zona de redução. Valores típicos para gaseificadores de leito fixo, estão em torno de 2 Nm³ kg⁻¹ de biomassa, e para leito fluidizado em torno de 1,8 e 2,5 Nm³ kg⁻¹.

4. **Composição e poder calorífico do gás produzido:** O gás produzido na gaseificação de biomassa é composto por CO₂, CO, CH₄, H₂O, N₂ e poucas quantidades de alcatrão. Pode conter também poucas quantidades de O₂. As concentrações de CO, H₂ e CH₄ estão condicionadas ao desenvolvimento das reações envolvidas na gaseificação. O agente da gaseificação tem influência considerável na composição e no poder calorífico do gás produzido.
5. **Eficiência da gaseificação:** Este parâmetro pode ser calculado de duas maneiras: a quente e a frio. A eficiência a quente corresponde ao quociente do somatório entre a energia sensível e química do gás produzido, e a energia química (poder calorífico) do combustível gaseificado. A eficiência a frio refere-se somente ao quociente entre a energia química do gás e a energia química do combustível. Para efeitos de comparação de rendimentos entre gaseificadores, a maioria dos autores prefere considerar a eficiência a frio, porque esta evita a obtenção de valores equivocados influenciados pelo calor sensível do gás.

Também é preciso considerar o efeito da composição das cinzas no processo de transformação termoquímica, devido ao caráter catalítico dos minerais presentes nela. A existência de metais nas cinzas resulta em alterações da temperatura de decomposição térmica da biomassa (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Igualmente importante no projeto de gaseificadores de leito fixo é a placa ou grelha, que sustenta a biomassa em conversão e permite retirar as cinzas produzidas no processo. A grelha permite controlar o tempo de residência da biomassa no gaseificador, assim como regula a taxa de remoção das cinzas, podendo-se até utilizar mecanismos de vibração acoplados à grelha (SCHLITTLER, GOMES, *et al.*, 2009).

Características inerentes do combustível, por exemplo, granulometria e umidade, têm efeitos igualmente importantes no processo. A umidade afeta consideravelmente a composição do gás combustível dada à redução no interior do reator, em razão da energia requerida para a vaporização da água. Teores de umidade inferiores a 20% têm influência positiva na gaseificação, sendo recomendados teores de umidade inferiores a 25% para evitar diminuição brusca na

temperatura do reator, o que tende a reduzir a velocidade de reação e a eficiência do processo (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013). A Figura 3 mostra a relação entre a umidade e a composição do gás combustível obtido no processo de gaseificação.

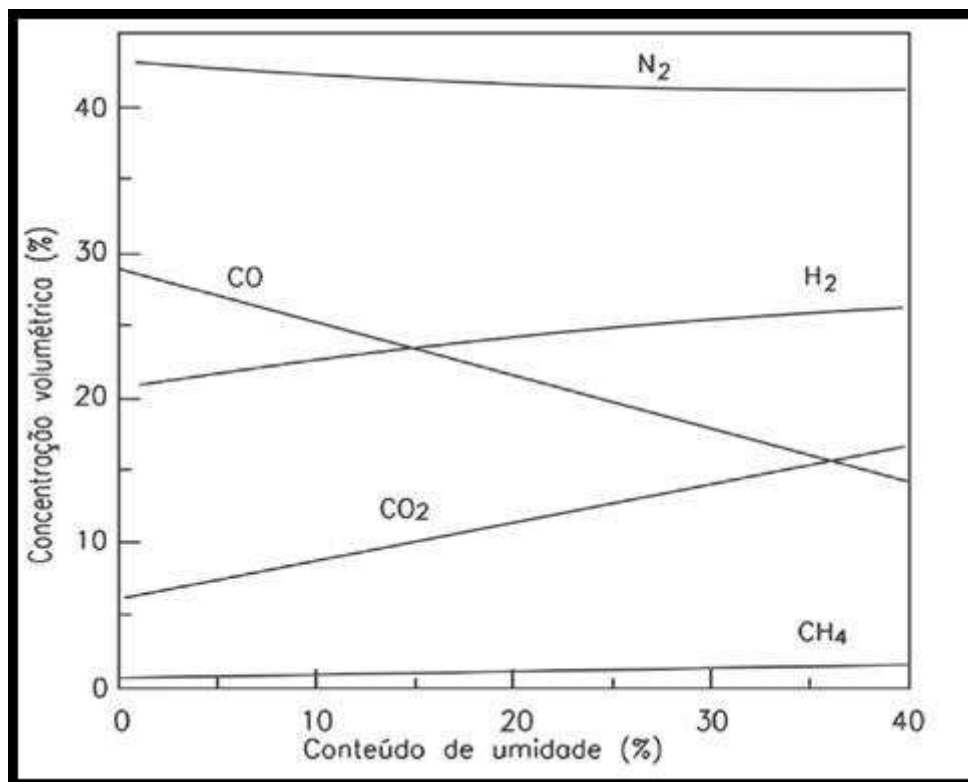


Figura 3 – Efeito da Umidade na Gaseificação de Madeira em Leito Fixo Tipo Concorrente (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

O tamanho da partícula deve ser proporcional ao comprimento da zona de gaseificação (zona de redução). Gaseificadores com pequenas zonas de reação precisam de menores tamanhos de partículas. Tamanhos menores que 2 mm favorecem o predomínio da reação química no processo de gaseificação, e diminuem a influência dos fenômenos de transferência de calor e massa. Partículas com granulometria grande favorecem a produção de alcatrão (SCHLITTLER, GOMES, *et al.*, 2009).

2.1.4. Tipos De Gaseificadores

Gaseificadores devem ser capazes de produzir um gás combustível a partir de uma grande variedade de combustíveis sem ter problemas na qualidade. Devem trabalhar de forma eficiente, com pouca atuação do operador e responder de forma

rápida às alterações de carga. Os gaseificadores permitem obter gás com poder calorífico de diferentes valores, dependendo do agente de gaseificação, que podem ser vapor de água, oxigênio ou hidrogênio.

Segundo Sánchez (2010), os gaseificadores podem ser classificados de acordo com o poder calorífico do gás produzido, gás de baixo poder calorífico (até 5 MJ Nm⁻³), gás de médio poder calorífico (de 5 a 10 MJ Nm⁻³) e gás de alto poder calorífico (maior que 10 MJ Nm⁻³), pelo tipo de agente gaseificador (ar, vapor de água, oxigênio ou hidrogênio), de acordo com a pressão de trabalho (baixa pressão ou pressurizados até 2000 kPa) e com o tipo e forma de biomassa utilizada (resíduos agrícolas, resíduos industriais, resíduos, sólidos urbanos, biomassa em natura, biomassa peletizada e biomassa pulverizada).

A classificação mais empregada é pela direção do movimento relativo da biomassa e do agente de gaseificação, que podem ser: concorrente, contracorrente, fluxo direto ou paralelo, fluxo cruzado e leito fluidizado.

Gaseificadores contracorrente

No gaseificador contracorrente, a entrada de ar fica na parte de baixo, com o fluxo ascendente de gases, contrário ao fluxo de combustível que é introduzido na parte superior e desce pelo leito pela ação da gravidade conforme é consumido na zona de combustão.

Esse gaseificador possui uma eficiência térmica alta, pois os gases quentes provenientes da zona de combustão passam pela massa de combustível (SANTOS, 2003). Tem como principal característica a simplicidade, mas com a desvantagem de produzir um gás com alto teor de alcatrão e vapor de água. Sua construção não permite o craqueamento dos alcatrões e dos produtos da pirólise na zona de combustão já que são levados para cima, sendo que tais produtos causam incrustações nas tubulações, e medidas para impedir as incrustações devem ser tomadas no projeto do gaseificador (Figura 4).

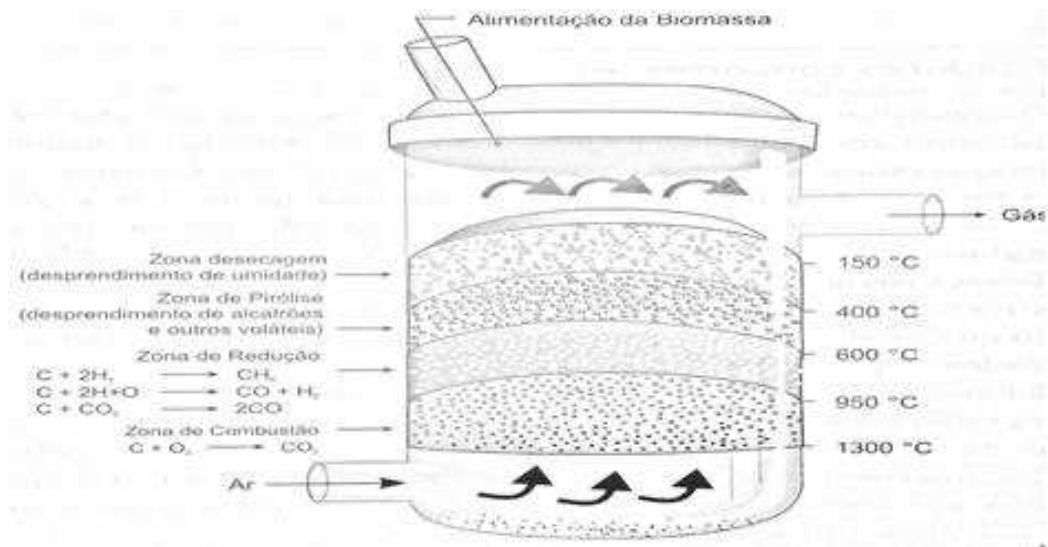


Figura 4 – Gaseificador Contracorrente (SÁNCHEZ, 2010).

No gaseificadores contracorrentes a grelha é um dos elementos de maior importância no projeto, ela suporta o material em combustão, e permite o fluxo de cinzas sem ter perda excessiva de combustível. É comum desenvolver-se grelhas com fluxos rotativos e que conseguem trabalhar em altas temperaturas (maiores que 1300 °C), para permitir a fusão das cinzas e permitir que essas passem por ela. Para a zona de combustão são utilizados materiais refratários, e recobre-se a câmara de combustão com material isolante para aumentar a eficiência térmica e proteger a partes metálicas. Os gases saem a uma temperatura próxima a 400 °C.

Esse gaseificador é o mais indicado para geração direta de calor, pois a alta concentração de alcatrões no gás impede que ele seja utilizado em motores de combustão interna sem filtragem prévia. O seu ponto forte é permitir a utilização de uma grande variedade de combustíveis, como resíduos agrícolas e municipais (SÁNCHEZ, 2010).

Gaseificadores concorrente

Para geração de força mecânica os gaseificadores mais utilizados são do tipo concorrente. Durante a Segunda Guerra Mundial, a maioria dos gaseificadores utilizados era desse tipo. Também são conhecidos como gaseificadores de fluxo direito, devido o fluxo de ar estar no mesmo sentido do fluxo do gás.

No gaseificador concorrente, a zona de combustão e redução estão posicionadas de forma invertida em relação aos gaseificadores contracorrentes. Nele, a alimentação do combustível é feita pelo topo e a alimentação de ar é feita em fluxo descendente, passando pelas zonas de combustão e redução (Figura 5).

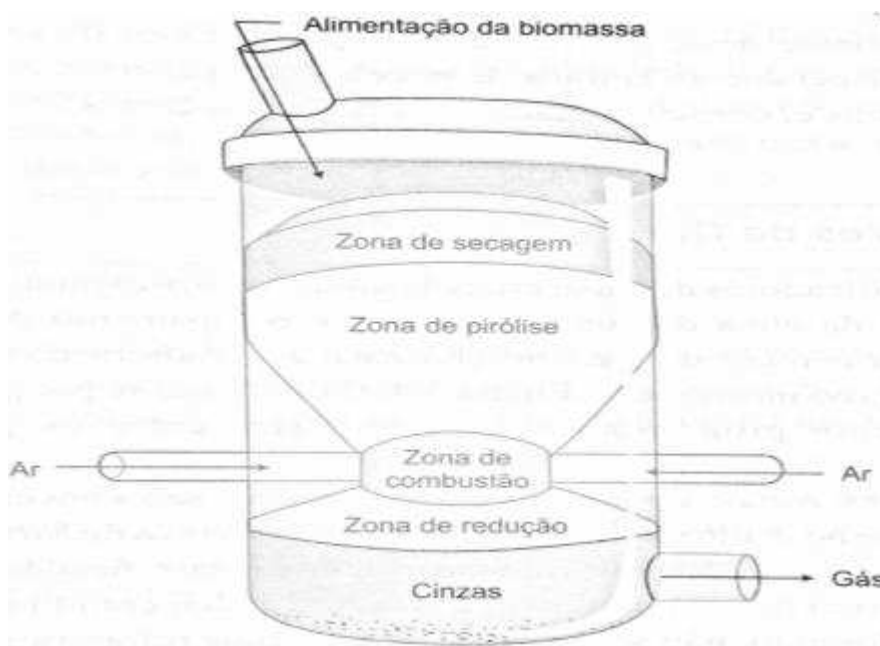


Figura 5 – Gaseificador Concorrente (SÁNCHEZ, 2010).

O projeto da zona de combustão é feito para que os alcatrões e os voláteis da zona de pirólise passem pela zona de combustão e sejam craqueados pela alta temperatura. Se forem permitidas regiões de baixa temperatura nesta zona, as substâncias voláteis poderão passar por ela sem que craqueiem, prejudicando o propósito do projeto (SÁNCHEZ, 2010).

O diâmetro interno da zona de combustão é reduzido, criando-se uma garganta. O material utilizado deve suportar altas temperaturas, normalmente utiliza-se de material cerâmico ou metálico resistente a temperaturas e corrosão. Os injetores de ar são posicionados nesta região, e são arranjados de forma a permitir uma distribuição uniforme do ar e uma temperatura adequada em toda a zona de combustão para permitir a quebra dos alcatrões. Existe um limite máximo para o diâmetro da zona de combustão, devido à temperatura ser maior próxima às entradas de ar, esse fator é o limitador da capacidade do gaseificador.

Por conta de sua liberação diretamente da zona de combustão, o gás possui uma grande quantidade de material particulado, o gás sai a uma temperatura próxima a 700 °C, pois não troca calor diretamente com as zonas de secagem e pirólise. Uma variação desse tipo de gaseificador é o de topo aberto, utilizado com biomassa polidispersa.

Combustíveis com alto teor de particulados e umidade podem atrapalhar a qualidade do gás, produzindo uma maior quantidade de alcatrões no gás de saída, já que o projeto desses gaseificadores são mais sensíveis e essas variações influem nas características do combustível.

Gaseificadores de fluxo cruzado

Em se tratando de gaseificadores de fluxo cruzado, a característica principal é a injeção de ar diretamente no centro da zona de combustão (Figura 6). O gás é retirado lateralmente na mesma altura do leito em que é injetado o ar. A característica do gás combustível é intermediária entre o gaseificador contracorrente e o gaseificador concorrente.

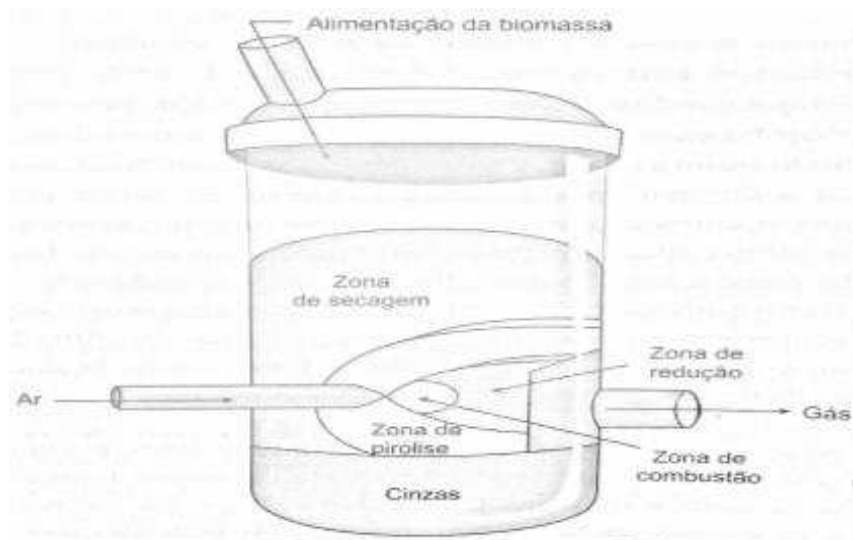


Figura 6 – Gaseificador de Fluxo Cruzado (SÁNCHEZ, 2010).

A taxa de ar é consideravelmente maior que nos outros tipos de gaseificadores. Desta forma, as zonas de combustão e redução têm uma

temperatura maior, com liberação rápida de gases, tornando dispensável utilizar materiais refratários para essa região.

As principais vantagens desse tipo de gaseificador são: rápida resposta às variações de carga, simplicidade de construção e peso reduzido. A desvantagem é a alta sensibilidade a variações de umidade do combustível; para fins práticos, sempre é usado carvão vegetal limpo e seco (SÁNCHEZ, 2010).

Gaseificadores de leito fluidizado

Com relação ao gaseificador de leito fluidizado, a concepção mais simples consiste em um recipiente vertical que, no interior, contém uma mistura de partículas combustíveis, e, quando necessário, de material inerte suportada por uma placa distribuidora (Figura 7). O agente gaseificante é previamente pressurizado e forçado a atravessar a placa distribuidora no sentido ascendente e em quantidade suficiente para conseguir que a força de arrasto do escoamento do fluido supere o peso dos sólidos e promova queima parcial do combustível (SÁNCHEZ, 2010).

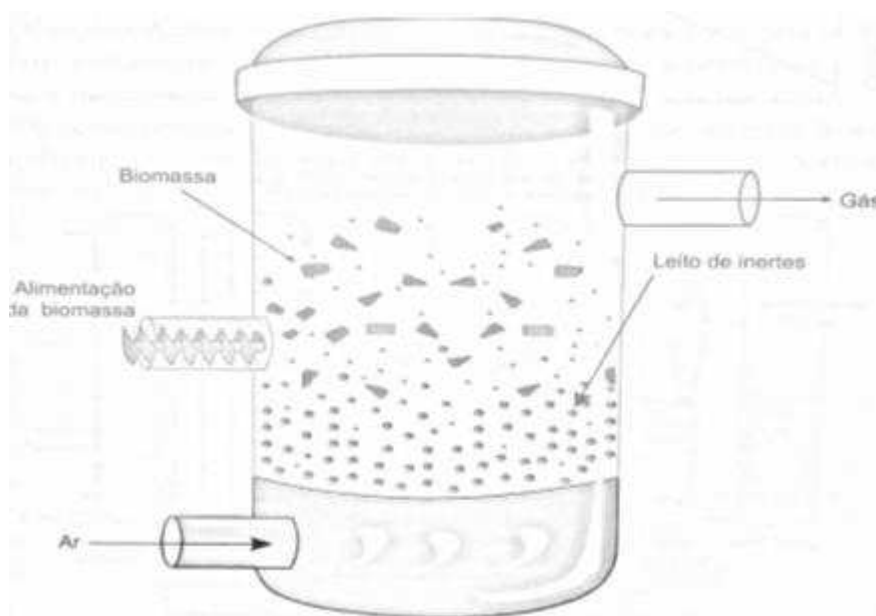


Figura 7 – Gaseificador de Leito Fluidizado (SÁNCHEZ, 2010).

O sistema gás-sólido de um gaseificador de leito fluidizado pode apresentar diferentes estados de fluidização após ultrapassar o leito estacionário, dependendo da velocidade superficial do agente gaseificante (U) (Figura 8).

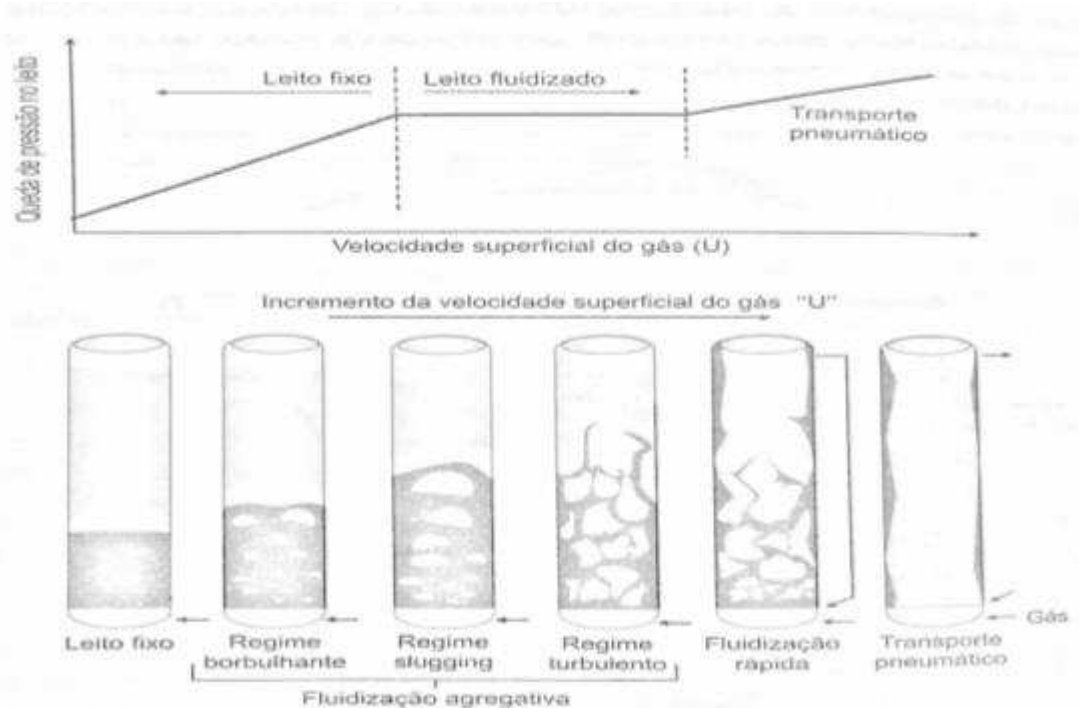


Figura 8 – Regimes de Fluidização em Função da Velocidade do Gás (SÁNCHEZ, 2010).

Até o ponto de fluidização incipiente, o leito sofre expansão leve e uniforme, e, após este estado, a altura da superfície superior do leito cresce dependendo dos fenômenos de formação, desenvolvimento e destruição de bolhas de gás no interior da coluna. As bolhas são responsáveis pela recirculação das partículas e do nível de intensificação da mistura gás-sólido dentro do leito, caracterizando os regimes de fluidização agregativa (borbulhante, pistonada ou *slugging* e turbulenta). Quando a velocidade do gás é suficiente para elutriar uma porção do leito ou todas as partículas do leito, iniciam-se os regimes de fluidização rápida e transporte pneumático, nesse regime o número de bolhas se torna praticamente nulo com o leito de partículas sendo constituído em maior parte por uma emulsão gás-sólido.

As condições de fluidização causam uma temperatura homogênea em todo o leito, e a maioria dos voláteis estarão em contato com a partículas do leito, o que contribuirá para melhorar o rendimento da conversão sólido-gás combustível.

Os reatores de leito fluidizado podem ser classificados quanto à configuração da câmara de reação. As duas categorias principais são leito fluidizado borbulhante e circulante, a Figura 9 mostra o arranjo básico destes gaseificadores.

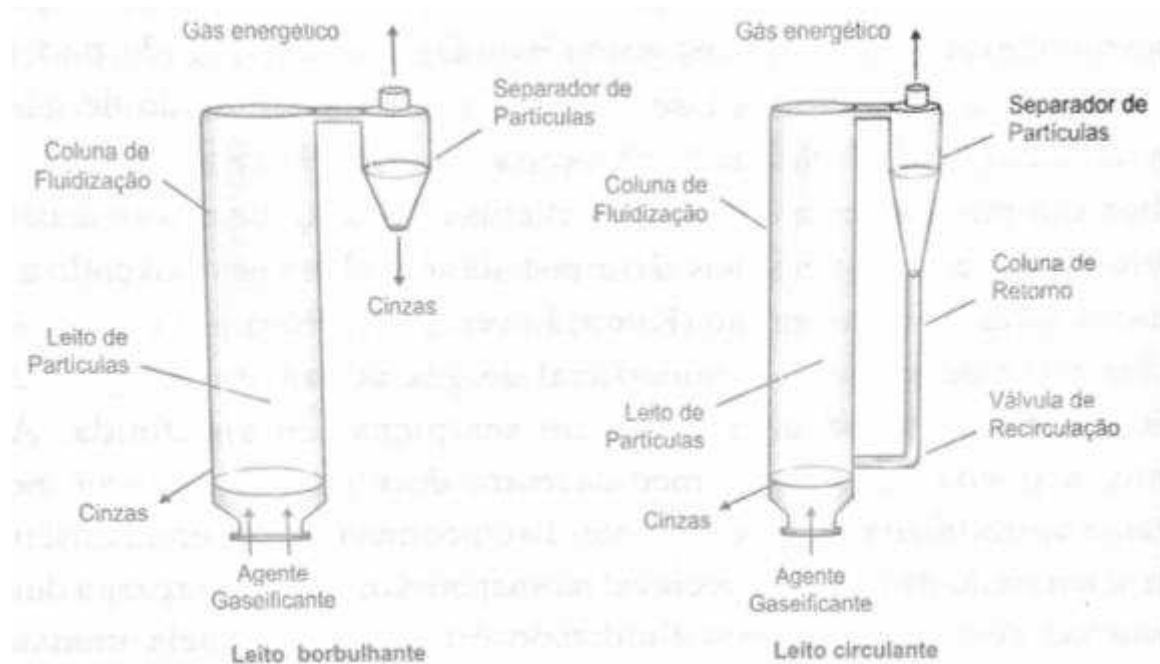


Figura 9 – Configuração Básica dos Gaseificadores de Leito Fluidizado (SÁNCHEZ, 2010).

2.2. Controle de Sistemas Dinâmicos

Somos afetados em praticamente todas as nossas atividades diárias por sistemas de controle. Atividades que necessitam de repetibilidade, precisão, confiança, eficiência necessitam de sistemas de controle de malha fechada, sem a presença de operadores, ou seja, utilizam um controlador automático. Sistemas de controle automáticos são datados de dois séculos antes de Cristo. O mais antigo relato é o de um relógio de água, que media o tempo pelo volume de água acumulada no reservatório inferior, o qual recebia pingos com uma vazão constante de um reservatório superior. Tal vazão só era possível devido a uma válvula flutuante que garantia o mesmo nível de água no primeiro reservatório. Esta válvula era o sensor e atuador do sistema (HEY, 1997).

Como exemplos de sistemas típicos de controle, pode-se citar: ato de guiar um automóvel (malha fechada); ato de utilizar um liquidificador (malha fechada); ato de utilizar uma máquina de lavar (malha aberta); ato de utilizar um micro-ondas (malha aberta).

Para entender os sistemas de controle, é necessário o conhecimento de algumas denominações básicas na Teoria de Controle. Tais denominações são utilizadas por autores como Ogata (OGATA, 1982):

- Planta: é definida como sendo a parte do sistema a ser controlada. Ex.: reator químico, caldeira, gerador etc.
- Processo: é definido como sendo a operação a ser controlada na planta. Ex.: processo químico, físico, biológico.
- Perturbações: são sinais que tendem a afetar o valor da saída de um sistema. Se a perturbação é gerada dentro do sistema, ela é denominada interna. Caso contrário, é considerada como sinal de entrada do sistema.
- Controle realimentado: é a operação que a presença de perturbações externas, tende a reduzir a diferença entre a saída do sistema e a entrada de referência.
- Sistema de controle realimentado ou malha fechada: é um sistema que tende a manter uma relação preestabelecida entre o sinal de saída e a entrada de referência, comparando-as e utilizando a diferença entre estes sinais como um meio de controle do sinal de saída. Ex.: sistemas de controle de temperatura.

No controle em malha fechada, o sinal de erro, que é a diferença entre o sinal de referência e o sinal de saída realimentado, é introduzido no controlador que atua na planta ou processo de forma a reduzir o erro e manter a saída dentro do valor desejado (Figura 10). Controle em malha fechada pode ser de dois tipos, automático ou manual. No controle automático, o operador é substituído por dispositivos mais precisos.

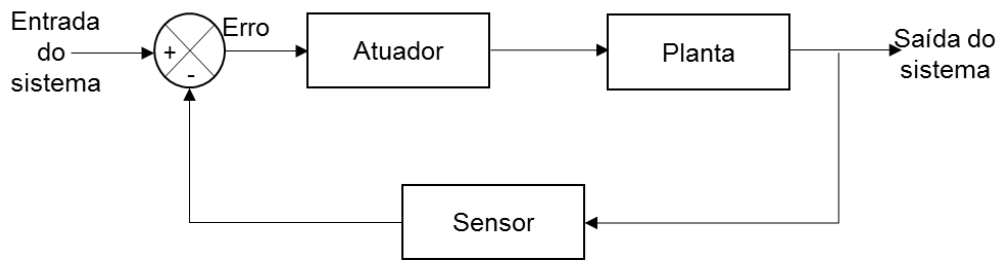


Figura 10 – Sistema em Malha Fechada.

Já em sistemas de controle em malha aberta, a saída não tem efeito na ação de controle, a saída não é medida nem realimentada para comparação com a entrada (Figura 11). Para cada entrada e referência haverá uma condição preestabelecida de operação. Qualquer sistema que opere em uma base de tempo é um sistema de malha aberta. Recomenda-se utilizá-lo, quando se conhece a relação entre a entrada-saída e o sistema não apresentar nenhum tipo de perturbação.

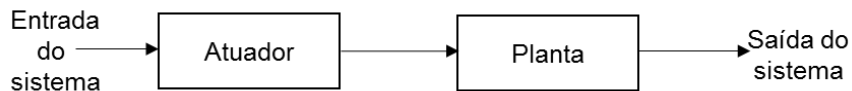


Figura 11 – Sistema em Malha Aberta.

Sistemas em malha fechada nem sempre são aconselháveis, devem ser analisados e projetados com grande cuidado, já que problemas com instabilidade podem ser gerados.

Além da classificação quanto à realimentação, sistemas de controle também podem ser classificados no que se refere a aspectos como linearidade, variação dos parâmetros no tempo, disponibilidade das variáveis no tempo, quanto ao número de entradas e saídas.

Os sistemas de controle podem ser classificados em linear e não linear, e essa classificação é que diz se o sistema permite a aplicação do princípio da superposição. Na prática, os sistemas físicos existentes são não lineares, entretanto, limitando-se os módulos dos sinais de controle a uma certa faixa de valores, na qual o sistema exibe uma resposta linear, esse sistema pode ser dito linear. Fora da faixa linear, o sistema é dito não linear.

Sistemas de controle também podem ser classificados como variante no tempo e invariante no tempo. Essa classificação leva em conta a característica estacionária de seus parâmetros em relação ao tempo. Se os parâmetros de um sistema são estacionários com relação ao tempo, o sistema é dito invariante no tempo. Isto significa que a resposta do sistema é independente do instante de tempo no qual a entrada é aplicada. No caso oposto, o sistema é variante no tempo. Por outras palavras: seus parâmetros variam com o tempo e a resposta do sistema depende do instante de tempo no qual a entrada é aplicada. Um exemplo é o controle de um foguete, no qual a massa do foguete diminui com o tempo.

Um sistema de controle também pode ser dito contínuo ou discreto. Essa classificação diz respeito à disponibilidade das variáveis no tempo. Em um sistema de controle contínuo, todas as variáveis do sistema são conhecidas em todos os instantes de tempo. Um sistema é dito discreto, quando pelo menos uma variável do sistema só é conhecida em alguns instantes de tempo.

A classificação de sistemas de controle do tipo “uma entrada e uma saída” (SISO) e sistemas de controle do tipo “múltiplas entradas e múltiplas saídas” (MIMO) leva em conta o número de entradas e saídas de um sistema. Um exemplo de sistema de controle do tipo SISO é o controle de velocidade de um motor elétrico, onde a entrada é a velocidade desejada e saída é a velocidade atual. Já um sistema de controle de pressão e temperatura de uma caldeira representa um sistema de controle MIMO, que apresenta duas grandezas de entrada e de saída (pressão e temperatura).

Sistemas de controle podem ser tratados como clássicos, ou seja, utilizam do conceito de função de transferência, onde a análise e o projeto de um sistema são feitos no domínio da frequência, isto é, no domínio “S”. Esta abordagem fornece resultados satisfatórios para sistemas do tipo SISO. Uma metodologia também bastante utilizada é a da teoria de controle moderno, baseada na abordagem de espaço de estado, que utiliza conceitos de matriz de transferência e a análise e projeto do domínio do tempo.

Sistemas de controle são desenvolvidos para atender requisitos básicos. A exigência fundamental de um sistema de controle é ser estável, isto é, deve apresentar estabilidade absoluta. Deve, também, ter uma boa estabilidade relativa, o que significa ter velocidade de resposta rápida e esta apresentar um bom amortecimento. Também deve reduzir o erro para zero, ou um valor aceitável (HEY, 1997).

Para projeto e análise de sistema de controle torna-se indispensável a modelagem matemática dos sistemas dinâmicos. A natureza dos componentes presentes em diversos sistemas de controle é distinta. Por exemplo, temos dispositivos eletromecânicos, pneumáticos, hidráulicos, eletrostáticos, etc. O método utilizado para viabilizar a análise dos componentes é a substituição destes, pelos modelos matemáticos respectivos.

Ao buscar projetar um sistema de controle, um dos grandes problemas é deparar com a dificuldade na obtenção dos modelos matemáticos precisos para os dispositivos físicos. Os modelos são responsáveis por representar os aspectos essenciais destes dispositivos. A análise do desempenho do sistema baseado no seu modelo matemático deve apresentar precisão aceitável, sendo possível representar distintos sistemas com o mesmo modelo matemático.

Por ser fácil manipular e analisar sistemas lineares, em muitos dispositivos em que a entrada-saída não são lineares, normalmente são linearizados em torno do ponto de operação mediante as técnicas disponíveis.

2.2.1. Controladores

São muitos os tipos de controladores utilizados em sistemas dinâmicos, desde controladores básicos como *On-off* (liga-desliga), até controladores baseados em lógica nebulosa e redes neurais. Para a escolha de controlador, diversos parâmetros são analisados, como por exemplo o retorno financeiro e a capacidade de manter o sistema dinâmico dentro das especificações.

A decisão do tipo de controlador a usar numa determinada aplicação não tem uma resposta correta. Idealmente, o controlador mais simples que satisfaça a

“resposta desejada” é o que deve ser escolhido, mas infelizmente esta é uma escolha que geralmente só se pode fazer quando a aplicação é simples ou quando existe alguma informação relativa a aplicações semelhantes (LOURENÇO, 1997).

Os tipos de ação mais básicas de controladores utilizados na indústria podem ser Proporcional, Proporcional-Integral, Proporcional-Derivativa e Proporcional-Integral-Derivativa (PID). Para projetar um controlador é interessante analisar as ações de controle e sua contribuição para a resposta de um sistema.

1 – Ação Proporcional

No controlador de ação proporcional a relação entre a sua saída e o sinal de erro, $e(t)$ é dada por $u(t)=K_p e(t)$, em que K_p é designado por ganho proporcional. Um controlador proporcional (P) consiste essencialmente num amplificador com ganho ajustável.

Uma característica importante desta ação de controle é a existência de um erro residual permanente sempre que ocorre uma alteração de carga, e o sistema que se pretende controlar seja do tipo 0 (sem integradores). O erro estacionário que é dependente de K_p e da carga, pode ser minimizado por um aumento de K_p . No entanto, o aumento desse parâmetro causa um aumento no tempo de acomodação e eventualmente pode causar instabilidade.

2 – Ação Proporcional – Integral

A saída de um controlador proporcional-integral (PI) é função do erro e da integral do erro. Ela é dada por $u(t)=K_p \cdot (e(t)+T_i^{-1} \cdot \int e(t)dt)$. Em que T_i (tempo integral), o tempo necessário para que a contribuição da ação integral iguale a da ação proporcional, é expresso em segundos ou minutos.

A componente integral adiciona um polo na origem da função de transferência do controlador, tal polo elimina o erro estacionário de posição, independente do sistema que se pretende controlar, caso esse seja linear. Apesar de eliminar o erro

estacionário, a ação integral aumenta o tempo de estabelecimento e piora a estabilidade relativa do sistema.

Como consequência, o ganho da ação proporcional deve ser reduzido sempre que é associado com a ação integral. O PI é utilizado em sistema com frequentes alterações de carga, sempre que o controlador P, não seja capaz de reduzir o erro de regime permanente a valores aceitáveis. O sistema deve ter alterações de carga relativamente lentas, para evita oscilações induzidas pela ação integral.

3 – Ação de Controle Proporcional – Derivativa

No controlador proporcional-derivativo (PD), o sinal de controle $u(t)$ é proporcional ao erro e e à sua taxa de variação: $u(t) = K_p e(t) + K_p T_d de(t)/dt$, em que T_d (tempo derivativo), o período de tempo antecipado pela ação derivativa relativamente a ação proporcional, é expresso em segundos ou minutos.

O modo derivativo não pode ser utilizado sozinho, a ação de controle derivativa é proporcional à taxa de variação do erro, respondendo apenas em regimes transientes. A adição do modo derivativo ao modo proporcional resulta num controlador altamente sensível, uma vez que aquele primeiro, ao responder a uma taxa de variação do erro, permite correções antes deste ser elevado. O modo derivativo não afeta diretamente o erro estacionário, adiciona amortecimento ao sistema, melhora a estabilidade e permite o uso de K_p mais elevados. O inconveniente deste modo é o de amplificar o ruído de alta frequência.

4 – Ação de Controle Proporcional – Integral – Derivativa

A junção dos modos proporcional, integral e derivativo permite a construção do controlador proporcional-integral-derivativo (PID). Tem-se, então, vantagens e desvantagens de um PI e as vantagens de um PD. A saída do controlador é dada por: $u(t) = K_p (e(t) + T_i^{-1} \int e(t) dt + T_d de(t)/dt)$.

Neste controlador, o modo integral é usado para eliminar o erro estacionário causado por grandes variações de carga. O modo derivativo, com seu efeito

estabilizador, permite um aumento do ganho e reduz a tendência para oscilações, o que leva a uma velocidade de resposta melhorada em relação com o P e o PI.

Os efeitos na resposta do sistema em malha fechada de se adicionar os modos proporcional, integral e derivativo são listados na Tabela 3.

Tabela 3 – Efeitos na Resposta do Sistema em Malha Fechada (LOURENÇO, 1997).

Resposta	Tempo de Subida	OverShoot (sobreelevação)	Tempo de Acomodação	Erro em regime permanente
Proporcional	Diminuição	Aumento	Sem alteração	Diminuição
Integral	Diminuição	Aumento	Aumento	Elimina
Derivativo	Sem alteração	Diminuição	Diminuição	Sem alterações

As correlações não são exatas, uma vez que, se alterarmos um dos parâmetros do controlador haverá forte probabilidade de alteração do efeito das outras ações. Por esta razão, a Tabela 3 deve ser usada apenas como referência quando se está a determinar os parâmetros do controlador.

A seleção do controlador deve depender das condições operativas do sistema e de especificações de performance, como, por exemplo, o erro estacionário máximo, o *overshoot* máximo e o tempo de acomodação permitido. Se o erro estacionário não é tolerado, então o modo integral deve ser incluído no controlador, uma vez que esta é a única ação que o permite eliminar ou reduzir. A necessidade da ação derivativa pode ser ditada por um *overshoot* máximo e/ou tempo de acomodação. Se um reduzido erro estacionário não é crítico para as condições operativas do sistema, então é possível omitir o modo integral, e o uso do modo derivativo depende entre outros fatores da necessidade ou não de adicionar ganho suplementar ao modo proporcional (LOURENÇO, 1997).

Como regra geral, pode-se afirmar que se adiciona o modo proporcional para obter um determinado tempo de subida, que se adiciona o modo derivativo para

obter um determinado *overshoot* e que o modo integral só deve ser introduzido para eliminar o erro estacionário.

2.2.3. Identificação de Sistemas

Identificação de sistemas é o termo genérico empregado para descrever o conjunto de ferramentas matemáticas e algoritmos que permitem construir modelos dinâmicos de processos ou sistemas, a partir de dados medidos experimentalmente (AGUIRRE, 2007).

Neste contexto, um modelo dinâmico é uma descrição matemática do comportamento dinâmico de um sistema ou processo. Exemplos:

- processos físicos como movimento de um corpo em queda livre sob a influência da gravidade;
- processos econômicos, como mercados de ações que reagem a influências externa.

Para descrever o processo de um corpo em queda livre seria possível, em princípio, construir um modelo do tipo caixa branca, baseado em princípios fundamentais (neste caso nas Leis de Newton). Mas, na maioria dos casos, a obtenção de modelos seguindo esta abordagem é de grande complexidade ou mesmo impossível em razão da complexidade inerente à maioria dos processos reais.

Há dois procedimentos básicos para identificação de sistemas. O primeiro é a identificação analítica de sistemas ou modelagem fenomenológica (caixa branca), que envolve a análise dinâmica do sistema físico e o desenvolvimento de um modelo matemático para o mesmo a partir da física do processo; o segundo é a identificação computacional de sistemas ou modelagem empírica (caixa preta/cinza), que envolve coleta de dados das características de entrada e saída do sistema e utilização destes para obtenção de um modelo matemático que aproxima este comportamento observado (AGUIRRE, 2007).

Em resumo, o método caixa preta/cinza pode ser descrito através da seguinte metodologia:

- medir todas as variáveis externas que afetam o sistemas em questão (entradas);
- medir todas as variáveis que caracterizam o comportamento do sistema (saídas);
- estabelecer uma relação entre elas sem entrar nos detalhes do que ocorre internamente no sistema.

Esta abordagem é chamada identificação de sistemas. Como foram citados anteriormente, existem dois tipos comuns na área de identificação de sistemas:

- modelo caixa cinza: embora as peculiaridades do que está ocorrendo internamente ao sistema não seja totalmente conhecidas, é possível construir um modelo parcial baseado na experiência e nos dados experimentais;
- modelo caixa preta: nenhum modelo prévio é conhecido. A maioria dos algoritmos de identificação de sistemas é deste tipo.

Uma razão para a obtenção do modelo matemático de um sistema dinâmico é a necessidade de existência deste modelo para que se possa desenvolver um controlador para o sistema dinâmico. Uma vez que não é possível controlar o que não se conhece.

A tarefa clássica de identificação a partir de dados amostrados (modelagem empírica) pode ser representada pelos passos básicos:

- planejamento experimental - determina as variáveis relevantes e o método de amostragem a ser utilizado;
- seleção da estrutura do modelo - seleção da estrutura do modelo e definição dos parâmetros passíveis de serem ajustados, chamados parâmetros livres;
- estimação de parâmetros - ajuste dos parâmetros livres usando as estatísticas obtidas dos dados;
- validação - avaliação do desempenho do modelo para dados de teste, ou seja, dados não empregados durante o processo de ajuste dos parâmetros.

Na Figura 12 pode-se observar um esquema para identificação computacional de sistemas ou modelagem empírica, tomando um sistema dinâmico de tempo discreto, em que o erro entre a saída produzida pelo sistema dinâmico é empregado no ajuste dos parâmetros livres do modelo matemático (ZUBEN, 2010).

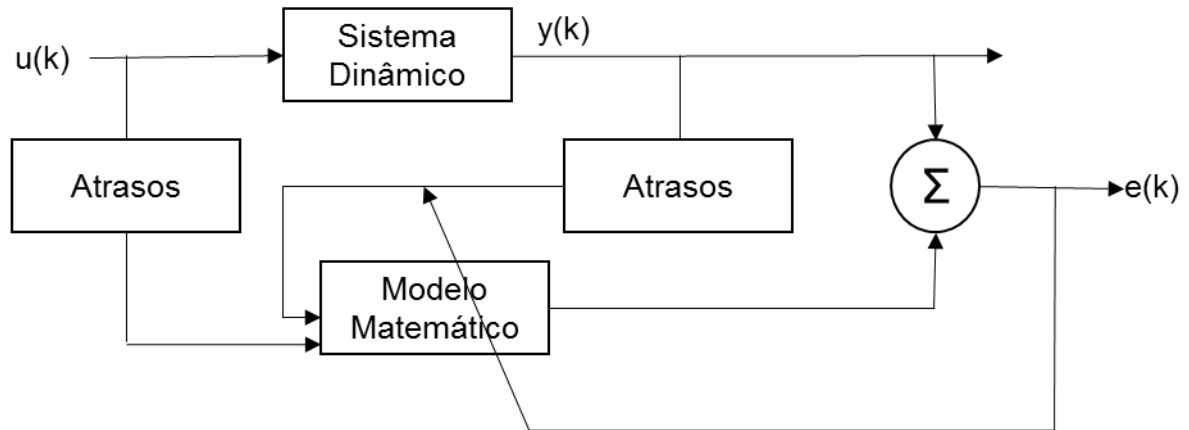


Figura 12 - Diagrama para modelagem empírica

A avaliação do modelo requer que o projetista escolha a estrutura final do modelo, envolve selecionar o tamanho do modelo. Deve verificar, ainda, se o modelo é bom o suficiente para a aplicação em questão, isto é, simular e analisar os resultados para os dados de validação, comparação e análise residual.

O processo de escolha da estrutura do modelo depende do conhecimento sobre o sistema *a priori*, modelos *Black-box* são estruturas flexíveis com considerável poder de aproximação, utilizados quando não se tem conhecimento *a priori*. Modelos *Grey-box*, são estruturas *Taylor-made*, feitas sob medida para incorporar o conhecimento *a priori*: equações diferenciais estruturadas com alguns parâmetros desconhecidos. Deve-se observar também se a saída é em função da entrada linear ou não-linear. Pode-se, ainda, descrever como a saída é afetada por perturbações.

As estruturas para modelos podem ser (MOREIRA, COSTA e SANTOS, 2002):

- Modelos Lineares Paramétricos: Modelos de entrada/saída (função de transferência), Modelos de Espaço de Estados;
- Modelos Lineares Não-paramétricos: Modelo de Resposta a Impulso, Modelo de Resposta a Frequência;
- Modelos de Processos; e
- Modelos Não-lineares.

No caso dos modelos lineares paramétricos do tipo função de transferência (FT), o modelo é definido por zeros e polos (representada por polinômios). No caso dos modelos lineares de espaço de estados (SS) os parâmetros são definidos pela quantidade de estados (representada por matrizes). Ambos são apenas formas que descrevem uma equação diferencial linear que relaciona a entrada (u) com a saída (y).

Um outro aspecto importante nos modelos é a informação de atraso (delays/lags). Atraso do sistema relaciona quantas amostras são necessárias até que uma mudança em u seja perceptível em y .

Conhecer a natureza das perturbações pode ajudar a estimar os parâmetros do modelo e prever o comportamento do sistema. A técnica para identificação é tratar uma fonte de perturbação como uma entrada não observada. Suas propriedades são caracterizadas estatisticamente: média; covariância.

2.3. Controle Digital

Neste tópico, procedeu-se uma revisão teórica de todos os conceitos que ajudem a entender como funciona o controle utilizando *softwares* e *hardwares*.

O controle digital é um controle de tempo discreto, que é entendido como a implementação de sistemas de controle utilizando placas de aquisição de dados capazes de medir uma determinada quantidade de sinais analógicos, processá-los e devolvê-los ao meio ambiente.

Num sistema de controle de tempo contínuo em realimentação, todos os sinais envolvidos são sinais contínuos, e o sistema de controle e a planta podem ser

escritos no domínio de Laplace. Já os sistemas de controle em tempo discreto envolvem a discretização de uma ou mais variáveis do processo de controle. Usualmente, um sistema de controle em tempo discreto envolve a utilização de um computador em conjunto com uma placa de aquisição de dados para implementação do controlador. Implica, que ocorra pelo menos uma passagem do tempo contínuo para o tempo discreto, denominada discretização ou amostragem do sinal, uma passagem do tempo discreto para o contínuo, chamada reconstrução.

A implementação em tempo real de controle para um sistema de controle em tempo discreto em realimentação onde o controlador é implementado em tempo discreto pode ser observado na Figura 13.

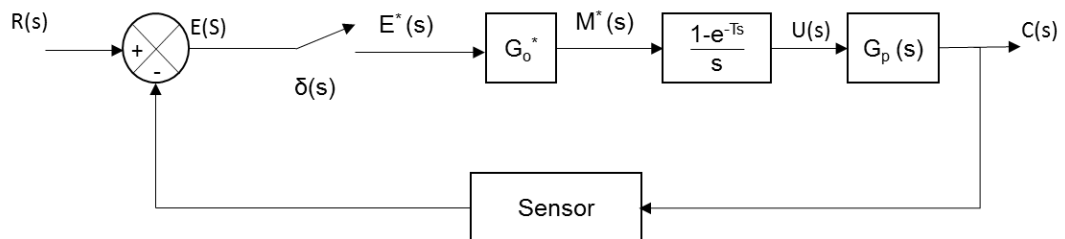


Figura 13 – Sistema de Controle em Malha Fechada em Tempo Discreto.

Sistemas de tempo discreto utilizam o conceito de transformada Z.

O controlador PID digital, ou seja, discretizado, pode ser representado pela equação 5 (OGATA, 1995). A equação de discretização depende do tempo de amostragem (T), do ganho proporcional do controlador (K), do tempo integral (T_i), do tempo derivativo (T_d).

$$PID = K_p + \frac{K_i}{1-z^{-1}} + K_d(1-z^{-1}) \quad (5)$$

em que,

K_p é o ganho proporcional = K – (KT 2T_i⁻¹);

K_i é o ganho integral = KT T_i⁻¹; e

K_d é o ganho derivativo = KT_d T⁻¹.

Sistemas de controle em tempo discreto são implementados em sistemas digitais, ou seja, microprocessados ou microcontrolados. Para o perfeito entendimento acerca dos sistemas que utilizam microcontrolador e microprocessador, torna-se indispensável explicar alguns conceitos básicos de programação e computação.

Programar é fornecer uma sequência de comandos ou instruções que devem ser seguidas pela máquina para a execução de uma tarefa. Antes da invenção dos microprocessadores, era necessária a construção de complexos circuitos de controle para diversas máquinas ou sistemas, e que uma vez construídos, eram de difícil modificação. Atuando somente na tarefa em que eles foram construídos para controlar. Com a criação do microprocessador, foi permitida a fácil modificação da sua programação, para melhor atender às necessidades que possam aparecer.

O microcontrolador é constituído de um microprocessador, memória e periféricos de entrada/saída e pode ser programado para funções específicas, como, a títulos de exemplo, para o controle de máquinas e diferentes automações (BALL, 2002).

2.3.1. Família Arduino

Arduino é uma plataforma *open-source* de prototipagem eletrônica baseada flexibilidade, de *hardware* fácil de usar e *software* fácil de programar. É destinado a artistas, *designers*, *hobbyists*, e qualquer pessoa interessada em criar objetos ou ambientes interativos.

A plataforma microcontrolada utiliza-se de uma camada simples de *software* implementada na placa, que é um *bootloader*, e uma interface amigável no computador que utiliza a linguagem *Processing*, baseada na linguagem C/C++, a qual é *open source*. Através do *bootloader* dispensa-se o uso de programadores para o *chip* (no caso a família AVR do fabricante ATMEL) facilitando ainda mais o seu uso, uma vez que não exige compiladores ou *hardware* adicional (MCROBERTS, 2011).

A família Arduino possui diversos modelos de placas microcontroladas, desde as mais simples com microcontroladores com arquitetura AVR de 8 Bits, até microcontroladores com arquitetura ARM de 32 Bits. Vale citar os modelos UNO Rev.3 e o DUE como exemplares desses extremos.

A plataforma Arduino UNO (Figura 14) apresenta restrições de memória, mas ainda assim possui uma ampla capacidade de leitura de variáveis externas a partir das suas portas analógicas e uma grande capacidade de atuação a partir de suas saídas PWM e saídas digitais. Conta com 6 entradas analógicas, 1 UART, 12C, SPI e 6 PWMs.

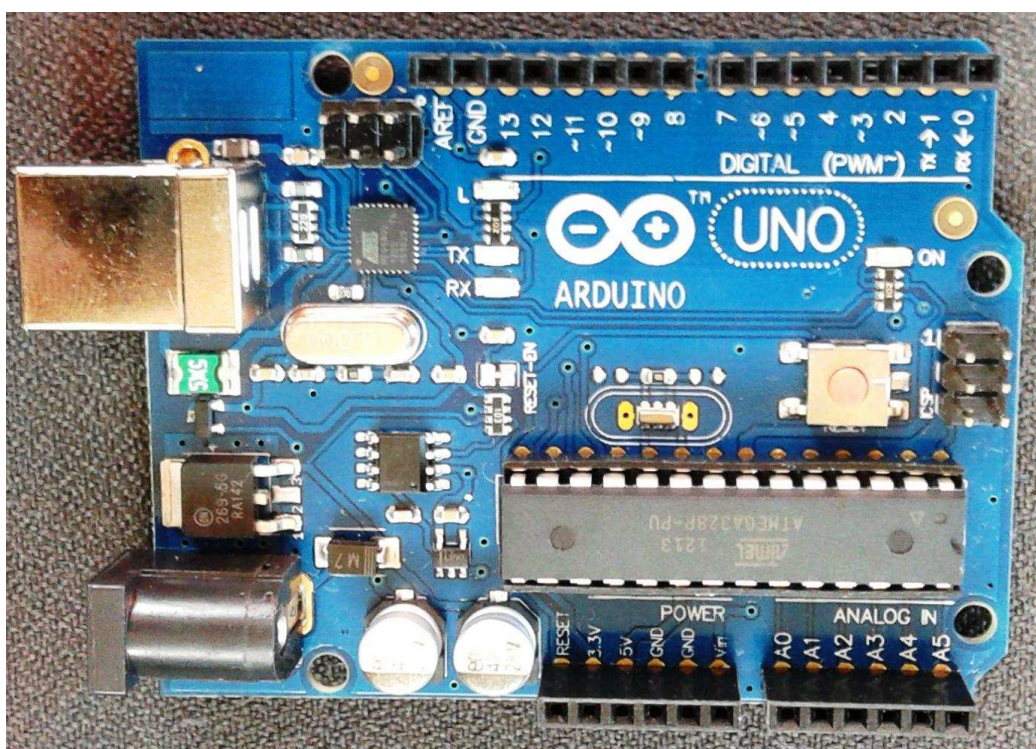


Figura 14 – Arduino UNO Rev.3

O Arduino UNO Rev.3, tem algumas características interessantes, abaixo pode-se ver algumas destas:

- a) microcontrolador: ATmega 328P;
- b) tensão de operação: 5V;
- b) tensão de alimentação (recomendado): 7-12V ;
- c) tensão de alimentação (limites): 6-20V ;

- d) pinos de E/S digital: 14 (dos quais 6 fornecem saída PWW);
- e) pinos de entrada analógica: 6;
- f) corrente contínua por pino de E/S: 40 mA;
- g) corrente contínua para o pino 3.3V: 50 mA;
- h) memória Flash: 32 KB dos quais 8 KB são reservados pra *bootloader* ;
- i) SRAM: 8 KB;
- j) EEPROM: 4 KB;
- k) velocidade do clock: 16 MHz.

Contudo, a plataforma Arduino DUE possui características mais relevantes, como, por exemplo, maior poder computacional, mais portas de comunicação, mais portas de E/S. Assim como ele tem mais recursos computacionais, seu preço também é mais elevado, o que torna sua utilização apenas indicada para os casos em que se necessite do poder computacional que ele pode fornecer.

2.3.2. Aquisição de Temperatura

Para aquisição de temperatura temos diversos transdutores, cada transdutor tem uma faixa de temperatura própria. No mercado, existem circuitos integrados dedicados à aferição de temperatura, um bom exemplo é o LM35, um dispositivo que apresenta saída proporcional à temperatura em que ele está, a relação é linear, igual a $10 \text{ mV } ^\circ\text{C}^{-1}$. São indicados para temperaturas entre $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ e $150 \text{ }^\circ\text{C}$.

De forma diferente dos semicondutores sensores de temperatura como o LM35, NTC e termopares são sensores sem eletrônica alguma. As resistências do tipo NTC apresentam um coeficiente negativo de resistência em função da temperatura da mesma. Os termopares são apenas fios feitos de ligas metálicas específicas e então soldadas entre si, sendo que essas ligas formam uma junção que gera uma força eletromotriz (F.E.M.) pequena, mas proporcional à diferença temperatura entre as junções.

O tipo de metal utilizado nos fios do termopar influenciam na sensibilidade, custo e faixa de medição, e por esse motivo existem diversos tipos de termopares.

Na Figura 15, podemos ver o nome do termopar, F.E.M. produzida e faixa de operação.

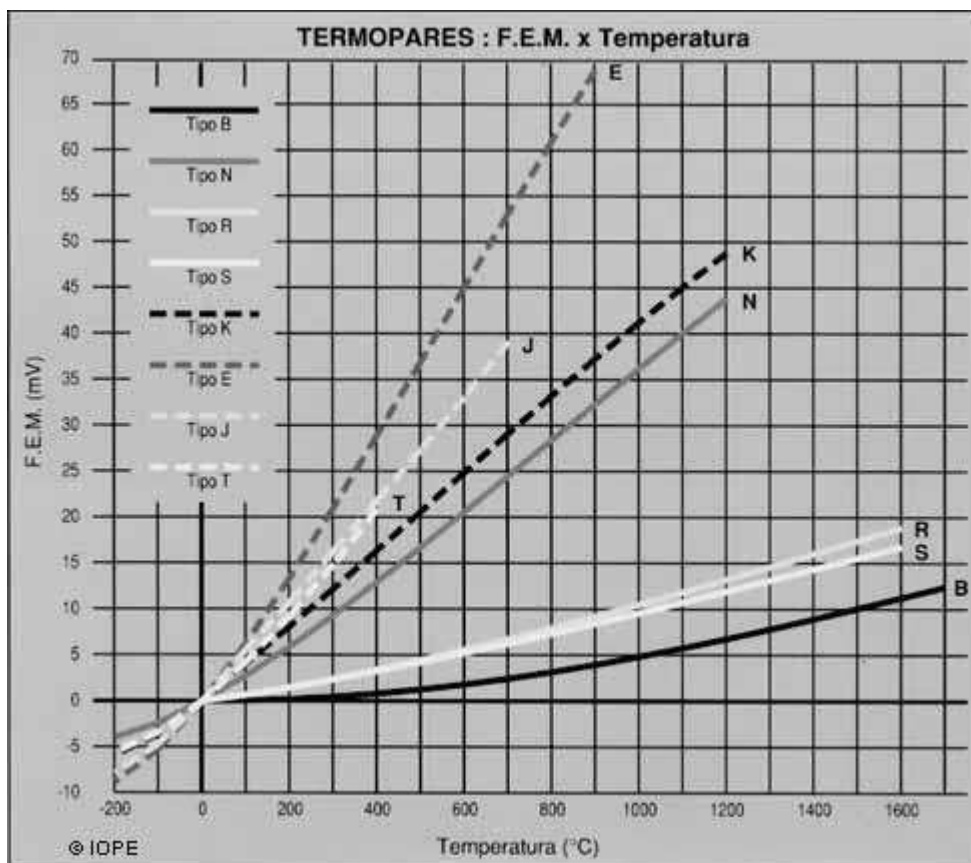


Figura 15 – F.E.M. versus Temperatura para os diversos tipos de termopares (IOPE, 2012).

A dificuldade em se usar termopares deve-se ao fato de que a tensão a ser lida é pequena, com mudanças de $50 \mu\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$. Mesmo sendo possível ler tensões usando uma fonte de tensão ideal e amplificadores operacionais, ocorrem complicações como não linearidades na resposta (nem sempre são $50 \mu\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$) e necessita-se compensar a junção fria.

Para o acondicionamento do sinal do termopar pode-se utilizar um amplificador operacional de instrumentação. Nesta configuração, o amplificador tem um estágio seguidor e estabilizador de tensão, sendo então conectado em um estágio diferencial.

Outro método para acondicionar o sinal do termopar é a utilização de circuitos integrados (CI) próprios para essa aplicação. Como exemplo, há o AD595, um amplificador operacional de instrumentação, que contém a junção fria internamente ao CI, fazendo a compensação da junção fria do termopar e que apresenta uma saída linear de tensão, proporcional à temperatura da sonda, $10 \text{ mV } ^\circ\text{C}^{-1}$ (ANALOG DEVICES).

Também existem CIs digitais para acondicionamento e leitura da tensão do termopar, podendo-se mencionar o grupo de CIs da MAX, a família 31855. O CI MAX31855 é capaz de amplificar e ler a tensão do termopar através de um conversor analógico/digital (A/D) de 14 bits e também possui junção fria interna. Comunica-se com microcontroladores por meio de uma interface SPI. O tempo de amostragem é de apenas 0,1 s, com uma faixa de medição de $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$ até $1350 \text{ } ^\circ\text{C}$ para o termopar do tipo K (MAXIM INTEGRATED).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Realizou-se o trabalho no Laboratório de Energias Alternativas, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) da Universidade Federal de Viçosa (UFV).

O gaseificador utilizado encontra-se instalado no Laboratório de Energias Alternativas do DEA. É do tipo concorrente, em que a alimentação do combustível é feita pelo topo. O ar entra em fluxo descendente, passando pelas zonas de oxidação (combustão) e redução. As características construtivas são: reator de aço inoxidável refratário 310 com espessura de 3 mm, com a forma de dois troncos de cone, simétricos, acoplados a um cilindro (Figura 16). A tampa e a base são do mesmo material. O gaseificador foi produzido conforme projetado por Oscar Teixeira Luiz Rezende (REZENDE, 2012).

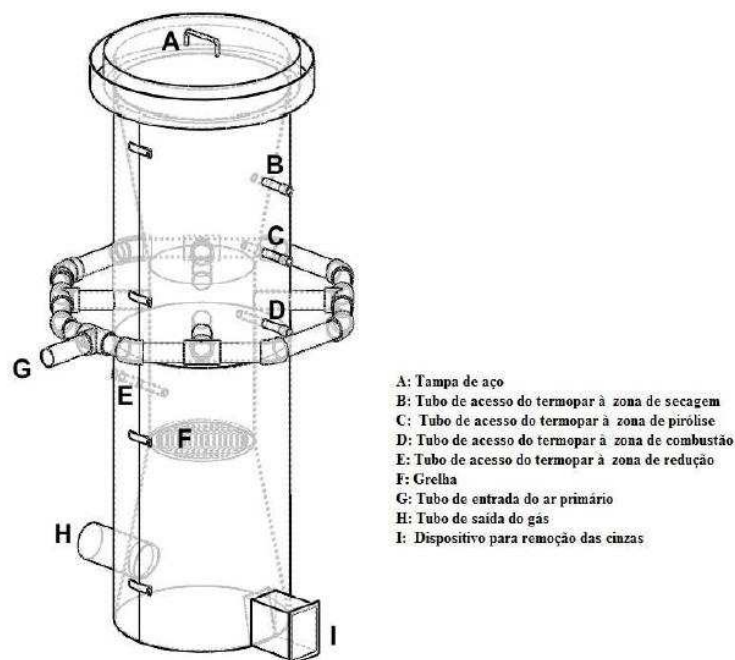


Figura 16 – Gaseificador (REZENDE, 2012).

O gaseificador possui tubos distribuídos longitudinalmente, sendo 4 tubos de aço inoxidável 304 de 10 mm de diâmetro para permitir a inserção de termopares para coleta e monitoramento nas diversas zonas do reator, eles estão indicados na Figura 16, como B, C, D e E. No cilindro interno do gaseificador, existem quatro

tubos de aço inoxidável 304 de 50 mm de diâmetro para a entrada do ar primário. O gaseificador trabalha a pressão atmosférica.

Soldou-se a grelha na base interna do cilindro do gaseificador, com a finalidade de apoiar a biomassa a ser gaseificada e permitir o fluxo de saída do gás produzido na zona de redução. Abaixo da grelha, há um compartimento para decantação das cinzas oriundas do processo e outro dispositivo que permite a saída do gás gerado no processo de gaseificação.

Um anela tubular de aço com 100 mm de diâmetro foi acoplado às entradas de ar do gaseificador, a fim de fornecer o ar da gaseificação. Na Figura 17, encontram-se os cortes com as respectivas medidas.

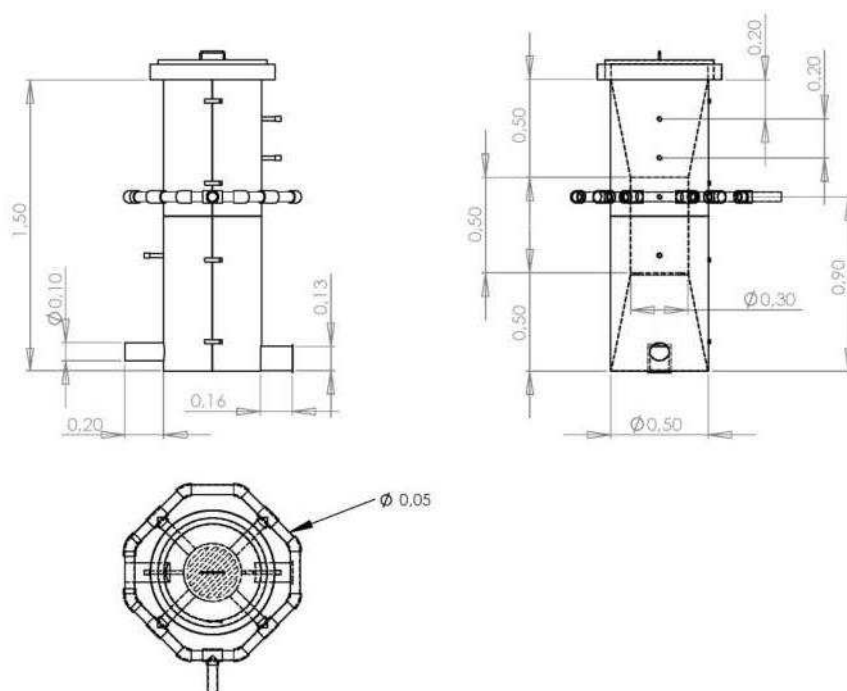


Figura 17 – Cortes do Projeto com as Medidas (REZENDE, 2012).

Como combustível para o gaseificador utilizado no desenvolvimento do controlador, empregou-se tanto carvão vegetal como lenha de eucalipto, ambos obtidos no Departamento de Engenharia Florestal da UFV.

3.1. Caracterização do Combustível

Considerou-se para caracterização do combustível o teor de água, o poder calorífico superior (PCS), o poder calorífico inferior (PCI), a granulometria, teor de cinzas, e a composição elementar de cada combustível.

Determinou-se o PCS em bomba calorimétrica adiabática, no Laboratório de Energia da Madeira e Painéis do Departamento de Engenharia Florestal/UFV. As amostras foram preparadas segundo a norma TAPPI 277 om-52 (TAPPI, 2001). As amostras foram selecionadas para teste utilizando peneiras n°16 e n° 24 (ATSM, 1982). Secaram-se as amostras de madeira em estufa a 103 ± 2 °C, até a massa constante, para determinação do poder calorífico superior. O poder calorífico inferior foi determinado de acordo com a equação 6.

$$PCI = PCS - \frac{2508(U_b + 9H_2)}{1 + U_b} \quad (6)$$

em que,

PCS = poder calorífico superior do combustível, kJ kg^{-1} ;

PCI = poder calorífico inferior do combustível, kJ kg^{-1} ;

U_b = teor de água da biomassa, decimal, b.s.;

H_2 = fração de hidrogênio no combustível, kg kg^{-1} ; e

2508 = entalpia de vaporização da água, kJ kg^{-1} de água.

Determinou-se o teor de água mediante utilização de uma estufa com circulação forçada de ar e uma balança eletrônica com resolução de 0,0001 g. Prepararam-se pequenas amostras com madeira triturada, determinaram-se as respectivas massas e, então, as amostras ficaram na estufa durante 24h, à temperatura de 105 °C. Mediu-se novamente suas massas, e, posteriormente, calculou-se o teor de água em base seca.

A granulometria foi determinada com auxílio de paquímetro, régua milimétrica e fita métrica. Mediram-se os diâmetros e os comprimentos de pelo menos 30 amostras de cada combustível.

A densidade média, teor de cinzas, e a composição elementar (hidrogênio, carbono, enxofre, nitrogênio, oxigênio) de cada combustível foram obtidos conforme consulta bibliográfica.

3.2. Modelagem e Identificação do Sistema

Identificação de sistemas é o nome dado à área de conhecimento que se dedica à construção de modelos matemáticos, a partir de dados produzidos por sistemas dinâmicos. Um sistema dinâmico pode ser definido como um sistema com memória, no qual o estado presente depende dos estados passados. Modelos matemáticos são utilizados por projetistas e engenheiros para projetar sistemas dinâmicos com o intuito de simular e controlar fenômenos no mundo real.

O modelamento de sistemas dinâmicos pode ter duas abordagens. Quando a matemática por trás do fenômeno é conhecida, este conhecimento é utilizado para construção do modelo, é chamada de modelamento por princípios básicos ou fundamentos. No caso em que o conhecimento não existe, mas existem dados observados do fenômeno em questão, esses dados podem ser utilizados para construir-se o modelo, é chamada de modelamento conduzido por dados.

O ponto de partida de todo processo é o objeto que represente o sistema real, como, por exemplo, um avião, com sinais de entrada (leme, aileron, empuxo) e sinais de saída (velocidade, ângulo de inclinação). O modelo é o objeto que utilizamos para substituir o sistema real por expressões matemáticas que consigam reproduzir relações similares entre os sinais de entrada (u) e os de saídas (y). u e y podem ser medidos no domínio do tempo ou da frequência.

Essencialmente, as técnicas de identificação de sistemas funcionam da seguinte maneira: a partir de um conjunto de entrada e saída, ajustam-se os parâmetros dos modelos de forma a minimizar o erro de saída. Isso significa diminuir a diferença entre o sinal observado e o sinal reproduzido pelo modelo. Para comparar os sinais observados e gerados, pode-se gerar um gráfico ou calcular um valor número de ajuste, como a variação percentual da diferença.

Para realizar a identificação do sistema pelos dados observados, deve-se seguir uma metodologia clara e concisa. Primeiro deve-se coletar os dados, e definir o período de amostragem. Após a coleta, deve-se preparar os dados, a preparação dos dados envolve as seguintes etapas: normalização, remoção de médias e filtragem do sinal.

Empregou-se para obtenção do perfil de temperaturas do processo um termopar tipo K, MAX 31855K, um Arduino UNO e o software MATLAB 2013 para acionar e fazer a aquisição de dados de temperatura. Inicialmente, fixou-se a vazão de ar de alimentação do reator utilizando um inversor de frequência. A vazão foi a ideal para manter a região de combustão na temperatura aproximada de 1000 °C.

Após identificar a rotação que mantinha a temperatura próxima a 1000 °C, determinaram-se dois patamares, um mínimo e um máximo, que faziam a temperatura oscilar entre 800 °C e 1000 °C. Com esses valores, construiu-se um sinal binário pseudorrandômico (sigla em inglês - PRBS) para controlar o inversor de frequência e insuflar duas vazões distintas de ar para o gaseificador.

Aferiram-se, também, a umidade ambiente e a temperatura ambiente, utilizando um sensor digital modelo DHT11, com precisão de ± 2 °C e $\pm 5\%$ de umidade relativa. O sensor também foi conectado ao Arduino UNO. Com intuito de investigar o comportamento da zona de redução, esta também foi monitorada, utilizou-se os mesmo matérias da zona de combustão.

A partir dos dados obtidos, traçou-se um gráfico da temperatura em função do tempo para o processo e, então, obteve-se um modelo matemático genérico para o processo de gaseificação. Com o modelo, tornou-se possível aplicar métodos de sintonia de controladores Proporcional Integral Derivativo (PID) ou fazer simulações do processo de forma computacional.

3.3. Desenvolvimento do Controlador

Desenvolveu-se o controlador do tipo PID, através da seguinte metodologia: reconhecimento do reator de gaseificação, escolha do melhor sensor e do atuador a ser utilizado; obtenção dos modelos matemáticos do reator de gaseificação, sensor

e atuador; definição do modelo matemático do controlador para que o sistema de controle em malha fechada satisfaça os requisitos de estabilidade.

Após a obtenção do modelo matemático aproximado do sistema (controlador + planta), procedeu-se a uma simulação computacional para avaliar o desempenho em relação às variações do sinal de saída e na presença de perturbações. Na sequência, realizaram-se os ajustes necessários no controlador para adequar a resposta às especificações.

Adotaram-se como especificações a temperatura da zona de combustão em aproximadamente 1000 °C, temperatura da zona de redução entre 750 °C e 850 °C (priorizando a reação de Boudouard) com *overshoot* e *undershoot* de no máximo 15% para a zona de combustão, com erro de regime permanente de até 10%.

3.3.1. Detalhamento do Sistema

Para os efeitos de análise do sistema do ponto de vista da teoria de controle, definem-se alguns conceitos para o entendimento do problema. Dessa forma, considerou-se:

- Planta: reator de gaseificação;
- Processo: reação termoquímica de gaseificação;
- Perturbações: variação na constituição do combustível;
- Entrada do sistema: temperatura ideal da zona de combustão durante a gaseificação (≈ 1000 °C);
- Saída do sistema: variável do processo (VP), temperatura do processo de gaseificação na zona de combustão.

3.3.2. Metodologia para Construção do Controlador

Depois de obtida a curva característica do processo, observou-se um dos métodos de sintonia de controladores. O método a ser escolhido dependeu da curva do processo, podendo ser “Método da Sensibilidade Limite” ou “Método da Curva de Reação” ou se existir possibilidade de modelagem do sistema pode-se utilizar a “Sintonia com base no Lugar da Raiz”. Os métodos detalhados podem ser encontrados em literatura específica, como em Lourenço (1997).

O Método da Sensibilidade Limite necessita que o sistema possa entrar em resposta oscilatória do sistema, esse procedimento requer que o ganho do proporcional seja aumentado até obter-se uma saída com oscilações e com amplitude constante. Então, anotam-se o ganho (G_u) e o período de oscilação (P_u). Com a obtenção destes valores, os parâmetros do controlador podem ser encontrados usando as fórmulas da Tabela 4.

Tabela 4 – Fórmulas para determinação dos parâmetros do controlador (LOURENÇO, 1997).

Controlador	Fórmulas
P	$K_p = 0,5 G_u$
PI	$K_p = 0,45 G_u$ $T_i = P_u/1,2$
PID	$K_p = 0,6 G_u$ $T_i = P_u/2,0$ $T_d = P_u/8$

Onde: K_p é o ganho proporcional; T_i é o tempo integral; T_d é o tempo derivativo.

Implementou-se o controlador mediante utilização de microcontrolador, em que gravou-se a lógica do controle. Escolheu-se o modelo do microcontrolador com base em requisitos de desempenho, tais como: número de portas digitais de entrada e saída (E/S), número de portas analógicas de E/S, e capacidade de memória e processamento. O modelo escolhido foi o Arduino UNO.

O controlador automático atuou sobre a vazão de ar do sistema, ao passo que o ventilador conectou-se a um inversor de frequência da marca WEG, modelo CFW08. O inversor é capaz de receber comandos remotos do controlador e de alterar a rotação do ventilador e, conseqüentemente, permitiu o controle sobre a vazão de ar de alimentação do reator.

Para comunicação do Arduino UNO com o inversor CFW08, utilizou-se um optoacoplador, que recebia os valores de PWM vindos do Arduino. O optoacoplador utilizado é do modelo LTV4N25. Na Figura 18 pode-se ver o esquema de ligações elétricas deste.

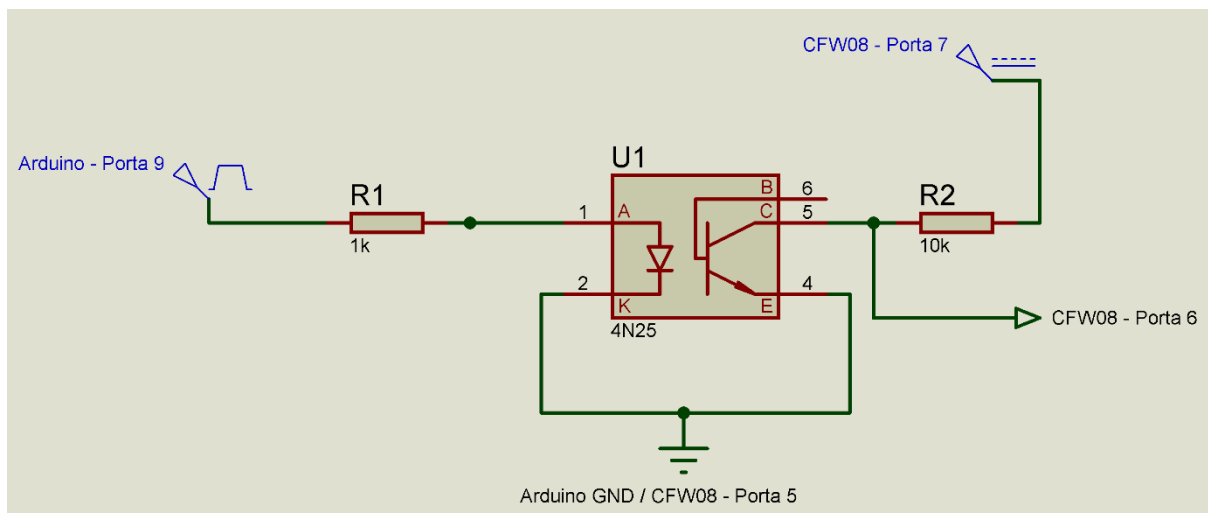


Figura 18 – Esquema de Ligação do Optoacoplador.

Realizou-se a realimentação do sistema mediante termopar tipo K, que possui capacidade para realizar leituras de temperaturas com precisão de ± 2 °C até 1370 °C. Como amplificador do sinal do termopar, utilizou-se o CI MAX31855K, que é um amplificador para termopar tipo K com saída para comunicação com protocolo do tipo SPI, proporcionando o interfaceamento descomplicado com o microcontrolador.

Inicialmente, utilizou-se o controle em malha fechada, do tipo proporcional integral derivativo (Figura 19). O controlador proporcional integral faz com que o sinal de erro seja minimizado pela ação proporcional, zerado pela ação integral e o período transiente é corrigido pela ação derivativa.

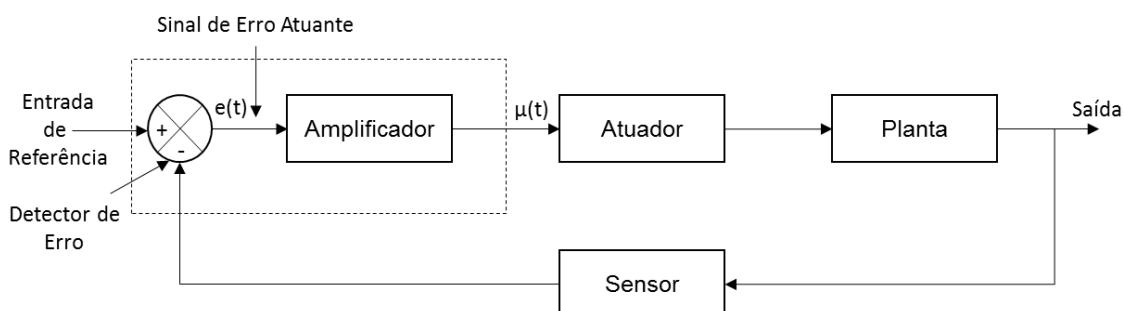


Figura 19 – Sistema de Controle (HEY, 1997).

3.4. Análise do gás obtido na gaseificação utilizando o controlador

Para determinar a qualidade do gás obtido no processo de gaseificação, analisou-se a constituição do gás. Este procedimento possibilita encontrar a eficiência de conversão da biomassa sólida em gás. Os gases que foram

quantificados em concentração percentual são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), gás hidrogênio (H₂), gás metano (CH₄), e hidrocarbonetos de cadeia curta (C_nH_n). Para essa finalidade, utilizou-se um analisador de gás marca Wuhan Cubic Optoelectronics modelo Gasboard 3300. Colheram-se as amostras do gás da gaseificação através de uma bomba elétrica peristáltica.

A análise seguiu as normas da CETESB para análise de gases de fontes estacionárias de emissão (CETESB, 1979).

A Equação 7 pode ser utilizada para determinar a o PCI do gás (RAMAN e RAM, 2013).

$$PCI = 107,98H_2 + 126,36CO + 358,18CH_4 + 629,09C_nH_n \quad (7)$$

em que

PCI = Poder calorífico inferior do gás, Jkg⁻¹;

H₂ = Concentração de hidrogênio no gás, %;

CO = Concentração de monóxido de carbono no gás, %;

CH₄ = Concentração de metano no gás, %;

C_nH_n = Concentração de hidrocarbonetos de cadeia curta no gás, %.

3.4.1. Eficiência da gaseificação

Para encontrar a eficiência da gaseificação existem dois métodos: a quente e a frio. A eficiência a quente corresponde ao quociente do somatório entre a energia sensível e química do gás produzido, e a energia química (poder calorífico) do combustível gaseificado. A eficiência a frio refere-se somente ao quociente entre a energia química do gás e a energia química do combustível. Neste trabalho será utilizado o método da eficiência a frio do processo, definida na Equação 8.

$$\eta = \left(\frac{PCI_{gás} V_{gás}}{PCI_{lenha}} \right) 100 \quad (8)$$

em que,

$PCI_{gás}$ = Poder calorífico inferior do gás, kJ Nm^{-3} ;

$V_{gás}$ = Volume específico do gás, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$;

PCI_{lenha} = Poder calorífico inferior da lenha, kJ kg^{-1} .

Para determinar o $V_{gás}$ foi utilizado um método baseado na concentração dos gases no gás resultante da gaseificação (Equação 9). Dessa forma $V_{gás}$ é função das concentrações de CO, CO₂, H₂, CH₄ e o restante da concentração será atribuída ao gás N₂. Pode-se utilizar tal aproximação, pois os gases respeitam a Lei Dos Gases Ideias e o gás limitando do processo é o N₂.

$$V_{gás} = V_{CH_4} \cdot CH_4 + V_{H_2} \cdot H_2 + V_{CO_2} \cdot CO_2 + V_{CO} \cdot CO + V_{N_2} \cdot N_2 \quad (9)$$

em que,

$V_{gás}$ = volume específico do gás, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$;

V_{CH_4} = volume específico do gás metano, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$;

V_{H_2} = volume específico do gás hidrogênio, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$;

V_{CO_2} = volume específico do gás dióxido de carbono, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$;

V_{CO} = volume específico do gás monóxido de carbono, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$;

V_{N_2} = volume específico do gás nitrogênio, $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$

H_2 = concentração de hidrogênio no gás, %;

CO = concentração de monóxido de carbono no gás, %;

CH_4 = concentração de metano no gás, %;

CO_2 = concentração de dióxido de carbono no gás, %;

N_2 = concentração de nitrogênio no gás, %;

O método utilizado foi adaptado de um estudo realizado por pesquisadores chineses. Esses pesquisadores realizaram modificações no desing de um gaseificador concorrente e observarão as mudanças na eficiência do processo de gaseificação. (GUO, DONG, *et al.*, 2014).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Realizaram-se seis experimentos com o gaseificador no Laboratório de Energias Alternativas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa/MG.

Efetuaram-se os três primeiros testes com gaseificador para aprendizagem quanto ao modo de operar o gaseificador, realizar a identificação do sistema e observar o comportamento dinâmico da biomassa dentro do gaseificador.

Nos três últimos testes, observou-se o comportamento dinâmico do gaseificador ao ser controlado pelo controlador. Avaliou-se a estabilidade do sistema e a resposta diante de perturbações e/ou falhas.

Também procedeu-se à análise do gás da gaseificação, e essa análise permitiu que fosse determinada a eficiência do processo de gaseificação.

Os combustíveis utilizados consistiram em lenha de eucalipto e carvão. O comburente foi ar ambiente.

4.1. Caracterização da Biomassa

Para determinar o PCS, utilizou-se uma bomba calorimétrica adiabática modelo IKA® C200. No que concerne à lenha de eucalipto, transformaram-se as amostras em serragem utilizando-se um moinho de laboratório tipo Wiley, de acordo com a norma TAPPI 257 om-52 (TAPPI, 2001). Pulverizou-se o carvão com emprego de um pilão cerâmico. Para ambas as biomassas, foi utilizado-se a fração que passou pela peneira n° 16 internacional, com malha de 40 mesh e ficou retida na peneira n° 24 internacional, com malha de 60 mesh, (ATSM, 1982). Secaram-se as amostras de madeira em estufa a 103 ± 2 °C, até a massa constante, para determinação do poder calorífico superior.

Calculou-se o PCS das biomassas em três repetições, adotando-se, então, o valor médio entre as medições. Calculou-se o PCI, conforme a Equação 6, do item 3.1, constando os resultados na Tabela 5.

Trituraram-se as amostras de madeira e carvão, determinando-se as respectivas massas, e, então, as amostras foram para a estufa onde permaneceram durante 24h, à temperatura de 105 °C. Mediram-se novamente suas massas, e, posteriormente, calculou-se o teor de água em base seca. Na Tabela 5, pode-se ver o resultado médio das três amostras de cada biomassa.

Tabela 5 – Propriedades das biomassa.

Biomassa	Umidade na base seca (Ubs %)	PCS (kJ kg⁻¹)	PCI (kJ kg⁻¹)
Lenha de eucalipto	11,47	19305,33	17756,29
Carvão vegetal	7,34	31225,15	30290,25

Compararam-se os resultados de PCS ao trabalho de Quirino *et al.* (2004), que reuniu o PCS de diversas biomassa, em experimentos realizados por diversos autores. Notou-se que os valores são próximos aos reportados neste trabalho.

Determinou-se a granulometria com auxílio de paquímetro, régua e fita métrica. A madeira apresentou diâmetro máximo de 12,80 cm e mínimo de 6,50 cm e comprimento máximo de 37,10 cm e mínimo de 19,00 cm. O carvão apresentou dimensões mais diversificadas, com diâmetro máximo de 11,60 cm e mínimo de 4,00 cm, e comprimento máximo de 22,4 e mínimo de 5,00 cm. Na Tabela 6, observam-se as médias para 30 amostras de cada biomassa. Consultou-se a densidade básica e o teor de cinzas em Soares *et al.* (2014).

Tabela 6 – Dimensões médias, densidade básica e teor de cinzas para as biomassa.

Biomassa	Comprimento Médio (cm)	Diâmetro Médio (cm)	Densidade Básica (g cm⁻¹)	Teor de Cinzas (%)
Lenha de eucalipto	25,27	8,42	0,44	0,31
Carvão vegetal	11,47	6,38	0,30	0,87

Para o carvão, consultaram-se os valores de análise elementar em Rosa *et al.* (2012), que elaborou um estudo sobre a qualidade do carvão vegetal para uso

doméstico. Para a madeira de eucalipto, foi consultou-se Lora *et al.* (2013), que realizou um estudo aprofundado sobre biomassas utilizadas em gaseificadores (Tabela 7).

Tabela 7 – Análise elementar das biomassas.

Biomassa	Análise elementar (base úmida)				
	C ^u	H ^u	O ^u	N ^u	S ^u
Carvão vegetal	80,58	3,43	15,54	0,33	0,03
Lenha de eucalipto	45,97	5,81	44,42	0,30	0,00

4.2. Modelagem e Identificação do Sistema

Para a identificação do sistema, as temperaturas das zonas de secagem e pirólise do gaseificador não foram consideradas, e de acordo com Rezende (2012) essas zonas possuem alta variabilidade de temperatura devido ao gaseificador não ser recarregado e o consumo da biomassa deixar esses locais vazios.

Teste 1 – Acionamento Manual usando Carvão

O teste 1 foi o primeiro a ser realizado com o gaseificador. Utilizou-se carvão vegetal de boa qualidade, ou seja, alto PCI e baixa humidade, a massa de carvão foi de 16,00 kg. O teste foi realizado para aprender a iniciar o reator de gaseificação, iniciar o combustor de gás, e para observar o comportamento dinâmico do sistema. O perfil de temperaturas da zona de combustão quando utilizou-se o carvão vegetal foi bastante homogêneo, estabilizando-se em 1000°C, após o alcance da temperatura de produção do gás, e manteve-se estável até o fim da gaseificação, que teve duração de 2 h e 15 m. A temperatura diminuiu a até alcançar 600°C, e a gaseificação cessou. As temperaturas da zona de combustão foram anotadas a mão apenas para observação futura, a Figura 20 mostra o sistema montado para este teste.



Figura 20 – Sistema de ventilação e gaseificador.

Teste 2 – Acionamento manual usando lenha

O segundo teste foi realizado no dia 5 de setembro de 2014 de 9:00 h até 12:40 h, utilizando-se apenas lenha de eucalipto com massa total de 34,00 kg. Procedeu-se ao controle da vazão do ar primário para gaseificação, foi feito a partir de uma restrição na área de entrada de ar no soprador. O perfil de temperaturas da zona de combustão do gaseificador pode ser observada na Figura 21. A temperatura começou a ser mensurada a partir da hora em que ocorreu produção de gás inflamável. Quando a temperatura da zona de combustão ficou menor que 600 °C, a produção de gás combustível extinguiu-se.

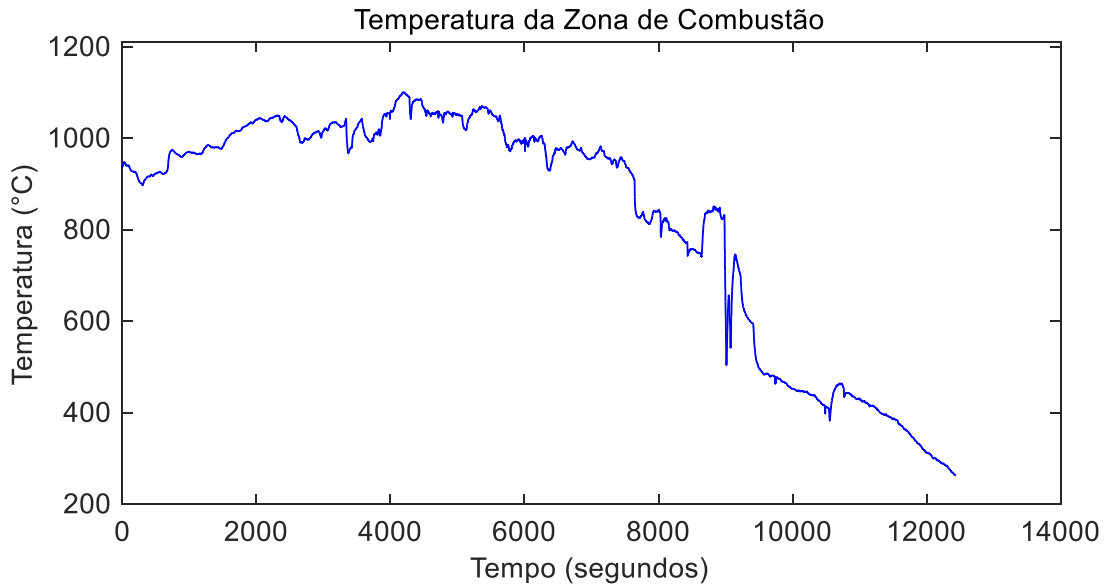


Figura 21 – Temperatura da Zona de Combustão.

A partida da análise dessa figura, pode-se analisar a produção de gás, e o comportamento da chama do gás no combustor de forma empírica; evidencia-se uma melhor queima quando a zona de combustão do gaseificador atinge uma temperatura próxima a 1000 °C.

A partir da análise dos dois primeiros testes, notou-se que a temperatura mais sensível à variação da biomassa e da taxa de ar insuflado para dentro do gaseificador era a zona de combustão. A zona de redução era a zona com maior estabilidade, sendo menos sensível a essas variações.

Teste 3 – Acionamento automatizado usando o MATLAB

Realizou-se esse teste com vistas à identificação do sistema, que era condição indispensável ao ajuste da sintonia do controlador PID. A massa de lenha utilizada foi de 31,60 kg.

O sinal de entrada utilizado para a identificação do sistema foi do tipo PRBS, gerado com auxílio do programa MATLAB 2013b versão Student. A programação para este teste encontra-se no Apêndice A. O sinal do tipo PRBS foi escolhido pela característica do sistema para excitar a entrada de ar, outras variáveis como a temperatura ambiente, umidade ambiente e PCI do combustível que não são

entradas controláveis do sistema, também causaram variações na saída do sistema, que foram medidas para avaliação das suas influências.

A Figura 22 ilustra parte do sinal de entrada aplicado no sistema, o eixo X mostra o tempo do experimento e o eixo Y mostra o valor do PWM, com distribuição do tipo PRBS, aplicado ao inversor de frequência que estava acoplado ao soprador de ar do reator de gaseificação, a lógica do sinal é inversa.

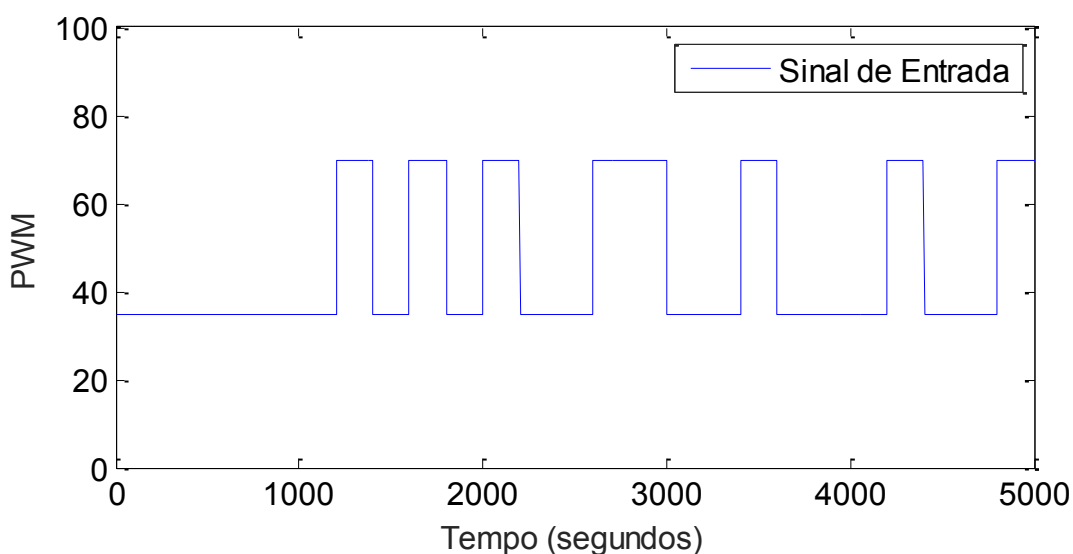


Figura 22 – Sinal de Entrada do Inversor de Frequência.

O sinal tem duração de 5000 segundos, com amplitude do PWM máxima de 75 e mínima de 35. O que na prática controla o motor de 25Hz a 50Hz, com velocidade do ar de $2,4 \text{ m s}^{-1}$ e $4,1 \text{ m s}^{-1}$.

O Arduino UNO possui uma função específica para utilização do PWM, o programador deve apenas enviar um valor de 0 a 255, que significa que o PWM tem uma resolução de 8 bits. Onde 0 envia o comando para o PWM operar em 0 Volts e 255 significa 5 Volts. A frequência de operação do PWM é de 490Hz.

A Figura 23 (a) mostra relação entre o PWM usado para acionar o inversor de frequência e a rotação do motor. A Figura 23 (b) mostra a relação entre o PWM e a velocidade do ar para gaseificação.

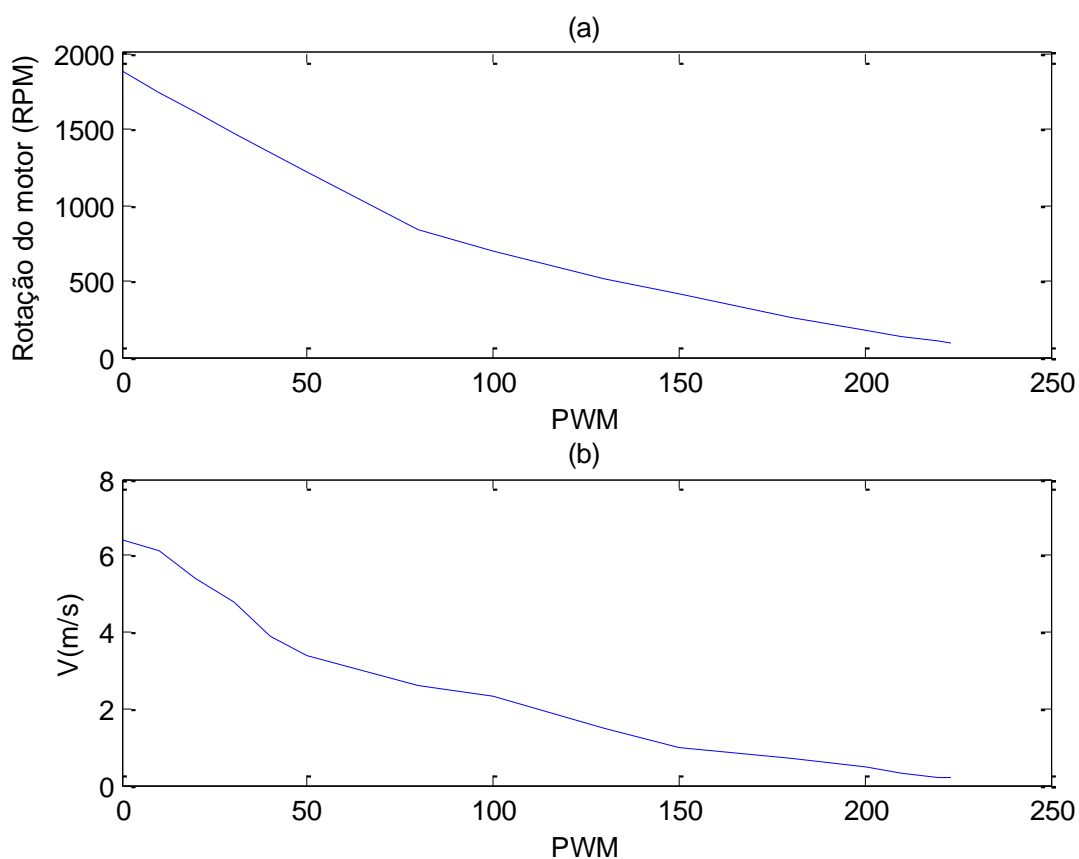


Figura 23 – (a) Relação entre o PWM e a Rotação do Motor; (b) Relação entre o PWM e a Velocidade do ar para Gaseificação.

A equação 11 fornece a velocidade aproximada do ar em função do PWM utilizado para acionar o inversor de frequência, com V em m s^{-1} representa a velocidade do ar insuflado no gaseificador.

$$V = -0,026.PWM + 5,5 \quad (10)$$

Os valores da temperatura da zona de gaseificação e da zona de combustão no tempo, estão mostrados na Figura 24, assim como os valores de temperatura e umidade ambiente durante a gaseificação.

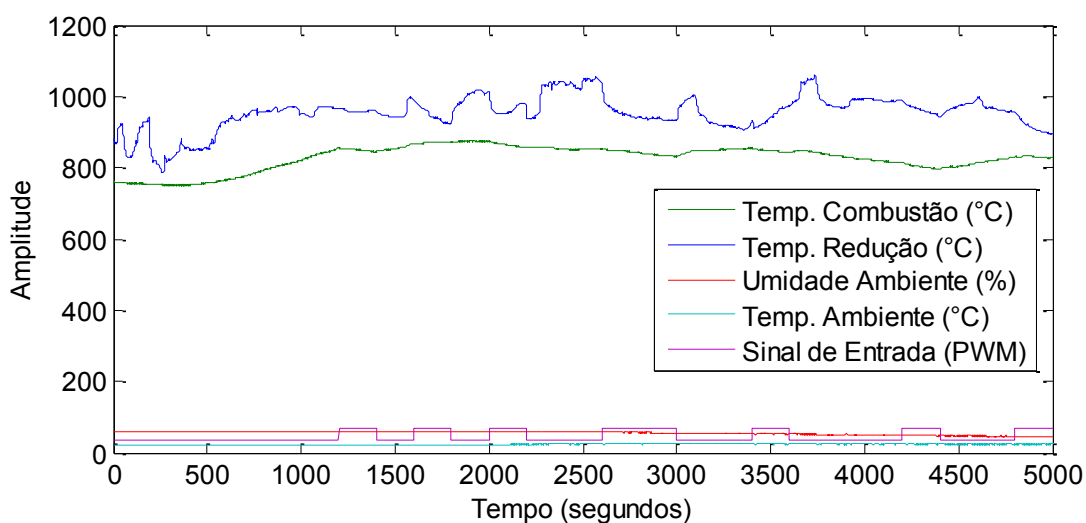


Figura 24 – Dados Utilizados para Identificação do Sistema.

A partir desses dados de entrada e saída do sistema dinâmico, pôde-se encontrar uma representação para o sistema dinâmico. Testaram-se modelos de função de transferência de segunda a quinta ordem, modelos de espaço de estados de terceira a sexta ordem, modelo de resposta ao impulso e modelo não-linear do tipo ARX.

A representação no espaço de estados com cinco estados, para o sistema obteve a melhor precisão, conseguiu representar o sistema de treinamento com 28,9% de confiança. Modelo por espaço de estados é $x(t+T_s)=A.x(t)+B.u(t)+K.e(t)$ e $y=C.x(t)+D.u(t)+e(t)$, com período de amostragem $T_s = 1,0$ segundos.

As matrizes A, B, C, D e K são:

			x1	x2	x3	x4	x5		
	x1		1.001	-0.03539	0.00778	-0.008815	0.002684		
	x2		0.0169	0.7675	0.3135	-0.3097	0.2224		
A =	x3		0.001209	0.02589	-0.713	-0.6852	0.1412		
	x4		0.003387	-0.05447	-0.4651	0.4514	0.4366		
	x5		-0.00501	-0.1398	0.2423	-0.4102	-0.01188		
								K =	y1
									x1 0.0003828
									x2 -0.001013
									x3 0.0001341
									x4 -0.0002786
									x5 0.0005194
		u1	C =	x1	x2	x3	x4	x5	
	x1	-7.188e-06	y1	2772	-35.31	1.458	-1.364	-1.532	
	x2	-2.398e-05							
B =	x3	0.0001281							
	x4	-0.0001096	D =	u1					
	x5	0.001252		y1	0				

4.3. Determinação dos Parâmetros do PID

Utilizando o modelo encontrado no item 4.2, obteve-se um modelo de quinta ordem do sistema, em tempo contínuo. Conseguiu-se a partir do lugar das raízes, uma estimativa do ganho que tornava o sistema criticamente estável. O ganho foi negativo, representando que o sistema tem comportamento inverso entre a entrada e a saída.

Seguindo o Método da Sensibilidade Limite (LOURENÇO, 1997), com o ganho proporcional inicial em -13, o sistema foi simulado no software Simulink 8.2. Encontrou-se o valor de $G_u = -10,2$ para tornar o sistema criticamente estável, com período oscilatório de $P_u = 9,55$ (Figura 25).

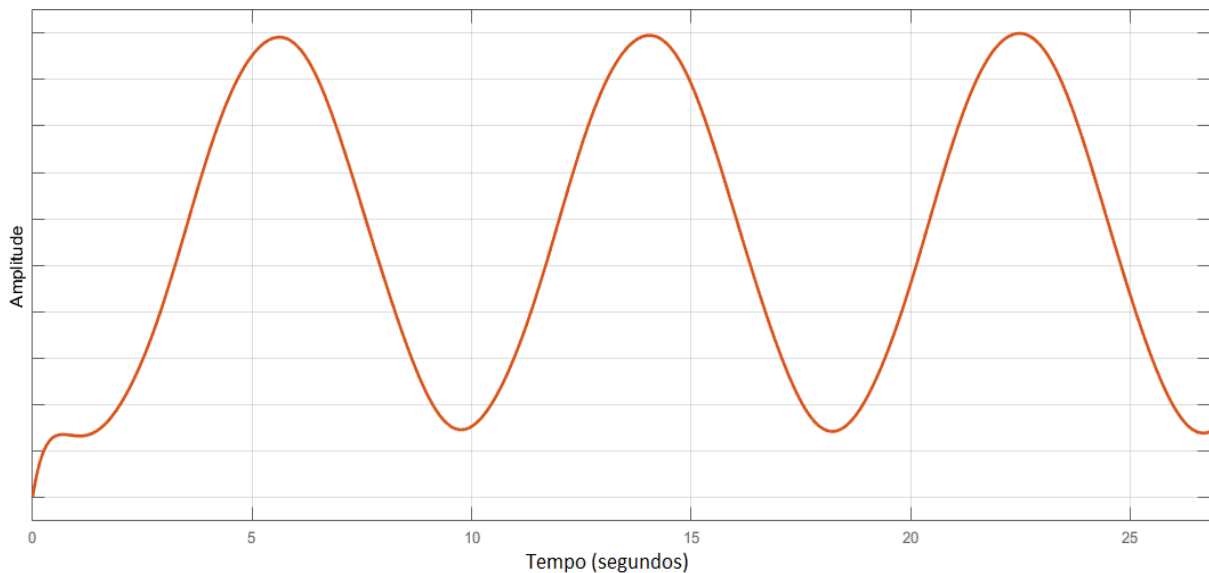


Figura 25 - Sistema criticamente estável.

Para o controlador PID em série em tempo contínuo, utilizando os valores de G_u e P_u : $K_p = -6,12$; $T_i = 4,77$; $T_d = 1,19$. Aplicando o conjunto de equações 5 para discretizar o controlador e considerando $T = 1s$, obteve-se os valores $K_p = -5,5$; $K_i = -1,29$ e $K_d = -7,38$.

Eis as características dinâmicas do sistema com o controlador projetado: tempo de acomodação de 31,1 segundos; *overshoot* foi de 27,9%; e tempo de subida de 2,63 segundos (Figura 26).

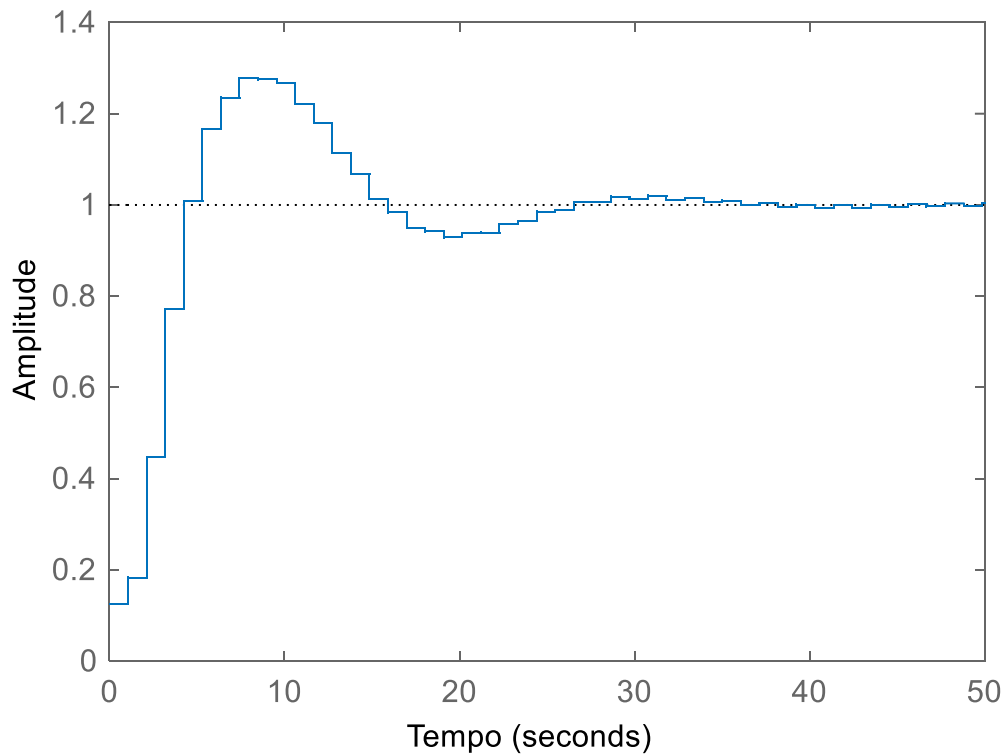


Figura 26 – Resposta transiente do sistema com o controlador projetado a um degrau unitário.

A partir dessa estimativa, prosseguiu-se para realização de simulações para determinar os valores ótimos para o controlador do tipo PID digital, o qual foi ajustado com o auxílio do MatLab 2013b.

Os resultados para os valores de $K_p = -5,1$, $K_i = -0,5$ e $K_d = -3,7$ podem ser vistos na Figura 27.

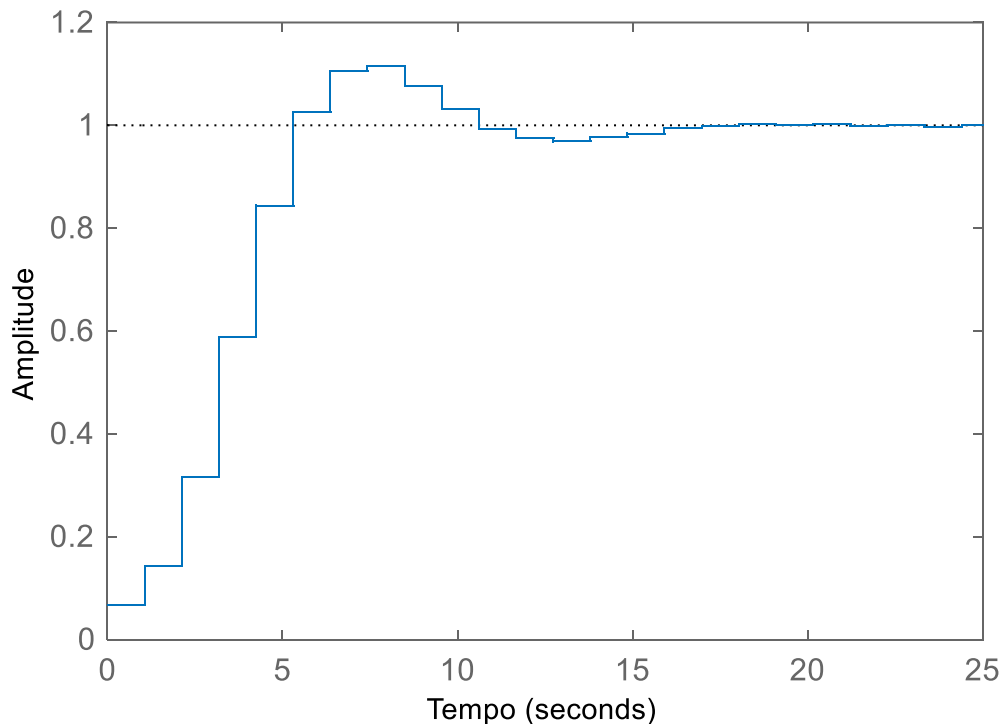


Figura 27 – Resposta transitiente do sistema com o controlador sintonizado a um degrau unitário.

As características dinâmicas do sistema acoplado ao controlador são tempo de acomodação foi de 14,5 segundos; *overshoot* foi de 11,4%; e tempo de subida de 3,44 segundos.

O controlador do tipo PID foi implementado no Arduino UNO com o auxílio da biblioteca “PID_v1”, seus parâmetros do PID foram gravados nesta biblioteca e então realizou-se os testes. A programação do Arduino UNO encontra-se no Apêndice A, o diagrama elétrico do Arduino UNO, com conexões ao inversor de frequência CFW08 encontra-se no Apêndice B.

Efetuararam-se os teste 4, 5 e 6 para ajustar os parâmetros do controlador na planta, e observar o comportamento do sistema dinâmico perante as suas perturbações. Prestaram-se, também, para determinar as vazões mínimas e máximas de ar insuflado para a zona de gaseificação.

Teste 4 – Acionamento automatizado usando Arduino UNO

Realizou-se o teste no dia 19 de maio de 2015, com massa de lenha de 33,40 kg e de carvão de 2,00 kg. Neste teste, visou-se observar o comportamento dinâmico do sistema controlado. Na Figura 28, observa-se parte da aquisição dos dados deste teste.

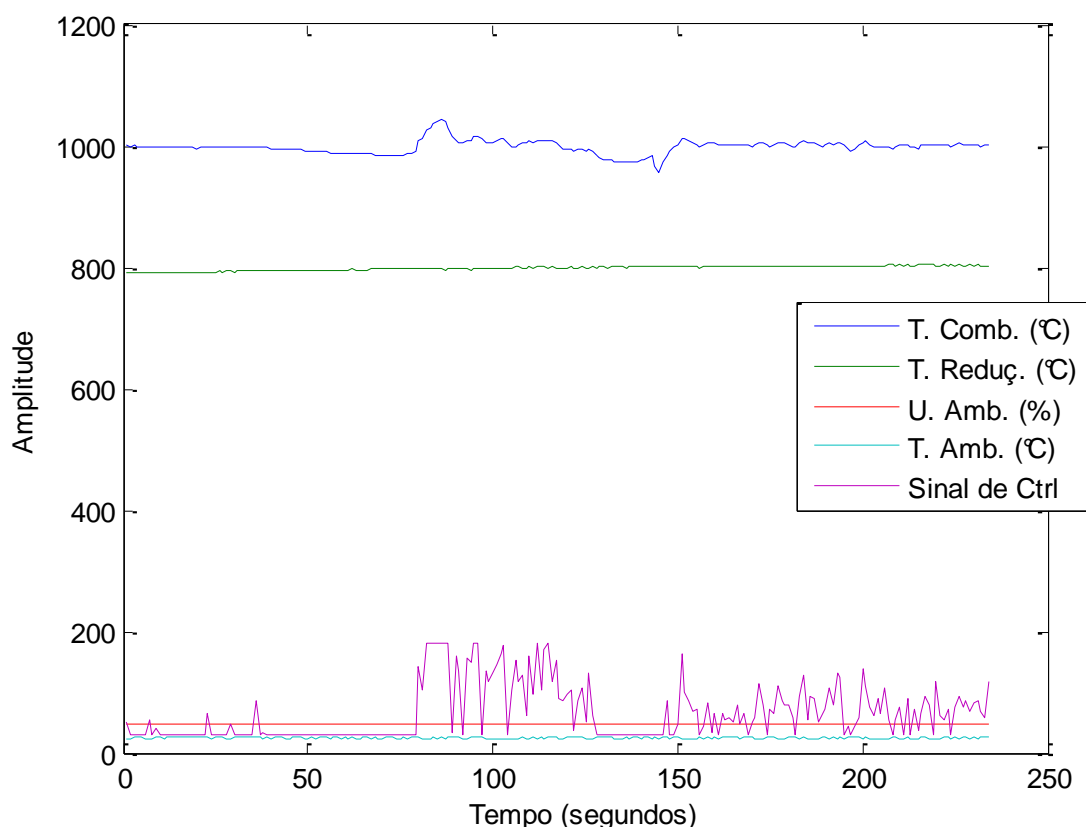


Figura 28 – Variação das temperaturas no teste do controlador PID.

A partir da observação do gráfico, é possível notar a atuação do controlador na presença de perturbações internas no sistema. Em cerca de 82 segundos, o controlador conseguiu estabilizar a temperatura da zona de combustão em 1000 °C após uma pequena variação. E depois continuou a manter a temperatura próxima ao *setpoint*.

A temperatura máxima alcançada foi de 1044,00 °C, o que corresponde a 4,40% de overshoot, a temperatura mínima alcançada foi de 956,25 °C o que corresponde a 4,37%. Esses valores estão abaixo dos valores definidos nas especificações, e, portanto, são aceitáveis.

Observou-se, ainda, o erro de regime permanente que foi de 1%, valor muito melhor que o definido como requisito para o projeto do controlador. O tempo de subida foi de 720 s e o tempo para regime permanente foi de 1360 s.

Teste 5 – Acionamento automatizado com análise dos gases e calibração da vazão mínima e máxima de ar.

Realizou-se o teste no dia 1º de junho de 2015, início às 13:00 h, a massa de carvão utilizada foi de 2,00 kg e a massa de lenha foi de 35,00 kg. Os dados de temperatura nas zonas de combustão e redução, temperatura e umidade ambiente e o sinal de controle estão mostrados na Figura 29.

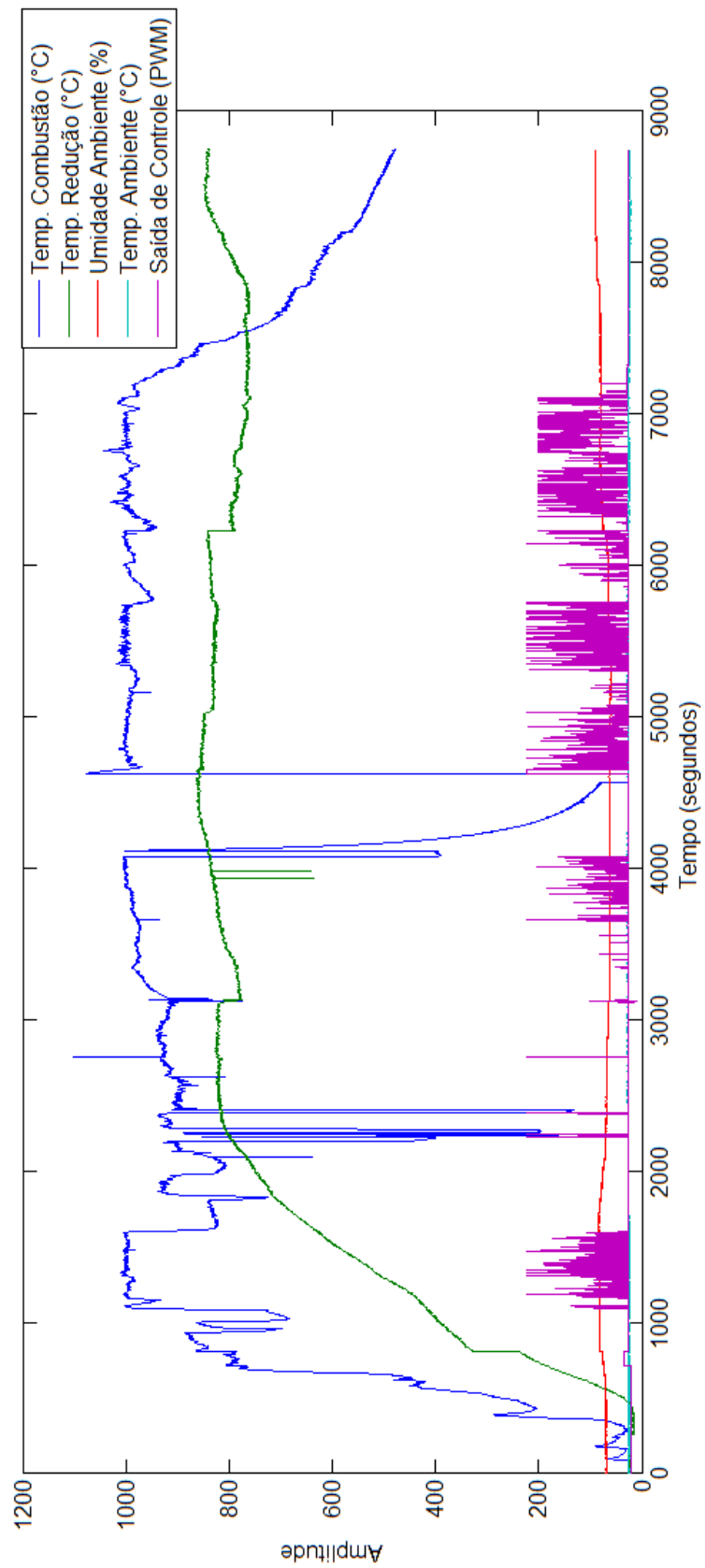


Figura 29 – Temperaturas no gaseificador, temperatura e umidade ambiente, e sinal de controle.

A partir da execução do quinto teste, observa-se que poderiam ocorrer falhas com a aquisição da temperatura da zona de combustão do reator de gaseificação. Para contornar esse possível problema, trocou-se o termopar e a gaseificação continuou de forma estável.

O PCI médio do gás gerado foi de 3580,29 kJ Nm⁻³, O PCI máximo alcançado foi de 4492,65 kJ Nm⁻³ que é compatível com os valores encontrados em Cortez *et al.* (2008) que indicam um gás com PCI próximo a 4500 kJ Nm⁻³ para gaseificadores de leito fixo do tipo concorrente.

Também neste teste foi determinado que a vazão máxima de ar primário deveria ser de 5,0 m s⁻¹ e a vazão mínima de 1,9 m s⁻¹. Isto para evitar combustão completa da biomassa e manter um fluxo mínimo de gás durante a gaseificação.

Teste 6 - Acionamento automatizado com análise dos gases e implementação do sistema de backup de temperatura

O teste foi realizado no dia 11 de junho de 2015, com início às 11:02 h, a massa de carvão utilizada para a partida foi de 1,90 Kg, e a massa de lenha de eucalipto foi de 31,50 kg. A produção de gás foi iniciada às 11:22 h e durou até 14:01 h. O poder calorífico inferior do gás foi mensurado pelo Gasboard 3300. A vazão do gás analisado foi de 0,25 L min⁻¹. Aplicou-se uma correção às concentrações percentuais dos gases devido à baixa vazão de ar. O PCI médio foi de 3506,97 kJ Nm⁻³, valor próximo ao encontrado por Guo *et al.* (GUO, DONG, *et al.*, 2014).

Após as falhas ocorridas com o termopar no teste anterior, decidiu-se implementar uma lógica que garanta robustez ao sistema. A nova programação verifica de forma contínua a solidez das leituras de temperatura da zona de combustão, e ao primeiro sinal de erros ou falsas leitura, o controlador passa a fechar a malha de controle com a temperatura da zona de redução. Também modificou-se o *setpoint* para 800°C.

A Figura 30 mostra os dados de temperatura e umidade ambiente, assim como a temperatura da zona de gaseificação e da zona de redução do reator durante o teste.

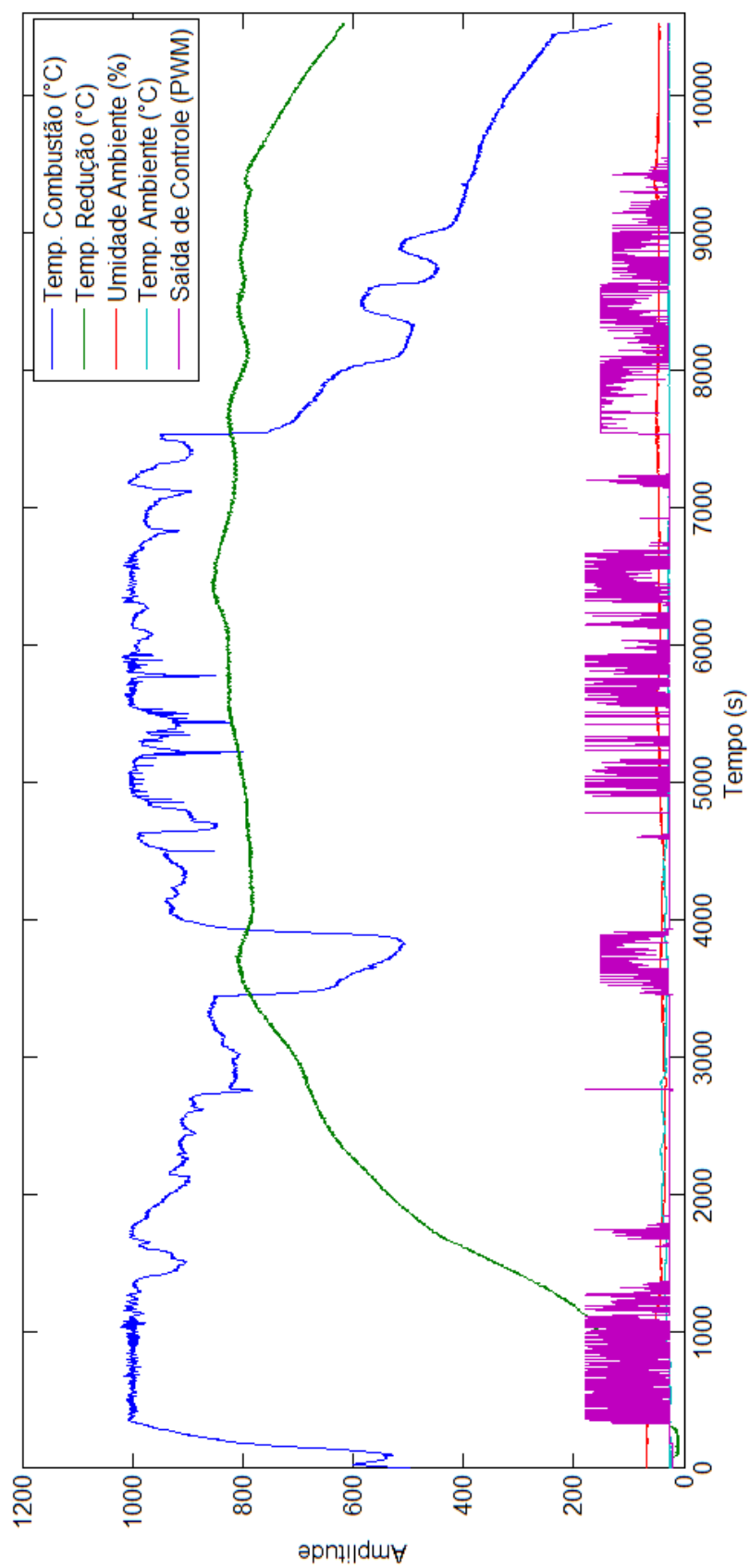


Figura 30 – Temperaturas no gaseificador, temperatura e umidade ambiente, e sinal de controle.

Observou-se nos testes que o controlador conseguiu manter a temperatura da zona de combustão próximo ao *setpoint*, e que diante das perturbações, como colapso de biomassa e falhas do termopar, o sistema conseguiu corrigir e continuar a gaseificação sem interrupções.

4.4. Análise do gás obtido na gaseificação utilizando o controlador

O gás foi analisado conforme a norma CETESB para análise de fontes estacionárias de emissão. A vazão do gás foi de 0,6 L min⁻¹ para análise no Gasboard 3300 (Figura 31). O gás foi resfriado a temperatura de 4°C para remoção de voláteis condensáveis com o auxílio de um *chiller*, depois o gás passou por filtros de álcool, sílica gel e carvão ativado para remover impurezas e umidade antes de ser analisado. Capturou-se o gás na saída do gaseificador com a ajuda de uma bomba peristáltica, e foi analisado à temperatura de 25 °C.



Figura 31 – Gasboard 3300.

Na Tabela 8, pode-se observar os percentuais dos gases mais importantes da gaseificação, assim como o PCI aproximado do gás da gaseificação que foi calculado com a equação 7.

Tabela 8 – Percentual de Gases da Análise e PCI.

CO (%)	CO2 (%)	CH4 (%)	H2 (%)	PCI (kJ Nm ⁻³)
11,34	1,94	2,03	6,55	2880,66

15,08	4,76	2,39	8,68	3709,68
17,18	8,16	2,20	9,92	4040,46
17,48	10,18	1,96	9,78	3948,34
16,44	12,85	1,26	9,26	3391,47
14,51	13,63	0,91	6,67	2838,79
12,85	14,37	0,73	5,71	2457,77
13,11	15,63	0,72	7,78	2780,17
13,79	16,42	0,72	7,73	2763,42
13,60	16,58	0,75	6,67	2683,87
15,27	16,46	2,15	11,95	4015,33
16,27	15,89	2,69	13,34	4438,22
17,03	15,49	2,64	13,06	4492,65
17,71	15,17	2,02	11,14	4161,88
18,63	14,63	1,45	9,97	3973,46
18,81	14,43	1,45	8,89	3843,67
19,50	14,27	1,16	9,19	3868,79
20,84	13,51	0,69	7,70	3705,50
23,64	12,07	0,32	6,57	3789,24
24,51	11,17	0,18	5,84	3755,74
24,46	10,63	0,11	4,70	3646,88

O PCI médio da gaseificação foi de 3580,29 kJ Nm⁻³, valor baixo, porém com potencial de ser aplicado em diversos processos agrícolas. O valor baixo pode ser explicado pela grande quantidade de calor que o gaseificador perde na zona de combustão para o ambiente. Recomenda-se, para projetos futuros, a adição de material refratário nessa região.

4.4.1 Eficiência da Gaseificação

A partir de consulta no software *Engineering Equation Solver* (EES) versão Demonstrativa, pode-se calcular os volumes específicos de cada um dos gases componentes do gás resultante da gaseificação. O volume específico para os principais gases componentes do gás resultante da gaseificação estão na Tabela 9.

Tabela 9 – Volume específico dos gases componentes do gás da gaseificação.

Gás	Volume Específico (Nm ³ kg ⁻¹)
CH ₄	0,6568
CO ₂	1,799
CO	1,145

H ₂	0,0824
N ₂	1,8800

Utilizando as concentrações de gases encontradas durante a análise, conseguiu-se estimar a eficiência da gaseificação. As concentrações médias do teste 5, estão mostrados na Tabela 10. Como o analisador de gases utilizado não era capaz de medir o percentual de N₂, adotou-se que o restante da concentração era desse gás, uma vez que ele não reage no processo termoquímico de gaseificação, com temperaturas menores de 1000°C.

Tabela 10 – Concentração média dos gases componentes do gás da gaseificação.

Gás	Concentração média (%)
CH ₄	1,3586
CO ₂	12,7733
CO	17,2405
H ₂	8,6238
N ₂	60,0038

Calculou-se o volume específico do gás com o auxílio da Equação 9, e, então, encontrou-se a eficiência da conversão usando a Equação 8.

A eficiência média a frio foi de 37,36%. Valor abaixo do encontrado em trabalhos que afirmam que a eficiência desse tipo de gaseificador é próxima a 70% (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008). Em outras publicações, encontram-se a eficiência a frio do gaseificador de leito fixo do tipo concorrente entre 40% e 67% (GUO, DONG, *et al.*, 2014); (PATIL, BHOI, *et al.*, 2011).

5. CONCLUSÕES

O gaseificador conseguiu produzir um gás de boa qualidade, com poder calorífico suficiente para ser utilizado em diversas aplicações, como, por exemplo, aquecimento de ambientes, ambientação animal, secagem de produtos agrícolas, queima em motores de combustão externa e interna para geração de energia mecânica e energia elétrica, etc.

Com os resultados obtidos nos experimentos, concluiu-se que:

- as biomassas (lenha e carvão) foram caracterizadas, e notaram-se boas qualidades para gaseificação: baixo teor de cinzas, elevado PCI e baixa umidade;

- a modelagem e identificação do sistema mostrou-se satisfatória mesmo utilizando-se apenas uma variável de entrada. A utilização de mais variáveis provavelmente levaria a uma representação mais próxima da realidade;

- o controlador do processo de gaseificação conseguiu manter o processo dentro das especificações técnicas desejadas, ainda que usando apenas uma variável para o controle. A utilização do malha de *backup* tornou o processo mais confiável;

- o PCI do gás resultante do processo de gaseificação mostrou-se compatível com valores citados na literatura. A eficiência do processo de conversão foi aceitável.

Após os trabalhos realizados com o gaseificador, evidenciou-se a necessidade de:

- melhora do projeto do gaseificador, com modificações na zona de combustão, para evitar avarias devido a danos térmicos;

- modificar o instrumento de medição da temperatura na zona de combustão. Este deve ser mais robusto, com encapsulamento cerâmico, para suportar atmosfera redutora com alta temperatura;

- construir um dispositivo de alimentação contínua da biomassa para o reator, que ajudaria a contribuir com a estabilidade da temperatura no interior do mesmo;

- de construção de um gasômetro, dessa forma seria possível armazenar o gás e permitir um fluxo constante do mesmo com um PCI médio estável;

- avaliar a implementação do sinal de controle como uma rampa;

- avaliar a possibilidade de implementar-se o controlador em dispositivos industriais, como Controladores Lógicos Programáveis (CLP), o que permitiria uma maior confiabilidade ao sistema e utilização industrial do gaseificador.

Ressalta-se, enfim, que o sistema foi construído utilizando apenas uma variável do processo para realimentação da malha de controle. Escolheu-se tal estratégia para diminuir os custos do projeto, e como entrada do processo utilizou-se apenas a velocidade do motor insuflador de ar. Para melhorar a precisão do controlador, as entradas velocidade do ar insuflado, massa de combustível no reator, umidade do combustível, e PCI do combustível bem como as saídas de temperatura da zona de combustão, temperatura da zona de gaseificação, PCI do gás produzido, volume de gás produzido, percentual dos gases CO e CO₂ na saída, deveriam ser mensuradas.

REFERÊNCIAS

AGUIRRE, L. A. **Introdução à Identificação de Sistemas – Técnicas Lineares e Não-Lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. 3ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, v. I, 2007.

ANALOG DEVICES. **AD595**. [S.I.].

BALL, S. R. **Embedded Microprocessor Systems: Real World Desing**. 3ª. ed. [S.I.]: Newnes, 2002. 362 p.

BRITISH PETROLEUM. **Statistical Review of World Energy 2015**. BP. [S.I.], p. 48. 2015.

CETESB. **Amostragem contínua de gases e vapores**: procedimento. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 1979. 20 p. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/userfiles/file/servicos/normas/vigentes/L9.200_Amostragem%20continua%20de%20gases%20e%20vapores.pdf>. Acesso em: 22 Junho 2015.

CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMÉZ, E. O. **Gaseificação**. 1ª. ed. Campinas, SP: Unicamp, 2008. 241-327 p.

GUO, F. et al. Effect of design and operating parameters on the gasification process of biomass in a downdraft fixed bed: An experimental study. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2014. 5625-5633. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319914002109>>.

HEY, H. L. **Apostila de Sistemas de Contole I**. 1ª. ed. [S.I.]: Projeto Reenge - Engenharia Elétrica, v. 1, 1997.

INTERACADEMY COUNCIL. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho**. São Paulo, p. 300. 2010.

IOPE. Literatura - 3) Termopares. **Site da IOPE - Instrumentos de Precisão Ltda**, 2012. Disponível em: <http://www.iope.com.br/3i_introducao.htm>. Acesso em: 22 Junho 2015.

LORA, E. E. S. et al. Gaseificação E Pirólise Para Conversão da Biomassa em Eletricidade e Biocombustíveis. In: _____ **Biocombustíveis**. 1^a. ed. Itajubá: UNIFEI, 2013. Cap. 6, p. 88. Disponível em: <http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/downloads_pt.html>. Acesso em: 30 Março 2014.

LOURENÇO, J. **Sintonia de Controladores P.I.D.** 1^a. ed. Rio de Janeiro: Escola Superior de Tecnologia, 1997. 12 p. Disponível em: <<http://todi.est.ips.pt/smarques/CS/Pid.pdf>>. Acesso em: 17 Setembro 2014.

MAXIM INTEGRATED. **Accurate Thermocouple-to-Digital Converter IC Simplifies Designs and Lowers System Cost**. [S.l.].

MCROBERTS, M. **Arduino Básico**. 1^a. ed. São Paulo: Novatec, 2011. 453 p.

MOREIRA, A. P. G. M.; COSTA, P. J. G.; SANTOS, P. J. L. D. **Introdução a Identificação de Modelos Discretos para Sistemas Dinâmicos**. Porto: Faculdade de Engenharia de Universidade do Porto, v. I, 2002. 114 p. Disponível em: <https://web.fe.up.pt/~amoreira/documentospdf/identif_jan2003.pdf>.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 1^a. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1982.

OGATA, K. **Discrete-Time Control Systems**. 2^a. ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1995. 744 p.

PATIL, K. et al. Biomass downdraft gasifier with internal cyclonic combustion chamber: Design, construction, and experimental results. **Bioresource Technology**, 102, 2011. 6286-6290. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852411003750>>.

QUIRINO, W. F. et al. Poder Calorífico da Madeira e de Resíduos Lignocelulósicos. **Biomassa e Energia**, 1, n. 2, 2004. 173-182.

RAHMAN, M. M. et al. Extension of energy crops on surplus agricultural lands: A potentially viable option in developing countries while fossil fuel reserves are diminishing. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 29, 2013. 108-119.

RAMAN, P.; RAM, N. K. Design improvements and performance testing of a biomass gasifier based electric power generation system. **Biomass and Bioenergy**, 56, 2013. 555-571. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0961953413003073>>.

REZENDE, O. L. T. **O Uso da Lógica Fuzzy no Controle das Temperaturas de um Conjunto Gaseificador/Combustor de Biomassas**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2012.

ROSA, R. A. et al. Qualidade do Carvão Vegetal para Consumo Doméstico. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, 3, n. 2, 2012. 41-48. Disponível em: <<http://revista.uft.edu.br/index.php/JBB/article/viewFile/196/135>>. Acesso em: 19 Junho 2015.

SÁNCHEZ, C. C. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. 1ª. ed. Campinas, SP: Átomo, 2010.

SANTOS, I. D. S. D. **Reator de Gaseificação de Biomassa em Fluxo Contracorrente**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 88. 2003.

SCHLITTLER, L. A. F. S. et al. Gaseificação de Biomassa. **Diálogos & Ciência - Revista da Rede de Ensino FTC**, v. 11, n. III, p. 10, 2009.

SOARES, V. C. et al. Correlações Entre as Propriedades da Madeira de do Carvão Vegetal de Híbridos de Eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, 38, n. 3, 2014. 534-549. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v38n3/v38n3a17.pdf>>. Acesso em: 19 Junho 2015.

TAPPI. TAPPI test methods T 257 cm-85: sampling and preparing wood for analysis. In: INDUSTRY, T. A. O. T. P. A. P. **Standard Method**. [S.l.]: Atlanta, 2001. p. CD-ROM.

ZANATTA, F. L. **Desenvolvimento e Avaliação de um Gaseificador de Biomassa e Estudo do Potencial de Produção de Biogás com Resíduos Agrícolas e da Avicultura**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 98. 2011.

ZHANG, J. J.; SMITH, K. R. Household Air Pollution from Coal and Biomass Fuels in China: Measurements, Health Impacts, and Interventions. **Environ Health Perspect**, 27 Fevereiro 2007. 848–855. Acesso em: 13 Outubro 2014.

ZUBEN, F. J. V. **Identificação de Sistemas Dinâmicos e Predição de Séries Temporais**. Não Publicado. ed. Campinas: UNICAMP, v. I, 2010. 14 p. Disponível em:
<ftp://ftp.dca.fee.unicamp.br/pub/docs/vonzuben/ea616_1s10/notas_de_aula/topico12_EA616_1s2010.pdf>.

APÊNDICE A – Códigos utilizados

Código utilizado no Arduino UNO:

```
/* Controlador para gaseificador de biomassa v0.3 */
// Libraries
#include <Adafruit_MAX31855_DUE.h>
#include <dht11.h>
#include <SPI.h>
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include <PID_v1.h>
#include "RTCLib.h"

// variáveis estáticas
const int ledPin = 13; // Pin LED para verificar a execução
#define DHT11PIN A0 // Entrada do DHT11
dht11 DHT; // Criando objeto DHT
#define DO_0 2 // Pino dados MAX31855
#define DO_1 3 // Pino dados do segundo MAX31855
#define CS 4 // Pino CS MAX31855
#define CLK 5 // Pino CLK MAX31855
Adafruit_MAX31855 thermocouple_0(CLK, CS, DO_0); // Instanciando o objeto
Adafruit_MAX31855 thermocouple_1(CLK, CS, DO_1);
RTC_DS1307 rtc; // Instanciando o objeto RTC
const long interval = 1000; // interval to refresh (milliseconds)
int Inv1pin = 9; // Pino conectado ao Inversor do ar primário
int Inv2pin = 10; // Pino conectado ao Inversor do misturador de ar

// Variáveis modificáveis
unsigned long previousMillis = 0; // will store last time LED was updated
unsigned long currentMillis = millis();
int ledState = LOW;
char buffer[10]; // Variável que recebe os dados da Serial
double t0 = 0; // Recebe a temperatura da zona de combustão
double t1 = 0; // Recebe a temperatura da zona de redução
float h_amb = 0; // Recebe a humidade ambiente
float t_amb = 0; // Recebe a temperatura ambiente
boolean modo = true; // Recebe o modo de operação true = automático / false =
manual
double Setpoint_comb, Input_comb, Output_comb;

PID PID_comb(&Input_comb, &Output_comb, &Setpoint_comb, 5.1, 0.451, 3.72,
REVERSE);

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4); // set the LCD address to 0x27 for a 16 chars and
2 line display

void setup() {
```

```

// Configuração da comunicação serial
Serial.begin(9600, SERIAL_8N1);
Serial.println("Gasifier Controler 1.0");
Serial.flush();
// Configuração do RTC
#ifdef AVR
Wire.begin(); //A5 SCL; #A4 SDA
#else
Wire1.begin(); // Shield I2C pins connect to alt I2C bus on Arduino Due
#endif
rtc.begin();

if (! rtc.isrunning()) {
  Serial.println("RTC is NOT running!");
  // following line sets the RTC to the date & time this sketch was compiled
  rtc.adjust(DateTime(__DATE__, __TIME__));
}

// Configuração dos Pinos
pinMode(ledPin, OUTPUT); // test led
pinMode(Inv1pin, OUTPUT);
pinMode(Inv2pin, OUTPUT);
analogWrite(Inv2pin, 200); // Inicia o motor do combustor em baixa rotação

// Configuração do LCD
lcd.init(); // initialize the lcd
lcd.backlight();
lcd.print("Gasifier Controler 1.0");

// wait for MAX chip to stabilize
delay(100);
lcd.clear();

// PID_Combust setup
//initialize the variables we're linked to
Setpoint_comb = 1000;
//tell the PID to range between 0 and the full window size
PID_comb.SetOutputLimits(20, 223);
//turn the PID on
PID_comb.SetMode(AUTOMATIC);
PID_comv.SetSampleTime(1000);
}

void loop() {
  DateTime now = rtc.now();
  // basic readout, just get the current temp
  double tC_new = thermocouple_0.readCelsius();
  double tR_new = thermocouple_1.readCelsius();
  if (!isnan(tC_new)) {
    t0 = tC_new;

```

```

}
if (!isnan(tR_new)) {
  t1 = tR_new;
}
// Ação do controlador PID combustão
if (modo) {
  if (t0 >= t1){
    Setpoint_comb = 1000;
    Input_comb = t0;
    if (t0 < 800){
      PID_comb.SetOutputLimits(20, 223);
    }
    else PID_comb.SetOutputLimits(25, 130);
  }
  else if (t0 < t1){ // Caso o termopar da zona de combustão apresente falhas
    Input_comb = t1;
    Setpoint_comb = 800;
    PID_comb.SetOutputLimits(30, 130);
  }
  PID_comb.Compute();
  analogWrite(9, Output_comb);
}
// Atualizações que devem ser feitas de 1 em 1 segundo
unsigned long currentMillis = millis();
if (currentMillis - previousMillis >= interval) {
  // save the last time you blinked the LED
  previousMillis = currentMillis;
  //Leitura do DHT 11
  int chk = DHT.read(DHT11PIN);
  h_amb = DHT.humidity;
  t_amb = DHT.temperature;
  // Atualiza valores no LCD
  print_LCD();
  lcd.setCursor(8, 0);
  lcd.print((float)h_amb, 0);
  lcd.setCursor(18, 0);
  lcd.print((float)t_amb, 0);
  lcd.setCursor(5, 1);
  lcd.print(t0, 0);
  lcd.setCursor(15, 1);
  lcd.print(t1, 0);
  lcd.setCursor(12, 2);
  lcd.print(Output_comb, 0);
  lcd.setCursor(5, 3);
  lcd.print(now.hour());
  lcd.print(":");
  lcd.print(now.minute());
  lcd.print(":");
  lcd.print(now.second());
  // if the LED is off turn it on and vice-versa:

```

```

ledState = !ledState;
// set the LED with the ledState of the variable:
digitalWrite(ledPin, ledState);
}
if (Serial.available() > 0) { // Leitura dos dados na porta serial
  int index = 0;
  delay(100); // espera o buffer encher
  int numChar = Serial.available();
  if (numChar > 10) {
    numChar = 10;
  }
  while (numChar-- > 0) {
    buffer[index++] = Serial.read();
  }
  splitString(buffer);
}
}

void print_LCD() {
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0);
  lcd.print("HAmb(%):");
  lcd.setCursor(10, 0);
  lcd.print("TAmb(C):");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("TCom:");
  lcd.setCursor(10, 1);
  lcd.print("TRed:");
  lcd.setCursor(0, 2);
  lcd.print("Output_Com:");
  lcd.setCursor(0, 3);
  lcd.print("Hora: ");
}

void splitString(char* data) {
  char* parameter;
  parameter = strtok(data, ";");
  while (parameter != NULL) {
    setInversor(parameter);
    parameter = strtok(NULL, ";");
  }
  // limpa o texto e os buffers seriais
  for (int i = 0; i < 10; i++) {
    buffer[i] = '\0';
  }
  Serial.flush();
}

void setInversor(char *data) {
  if (data[0] == 'A') { // Recebe controle manual de vazão de ar do gaseificador

```

```

modo = false;
int valor0 = strtol(data + 1, NULL, 10);
valor0 = constrain(valor0, 0, 255);
analogWrite(Inv1pin, valor0);
Output_comb = valor0;
Serial.print(t0, 2);
Serial.print(';');
Serial.print(t1, 2);
Serial.print(';');
Serial.print((float)h_amb);
Serial.print(';');
Serial.print((float)t_amb);
Serial.print(';');
Serial.println(Output_comb);
}
else if (data[0] == 'B') { // Recebe o valor de controle do motor do combustor
int valor1 = strtol(data + 1, NULL, 10);
valor1 = constrain(valor1, 0, 255);
analogWrite(Inv2pin, valor1);
}
else if (data[0] == 'S') { // Recebe um novo valor para o Setpoint
int valor2 = strtol(data + 1, NULL, 10);
valor2 = constrain(valor2, 0, 1100);
Setpoint_comb = valor2;
}
else if (data[0] == 'L') { // Aquisição de Dados do modo Automático
modo = true; // Ativa o modo automático
// Atualiza valores na porta serial
Serial.print(t0, 2);
Serial.print(';');
Serial.print(t1, 2);
Serial.print(';');
Serial.print((float)h_amb);
Serial.print(';');
Serial.print((float)t_amb);
Serial.print(';');
Serial.println(Output_comb);
}
}
}

```

Código usado no MatLab para identificação do sistema:

```

UNO = serial('COM9','BaudRate',115200);
fopen(UNO);
fscanf(UNO)
fprintf(UNO,'B210');
disp('Tempo sugerido: 4995 ou 12600')

```

```

i=input('Entre com o tempo em segundos do experimento: ')
%      n°_pts In Frqs T_sinal cosnt_por 1/.003 pwm min=35 max=70
u = idinput([i 1 1], 'prbs', [0 .003], [35 70], []);
dados = zeros(i,4);
TimeVector = zeros (i,1);
tempo = 1000;
T1 = clock;
tic; %Armazena o tempo do início
while tempo <= i
    %fprintf(UNO,'L');
    fprintf(UNO, strcat('A', num2str(u(tempo))));
    dados(tempo,:) = str2num(fscanf(UNO));
    TimeVector(tempo) = toc;
    tempo = tempo+1;
    plot(dados, 'DisplayName', 'Aquisição das Variáveis Térmicas')
    pause(.7);
end
T2 = clock;
T_total = etime(T2, T1) %calcula o tempo total do teste
fclose(UNO);
save gasei_5;
%% Prepara os dados a serem utilizados no toolbox e acha o período de
amostragem

for j= 1:(i-1)
time(j)=TimeVector(j+1)-TimeVector(j);
end
Ts=mean(time);

data = iddata([dados(:,3:4)], [u dados(:,1:2)], [Ts]);

```

Código usado para aquisição de dados no MatLab:

```

%clear all;close all; clc;
%% Criar o objeto na porta serial
%UNO = serial('COM9','BaudRate',9600);
%% Abrir o Objeto
%fopen(UNO);
%% Verificar a comunicação
%fscanf(UNO)
%fprintf(UNO,'S1000'); %Define o Setpoint
disp('Rotina para aquisição de dados com tempo definido, tempo sugerido: 12600')
i=input('Aquisição de dados do modo Automático, entre com o tempo desejado: ')
dados = zeros(i,5);
TimeVector = zeros (i,1);
tempo = 1;
T1 = clock;
tic; %Armazena o tempo do início

```

```

while tempo <= i
    fprintf(UNO,'L'); % Comando para ativar o modo automático
    dados(tempo,:)=str2num(fscanf(UNO));
    TimeVector(tempo) = toc;
    tempo = tempo+1;
    plot(dados,'DisplayName','Aquisição das Variáveis Térmicas')
    pause(.7);
end
T2 = clock;
T_total= etime(T2,T1)%calcula o tempo total do teste
%fclose(UNO);
save controle_5;
% Cálculo do período médio de amostragem
for j= 1:(i-1)
    time(j)=TimeVector(j+1)-TimeVector(j);
end
Ts=mean(time);

```

APÊNDICE B – Diagrama elétrico do controlador

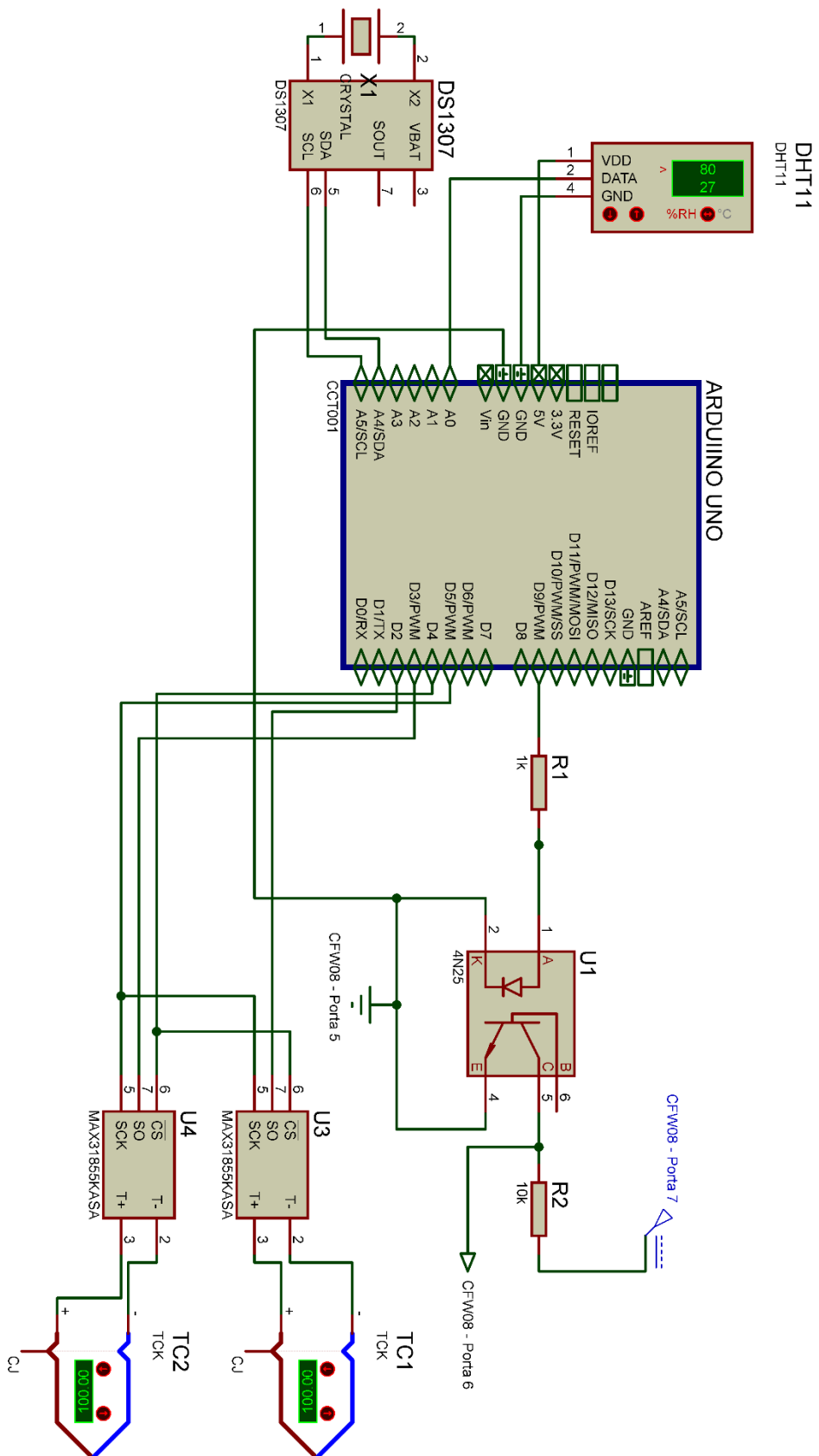


Figura 32 - Diagrama Elétrico do Sistema de Controle.