

MICHAEL DE OLIVEIRA RESENDE

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA EM UM  
GASEIFICADOR DE FLUXO CONCORRENTE**

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  
2016

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

T

R433s  
2016 Resende, Michael de Oliveira, 1989-  
Sistema automático de alimentação de biomassa em um  
gaseificador de fluxo concorrente / Michael de Oliveira Resende.  
– Viçosa, MG, 2016.  
xi, 81f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Jadir Nogueira da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.88-90.

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

CDD 22. ed. 665.772

MICHAEL DE OLIVEIRA RESENDE

**SISTEMA AUTOMÁTICO DE ALIMENTAÇÃO DE BIOMASSA EM UM  
GASEIFICADOR DE FLUXO CONCORRENTE**

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: 23 de fevereiro de 2016.

---

Paulo Marcos de Barros Monteiro  
(Coorientador)

---

André Gomes Torres

---

Jadir Nogueira da Silva  
(Orientador)

À Deus e a minha família, base de toda a minha vida.

*“Quanto maior o conhecimento menor o ego, quanto maior o ego menor o conhecimento.”*  
*(Albert Einstein)*

## AGRADECIMENTOS

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

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

Aos professores Roberto Precci e ao professor Paulo Monteiro pelos conselhos e dedicação no desenvolvimento do trabalho.

Aos funcionários da serralheria da UFV, pela ajuda na montagem do protótipo.

Ao Professor Volkhard Sholz, pelas sugestões e ideias.

Aos amigos e colegas de pós-graduação Rúben Cristian e Felipe Dalólio pelas discussões e conselhos. Aos estagiários Ana Claudia e Rafael Crouze pela ajuda no desenvolvimento dos experimentos.

À minha família pelo apoio incondicional sempre torcendo por mim e comemorando em todas as minhas vitórias.

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

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

## SUMÁRIO

LISTA DE ILUSTRAÇÕES .....	vii
LISTA DE TABELAS .....	ix
RESUMO .....	x
ABSTRACT .....	xi
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Objetivo geral .....	4
1.2. Objetivos específicos .....	4
2. APORTES TEÓRICOS.....	5
2.1. Gaseificação da biomassa .....	5
2.1.1. Histórico do desenvolvimento da gaseificação no mundo.....	7
2.1.2.1. Reações heterógenas gás-sólidos.....	10
2.1.2.2. Reações homogêneas (fase gasosa).....	11
2.1.2.3. Craqueamento do alcatrão .....	11
2.1.3. Variáveis importantes no processo de gaseificação .....	12
2.1.3.1. Fator de Ar.....	12
2.1.3.2. Temperatura.....	14
2.1.3.3. Capacidade de produção de gás.....	14
2.1.3.4. Composição e poder calorífico do gás produzido .....	14
2.1.3.5. Eficiência da gaseificação .....	15
2.1.4. Classificação e tipos de reatores de gaseificação .....	16
2.1.4.1. Gaseificador contracorrente.....	17
2.1.4.2. Gaseificador concorrente.....	18
2.1.4.3. Gaseificador de fluxo cruzado.....	19
2.1.4.4. Gaseificador de leito fluidizado.....	20
2.1.5. Aplicações da gaseificação na geração de energia.....	21
2.1.5.1. A gaseificação gerando energia elétrica .....	23
2.2. Controle e Automação de Sistemas .....	25
2.2.1. Controladores Lógicos Programáveis (CLP) .....	28
2.2.1.1. Unidade central de processamento .....	30

2.2.1.2. Bloco de memória.....	31
2.2.1.3. Módulos de entrada/saída (E/S).....	32
2.2.1.4. Funcionamento dos Controladores Lógicos Programáveis .....	35
2.2.2. Instrumentação de Sistemas .....	37
2.2.3. Sistema SCADA no controle de processos .....	38
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	40
3.1. Gaseificador de fluxo concorrente .....	40
3.2. Caracterização da biomassa .....	40
3.3. Sistema de alimentação de biomassa .....	42
3.3.1. Armazenamento da biomassa.....	43
3.3.2. Correia transportadora da biomassa .....	44
3.3.3. Sistema de abertura e fechamento do gaseificador .....	46
3.3.4. Controlador Lógico programável e IHM .....	47
3.3.5. Instrumentos de medidas.....	49
3.3.5.1. Medida do nível de biomassa do reator .....	49
3.3.5.2. Medida do nível do sistema de armazenamento.....	52
3.3.5.3. Chaves fim de curso .....	53
3.4. Análise do gás e eficiência do reator .....	54
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
4.1. Caracterização da biomassa utilizada .....	56
4.2. Sistema automático de alimentação de biomassa .....	58
4.3. Controlador e Interface Homem-Máquina.....	63
4.4. Análise da gaseificação.....	70
5. CONCLUSÕES .....	74
REFERÊNCIAS .....	75
ANEXO .....	78

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Etapas principais da Gaseificação.....	6
Figura 2 - Gaseificador Automotivo - produzido no Brasil.....	9
Figura 3 - Reator Contracorrente.....	17
Figura 4 - Gaseificador concorrente. ....	18
Figura 5 - Gaseificador de fluxo cruzado. ....	19
Figura 6 - Gaseificadores de leito borbulhante e fluidizado.....	20
Figura 7 - Relação Poder Calorífico e aplicação do gás. ....	22
Figura 8 - Cogeração de Energia. ....	23
Figura 9 - Componentes básicos de um sistema automatizado. ....	26
Figura 10 - Sistema de controle em malha aberta. ....	27
Figura 11 - Controle malha fechada. ....	28
Figura 12 - Arquitetura de um CLP.....	30
Figura 13 - Entradas Digitais: (A) Entrada CC; (B) Entrada CA.....	34
Figura 14 - Módulos de saída: (A) Saída a TRIAC; (B) Saída a Transistor; (C) Saída à relé. ....	34
Figura 15 - Esquema de ligação módulo analógico. (A) Entradas analógicas; (B) Saídas Analógicas. ....	35
Figura 16 - Fluxograma de funcionamento de um CLP.. ....	37
Figura 17 - Componentes Básicos de um sistema SCADA. ....	39
Figura 18 - Esquema do reator e partes constituintes.....	40
Figura 19 - Esquema geral do sistema mecânico desenvolvido.....	42
Figura 20 – Lógica de funcionamento do sistema de automação.....	43
Figura 21 - Modelos de silos testados. ....	44
Figura 22 - Correia sem fim. ....	45
Figura 23 - Sistema de abertura e fechamento do gaseificador.....	46
Figura 24 - Interface de operação PLC 300.....	48
Figura 25 - Vista traseira e módulos do PLC 300.. ....	49
Figura 26 - Configuração Célula de carga. ....	50
Figura 27 - Célula de carga utilizada.....	51
Figura 28 - Montagem da célula de carga embaixo do gaseificador.....	51
Figura 29 - Esquema elétrico de ligação Célula de carga.....	52
Figura 30 - Sensor ótico de barreira.. ....	52

Figura 31 - Funcionamento dos sensores de barreira. ....	53
Figura 32 - Esquema de ligação dos sensores fotoelétrico de barreira.....	53
Figura 33 - Chave fim de curso. ....	53
Figura 34 - Sistema de resfriamento, filtragem e análise do gás.....	54
Figura 35 - Lenha de eucalipto utilizada como combustível.....	56
Figura 36 - Vista interna do silo utilizado. ....	59
Figura 37 - Sistema de armazenamento e medição de nível.....	60
Figura 38 - Esteira transportadora com a calha carregada de biomassa.....	61
Figura 39 - Componentes de tração e movimentação da esteira. ....	62
Figura 40 - Sistema de abertura e fechamento do reator. ....	62
Figura 41 - Sistema de abertura em pleno funcionamento do reator.....	63
Figura 42 - Esquema elétrico das entradas do CLP.....	65
Figura 43 - Esquema elétrico das saídas e da alimentação do CLP. ....	65
Figura 44 - Curva de Calibração da célula de carga.....	66
Figura 45 - Quadro de comando do sistema. ....	67
Figura 46 - Página Inicial do sistema supervisório.....	69
Figura 47 - Gráfico de tendência da massa dentro do reator. ....	70
Figura 48 - Temperatura na zona de redução, gaseificação e temperatura ambiente.....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise elementar e relação estequiométrica para madeira de eucaliptos com 15% de umidade em base .....	13
Tabela 2 - Classificação dos gaseificadores. ....	16
Tabela 3 - Maturidade tecnológica e viabilidade comercial de diferentes tecnologias para a geração de eletricidade a partir da biomassa (A – Alta, M – Média, B – Baixa). ....	24
Tabela 4 - Dispositivos de entrada e saída. ....	33
Tabela 5 - Dispositivos Analógicos e <i>multibits</i> . ....	35
Tabela 6 - Características da lenha de eucalipto.....	57
Tabela 7 - Características físicas da lenha do eucalipto. ....	57
Tabela 8 - Tabela de entradas e saídas do CLP usadas. ....	64
Tabela 9 - Condições de acionamento das saídas.....	67
Tabela 10 - Valores da análise feita do gás. ....	71
Tabela 11 - Análise estatística dos dados coletados do gás.....	71
Tabela 12 - Volume específico dos gases componentes. ....	72

## RESUMO

RESENDE, Michael de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Sistema automático de alimentação de biomassa em um gaseificador de fluxo concorrente.** Orientador: Jadir Nogueira da Silva. Coorientadores: Roberto Precci Lopes e Paulo Marcos de Barros Monteiro.

O presente trabalho objetivou-se na construção de um sistema automático de alimentação de biomassa para um gaseificador com reator do tipo concorrente. O processo de gaseificação apresenta-se como uma alternativa sustentável às fontes de energia não renováveis, causando menor impacto ambiental na geração de energia térmica ou elétrica. Porém, os reatores menores não apresentam um sistema contínuo de geração de energia, pois eles gaseificam apenas o que está contido internamente no reator. Quando essa carga de biomassa acaba é necessário abrir o gaseificador e enche-lo novamente, o que reiniciaria o processo. Portanto, para utilização na maioria das aplicações, a disponibilidade de energia térmica ou elétrica é necessária continuamente. Outra aplicação do sistema automático na alimentação é a facilidade de operação, ajudando a disseminar a tecnologia da gaseificação de biomassa. Com o problema exposto, foi feita a automação do processo de alimentação de biomassa, utilizando para isso, componentes de automação e instrumentação industrial. A lógica da alimentação da biomassa foi implementada em um controlador lógico programável (CLP) e sensores e atuadores serão responsáveis por passar informações do processo ao CLP e vice-versa. Foram feitos três testes para que pudesse ser observado o comportamento do sistema e também verificar a influência deste na gaseificação como um todo. Os resultados encontrados foram satisfatório para todos os testes, sendo que o sistema de automação proporcionou maior facilidade de operação do reator e a geração de gás combustível apresentou-se de forma intermitente, sem a necessidade de intervenção de operadores, excetuando para o enchimento do silo de armazenamento. O gás gerado apresenta boa qualidade e com PCI dentro dos valores teóricos esperados, sendo possível a aplicação na geração de energia térmica e elétrica em qualquer atividade agrícola.

## ABSTRACT

RESENDE, Michael de Oliveira, M.Sc., Federal University of Viçosa, February, 2016. **Automatic feeding biomass into a gasifier concurrent flow**. Adviser: Jadir Nogueira da Silva. Co-advisers: Roberto Precci Lopes and Paulo Marcos de Barros Monteiro.

This work aimed to the construction of an automatic biomass supply system for a gasifier with competitor type reactor. The gasification process is presented as a sustainable alternative to non-renewable energy sources, causing lower environmental impact to generate heat or electricity. However, the smaller reactors do not have a continuous system of power generation, they gasify just what is contained inside the reactor. When this biomass load just need to open the gasifier and fills it again, this would reinitiate the process. Therefore, for use in most applications the availability of thermal or electric energy is required continuously for the whole time, another application of the system in automatic feeding is ease of operation helping to spread the biomass gasification technology. With the exposed problem, the automation of the biomass feeding process was performed, using for this, automation components and industrial instrumentation. The biomass supply system logic was implemented in a programmable logic controller (PLC), and sensors and actuators will be responsible for passing process information to the PLC and vise- versa. Three tests were made for be observed system behavior and also check the influence of this on gasification as a whole. The results were satisfactory for all tests, with the automation system provided higher reactor ease of operation and the generation fuel gas, has performed intermittently without the need for operator intervention only for filling the storage silo. The generated gas made up of good quality and PCI within the theoretical expected values and practical application in the generation of thermal and electrical energy in any agricultural activity.

## 1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da humanidade sempre esteve associado à capacidade do homem de utilizar a energia em diferentes formas. No início, a energia térmica para aquecimento e preparo de alimentos era obtida exclusivamente da combustão de madeira. Nos tempos modernos, com o avanço da sociedade, novas demandas de energia surgiram. No mundo, cerca de 90% da demanda de energia é suprida por combustíveis não renováveis, cuja extração e uso vêm contribuindo severamente para a emissão de gases de efeito estufa e esgotamento das reservas existentes (EPE, 2015). Portanto, fontes alternativas e renováveis de energia fazem-se indispensáveis para que se obter uma matriz energética diversificada e que afete menos o meio ambiente em que vivemos.

Uma forma de energia considerada renovável e com menor impacto ambiental é a proveniente da biomassa, pois, no seu ciclo de conversão em energia por combustão ocorre a liberação de dióxido de carbono, que é utilizado no processo de fotossíntese dos vegetais. A biomassa é definida como todo material constituído principalmente de substâncias orgânicas de origem animal e vegetal. Alguns exemplos de biomassas consideradas tradicionais são, resíduos animais, agrícolas e florestais. Também temos a biomassa, que é muito presente nos tempos atuais, composta por matéria orgânica de resíduos domésticos e industriais (CORTEZ, GOMEZ e LORA, 2008).

A biomassa no Brasil apresenta-se como uma fonte importante de energia, pois é muito abundante em áreas de cultivo agrícola e nas agroindústrias. A biomassa é uma fonte alternativa de energia que oferece ganhos econômicos e ambientais significativos, pois, diminui a dependência de combustíveis derivados do petróleo (CHAVES, 2012).

A energia da biomassa apresenta muitas vantagens, porém, tem-se como principais desvantagens, para utilização como combustível sólido, a dificuldade no manejo e a inexistência de portabilidade para os motores móveis. Uma alternativa para contornar essas dificuldades é a conversão de biomassa sólida em combustíveis líquidos e gasosos, utilizando processos químicos (pirólise, gaseificação) ou biológicos (fermentação) (FIGUEIREDO, 2012).

Segundo Cortez, Gomez e Lora (2008) a gaseificação pode ser enunciada como um processo termoquímico no qual se converte materiais no estado sólido, que tenham em sua composição carbono, em gás combustível, por meio de sua oxidação parcial a temperaturas elevadas, sendo esta na faixa de 800°C a 1100°C e pressão de até 3,3 MPa.

O agente oxidante usado pode ser o ar, o vapor de água, o oxigênio ou uma combinação destes, sendo fornecidos em quantidades restringidas, sempre menor que a estequiométrica. Como o agente oxidante não é o suficiente para ocorrer à combustão completa, o carbono e o hidrogênio presentes na biomassa não são totalmente oxidados, dando origem a compostos combustíveis, como o CO, H<sub>2</sub> e CH<sub>4</sub>, entre outros produtos.

As possibilidades de aplicação para o gás oriundo desta reação termoquímica são várias. Cita-se como exemplos o uso em motores de combustão interna (MACI) e turbinas a gás (TG) para geração de energia elétrica e mecânica e na queima direta para geração de energia térmica (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Diversas pesquisas foram desenvolvidas no intuito de criar inovações e soluções para disseminar o conhecimento do processo de gaseificação em vários campos de aplicação, para suprir necessidades da sociedade moderna em áreas estratégicas da economia, como a geração de energia elétrica, de biocombustíveis e de insumos com alto valor agregado (CORTEZ, GOMEZ e LORA, 2008).

Atualmente, existem esforços concentrados, principalmente, em países emergentes como o Brasil, a Índia e a China, para o aprimoramento de projetos de gaseificadores através de pesquisa, inovação, desenvolvimento de unidades e na disseminação da tecnologia de gaseificação (CORTEZ, GOMEZ e LORA, 2008).

Com a finalidade de tornar a tecnologia da gaseificação da biomassa mais eficiente e de fácil operação, controle e manutenção, surge à necessidade do desenvolvimento de controladores automáticos para o processo de gaseificação, que incluem tanto o controle do fornecimento do agente oxidante ao processo, quanto o de entrada de combustível (biomassa) no reator. A redução da intervenção do homem, por meio de controladores automáticos, surge como alternativa para melhorar a eficiência e a confiabilidade da gaseificação de biomassa.

A automação é uma ferramenta importante em qualquer processo produtivo, pois possibilita uma produção mais eficiente, padronizada e com menor interferência humana, diminuindo assim custos de produção (MARTINS, 2012).

Na agricultura moderna, os sistemas de controle ajudam a otimizar os recursos produtivos, aumentar a competitividade no mercado, aumentar a produtividade e, conseqüentemente, proporcionar redução de custos. Podem-se destacar várias vantagens do uso de sistemas automáticos na agricultura como: diminuição de mão-de-obra, aumento da precisão na operação de sistemas de apoio à agricultura em geral, como sistemas de irrigações, sistema de controle de temperatura em aviários, diminuição da potência de acionamentos, entre outros (SUZUKI e HERNANDEZ).

Na Universidade Federal de Viçosa já foram desenvolvidos alguns tipos de gaseificadores que podem ser citados como referência (SANTOS, 2003), (ZANATTA, 2011), (REZENDE, 2012). Essas pesquisas tiveram como foco principal a construção e teste de gaseificadores de biomassa de fluxo concorrente e/ou contracorrente, sendo usados para produzir ar quente na secagem de grãos, entre outros fins.

O presente trabalho foi dividido em capítulos, deixando-o em formato de fácil entendimento. O primeiro capítulo apresenta a introdução, o segundo capítulo do trabalho apresentam os aportes teóricos necessários para o seu desenvolvimento, sendo composto por uma revisão sobre gaseificação da biomassa e suas aplicações e uma revisão sobre automação de processos.

Descritos no terceiro capítulo encontram-se os métodos usados para projetar o sistemas de alimentação de biomassa, bem como apresentação de todos os equipamentos utilizados em sua automação.

Os testes realizados são apresentados no quarto capítulo bem como os resultados obtidos, referentes ao cálculo da eficiência do reator e a análise dos gases. No último capítulo estão as conclusões do trabalho.

## **1.1. Objetivo geral**

Objetivou-se com este trabalho desenvolver um sistema automático de alimentação de biomassa em um gaseificador de leito concorrente, com a finalidade de facilitar sua operação.

## **1.2. Objetivos específicos**

- Dimensionar e construir todos os componentes do sistema de alimentação;
- Desenvolver e avaliar o desempenho do sistema lógico de automação durante a gaseificação de biomassa;
- Desenvolver uma interface homem máquina, para ser usada como um sistema de automação e controle de forma remota.
- Comparar a operação do sistema automático, com a gaseificação feita de forma convencional (sem automação), principalmente o rendimento do reator e a qualidade do gás gerado nos dois casos.

## 2. APORTES TEÓRICOS

Para nortear o entendimento do trabalho é necessário fazer uma revisão sobre alguns temas centrais do projeto em questão, que serão abordados neste capítulo.

No estudo sobre gaseificação, é necessário fazer uma revisão sobre todo o processo, principalmente em relação à reação termoquímica, aos tipos de reatores existentes e às possibilidades de utilização desta tecnologia.

Na abordagem do segundo tema central do trabalho, é necessária uma visão sobre automação e instrumentação de processos, bem como uma abordagem de sua aplicação na agricultura.

### 2.1. Gaseificação da biomassa

O processo de gaseificação é definido como sendo a transformação de qualquer insumo sólido ou líquido em um gás combustível. Este é baseado na oxidação parcial em altas temperaturas (800 a 1000°C), caracterizando um processo termoquímico, e nessa tecnologia, a massa de ar é inferior àquela necessária para oxidação completa do combustível. Os valores de ar para gaseificação então entre 20% e 40% da quantidade do ar estequiométrico (MARTIN, 2005).

A Figura 1 esquematiza as etapas da gaseificação, onde se observa que a pirólise representa a primeira etapa do processo, onde temos a formação de carvão vegetal, alcatrão e gases. Ao mesmo tempo, uma pequena porção da biomassa é oxidada, fazendo com que a temperatura da reação aumente a valores entre 800 e 1200°C, que depende do tipo do agente gaseificador usado. Alcançando os níveis de temperaturas necessárias, tanto para a etapa de pirólise quanto para a gaseificação (CORTEZ, GOMEZ e LORA, 2008).

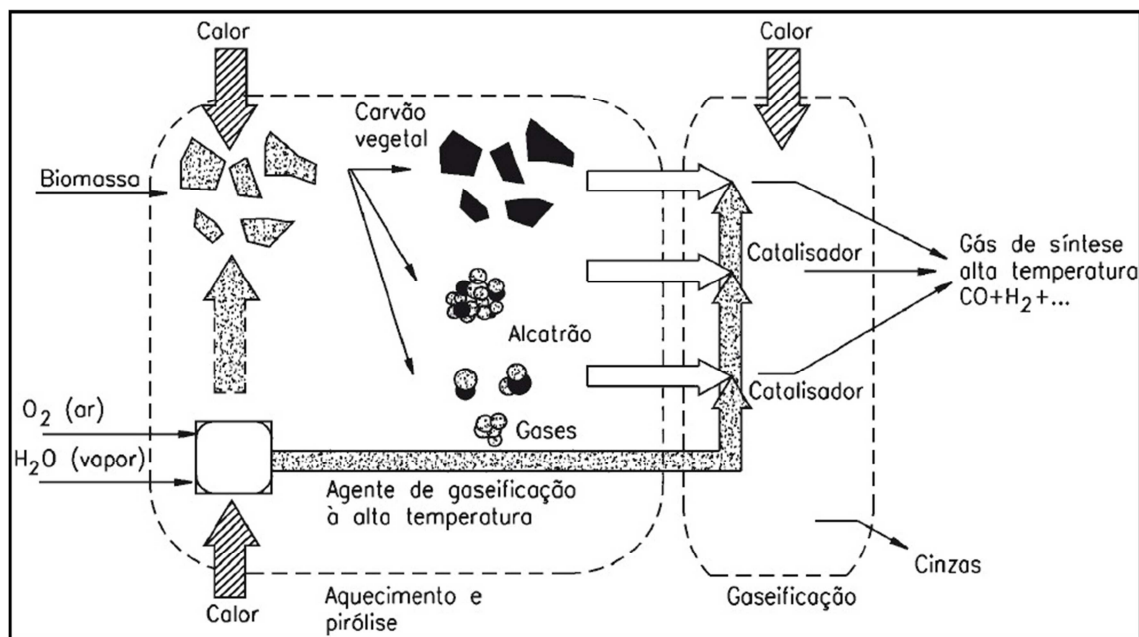


Figura 1 - Etapas principais da Gaseificação. Fonte: (CORTEZ, GOMEZ e LORA, 2008)

A gaseificação apresenta várias vantagens técnicas, que estão atreladas às disponibilidades de biomassa na localidade. O gás combustível produzido na gaseificação reduz a dependência de países e de regiões de combustíveis de origem fósseis. Quando comparada com a combustão direta da biomassa ou o uso de combustíveis tradicionais, temos, por exemplo, quando é feita de geração de eletricidade em pequena escala, esta pode ser feita através da queima direta do gás em um motor de combustão interna, não necessitando do ciclo de vapor no caso de uma fornalha tradicional que usa biomassa como combustível. Como o gás gerado no processo de gaseificação tem características combustíveis, o mesmo pode ser usado em qualquer equipamento que use combustíveis líquidos ou gasosos sem a necessidade de grandes modificações (SÁNCHEZ, 2010).

Quando a produção e o consumo da biomassa são feitas de forma sustentável, temos o fechamento do ciclo do carbono, sem causar o aumento das taxas de gás carbônico emitido na atmosfera. O combustível gerado, ou gás de síntese, apresenta impurezas que devem ser removidas para que possa ser usado em motores ou turbinas a gás. Portanto, tecnologias para favorecerem essa limpeza devem ser desenvolvidas para tornar a gaseificação viável comercialmente. As principais impurezas contidas são o alcatrão, as cinzas volantes, o resíduo carbonoso e os compostos nitrogenados, principalmente  $NH_3$  e  $HCN$  (SÁNCHEZ, 2010).

De acordo com Cortez, Gomez e Lora (2008) Cortez et al. (2008) para o desenvolvimento da gaseificação, alguns entraves dessa tecnologia devem ser solucionados, dentre os principais destacam-se os seguintes:

- Pré-tratamento e condicionamento do combustível (Biomassa) – O combustível utilizado deve apresentar propriedades físico-químicas e demais características propícias para serem usadas no processo de conversão térmica além de ser economicamente viável para o uso;
- Tratamento do gás gerado – O gás gerado na gaseificação apresenta alguns compostos indesejados, com isso, os gases devem ser tratados para eliminá-los, tornando o gás compatível para o uso em motores-geradores, para a geração de energia elétrica e como fonte de insumo de produção de biocombustíveis líquidos e hidrogênio;
- Controle operacional do processo – Tanto das emissões quanto do funcionamento como um todo;
- Materiais eficientes para a construção – O desenvolvimento de novos materiais para reatores, recipientes, peças, entre outros componentes, faz-se necessário para aumentar a confiabilidade de tal;
- Unificação das etapas – Baseia-se na interligação de 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 bio-refinarias.

### **2.1.1. Histórico do desenvolvimento da gaseificação no mundo**

Com mais de duzentos anos de história, a tecnologia da gaseificação ainda apresenta grandes desafios tecnológicos para se firmar como uma tecnologia viável, pois, os seus avanços ocorrem apenas em momentos conturbados e difíceis no abastecimento das fontes energéticas tradicionais, em especial o petróleo (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

A utilização de biomassa para o aproveitamento da sua energia a partir da combustão é usada desde os primórdios da humanidade, sendo as principais utilizadas a lenha, e, no caso do carvão, a partir do século VIII a.C. na China. Portanto, a combustão não atendia todas as necessidades do homem, principalmente a iluminação noturna. Com isso a tecnologia da gaseificação tornou-se uma opção mais eficiente, pois, o gás gerado apresenta grandes vantagens em aplicações como iluminação, aquecimento e cocção de alimentos do que os combustíveis sólidos e líquidos até então usados (CARDOSO, 2013).

Os primeiros registros que se tem da conversão de material orgânico ou carbonífero em gás combustível datam do século XVII, quando o pároco da cidade de Croften, John

Clayton, encontrou uma maneira de extrair gás, a partir da destilação do carvão. Essa descoberta foi batizada de destilação seca, sendo o processo mais antigo utilizado para extrair gás de matéria orgânica. Essa extração era feita em uma retorta com atmosfera livre de oxigênio (SÁNCHEZ, 2010).

Várias opções foram usadas na tentativa de evoluir a tecnologia de gaseificação, ocorrendo de forma correlata, especialmente a partir do carvão. Thomas Shirley em 1669 fez experiências com hidrogênio carburado. Anos mais tarde, Dean Clayton usando experimentos pirolíticos, extraiu gás de carvão. Os primeiros pesquisadores a registrarem patentes sobre gaseificação foram Robert Gardner, 1788 e John Barber, 1791 (KAUPP e GOSS, 1981).

A utilização da madeira na gaseificação teve início somente no fim do século XVIII, sendo uma primeira tentativa feita pelo francês Philippe Lebon em 1798. Somente em 1801 Lampadius provou a possibilidade de utilizar os gases residuais que escapam da carbonização de madeira. No começo do século XX, a tecnologia de gaseificação usando madeira foi intensificada, para que as colônias britânicas e alemãs tivessem um abastecimento de gás que não fosse dependente de fontes de carvão mineral (KAUPP e GOSS, 1981).

Um grupo de investidores reunidos em 1804 pelo empresário alemão Frederick Winsor se juntou na intenção de criar uma empresa para produzir gás com a intenção distribuí-lo aos consumidores por uma malha de dutos subterrânea, para o uso na iluminação. Essa companhia chamou-se *Gas Light and Coke Company* (GLCC), a qual recebeu licença para funcionamento em 1812. Com o início das atividades dessa empresa, os gaseificadores, que eram de pequeno porte e usados apenas em fábricas, passaram a ser de grande porte e construído nas cidades que utilizariam essa forma de iluminação (CARDOSO, 2013).

As técnicas de gaseificação foram intensificadas, na virada do século XX, quando se teve o crescimento da indústria do gás. No começo da Primeira Guerra Mundial, utilizava-se principalmente para gaseificar lignito e turfa, pois se apresentava com grande disponibilidade e condições desejáveis para tal processo. Nas localidades onde esse tipo de combustível não estava disponível, as instalações foram alteradas para gaseificar biomassa. Naquele momento, o reator mais utilizado era o de leito fixo, sendo conhecido por alguns estudiosos como leito móvel, pois, durante a sua operação enquanto o combustível era alimentado e as cinzas retiradas, o leito se movimenta do topo para o fundo do reator. Com o surgimento das linhas de distribuição de gás natural e a substituição por derivados do petróleo, ocorreu o enfraquecimento da produção de gás de gaseificação e quase todas as plantas foram desativadas (SÁNCHEZ, 2010).

Antes do começo da Segunda Guerra Mundial, foram desenvolvidos os gaseificadores de leito fluidizado e os de leito arrastado. Com o avanço do conflito mundial na Europa, ocorreu uma escassez generalizada de combustíveis líquidos no continente, por isso a procura por combustíveis alternativos foi intensificada, resultando no reaparecimento das atividades de desenvolvimento e implantação de gaseificadores. Com isso, os motores de ignição por centelhas e compressão foram adaptados para funcionar com gás combustível, então foram desenvolvidas pequenas unidades de gaseificação, chamadas gasogênios, sendo estes utilizados em veículos em geral, como se observa na Figura 2. Porém, com o final da guerra o fornecimento de combustíveis derivados do petróleo foram reestabelecidos e os veículos foram reconvertidos para tais, sendo a gaseificação abandonada pelos países industrializados. Depois de finalizada a Segunda Guerra Mundial, pouco se evoluiu sobre a tecnologia da gaseificação (SÁNCHEZ, 2010).



Figura 2 - Gaseificador Automotivo - produzido no Brasil (SÁNCHEZ, 2010).

### 2.1.2. Reações de gaseificação

O processo termoquímico da gaseificação ocorre em uma região paramétrica entre a combustão e a pirólise. No interior dos reatores de gaseificação, ocorrem, em regiões definidas, os processos de secagem, de pirólise, de oxidação (combustão) e de redução. O gás é formado por  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , (combustíveis),  $\text{CO}_2$ , e  $\text{N}_2$ . Sendo que essas regiões podem ser analisadas individualmente (MARTIN, 2005).

A secagem é a região com a menor temperatura do reator, onde ocorre à evaporação da água contida no combustível sólido, essa temperatura é inferior a 200°C.

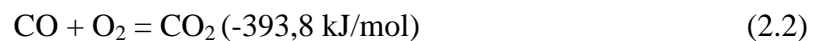
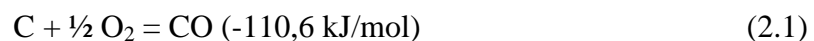
Na região de pirólise ocorre a degradação termoquímica. Nesta etapa se aplica calor na biomassa com ausência total de oxidante. Este processo permite a transformação da biomassa em três frações: sólida, gasosa e líquida (esta última considera os gases condensáveis da fração gasosa). A temperatura nessa região fica entre 280°C a 450°C, provocando a decomposição dos carboidratos e a produção de alcatrão e ácidos leves (MARTIN, 2005).

A região de oxidação ocorre em uma reação exotérmica entre o carbono da biomassa e o oxigênio do agente oxidante. O efeito dessa reação é a elevação da temperatura para uma faixa entre 800°C a 1.200°C, dependendo do combustível utilizado. O gás proveniente dessa etapa é conduzido à zona de redução, acima ou abaixo, dependendo do tipo de gaseificador. Nessa região, deficiente em O<sub>2</sub>, ocorre à formação dos componentes combustíveis do gás (MARTIN, 2005).

As principais reações da gaseificação são as reações exotérmicas de oxidação (combustão) e as endotérmicas de redução, envolvendo fases sólidas e líquidas (SÁNCHEZ, 2010).

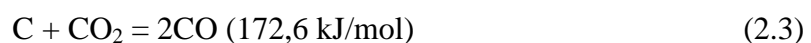
#### 2.1.2.1. Reações heterógenas gás-sólidos

➤ **Oxidação do carbono:**



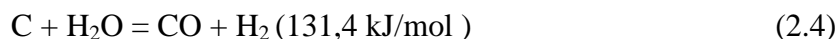
➤ **Reação de Boudouard:**

Reação heterogênea de redução-oxidação de uma mistura de monóxido de carbono e dióxido de carbono a uma determinada temperatura.



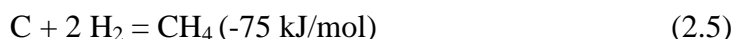
➤ **Reação de gás-d'água:**

Reação química endotérmica e heterogênea onde o carbono reage com o vapor de água para formar monóxido de carbono e hidrogênio.



➤ **Formação de metano:**

Reação do tipo exotérmica e heterogênea onde temos a reação entre carbono e hidrogênio formando metano.



### 2.1.2.2. Reações homogêneas (fase gasosa)

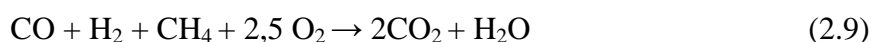
Reação exotérmica consiste na reação entre o monóxido de carbono e o vapor de água formando dióxido de carbono e hidrogênio. A segunda reação é endotérmica e temos o metano reagindo com o vapor de água para formar monóxido de carbono e hidrogênio:



### 2.1.2.3. Craqueamento do alcatrão



Temos também que destacar a oxidação de parte dos produtos produzidos na pirólise:



Segundo Sánchez (2010) os fatores que interferem na composição dos gases, demonstrados pelas equações das reações anteriormente apresentadas, são:

- Temperatura;
- Pressão;
- Umidade do combustível;
- Teor de oxigênio do agente gaseificador;
- Tipo de combustível.

Quando forem analisados gaseificadores em leito fluidizado, devem ser incluídos fatores dinâmicos da própria fluidização. Nesse mesmo reator, todas as etapas anteriormente discutidas separadamente, pirólise, oxidação, redução para o reator de leito fixo, acontecem em todos os pontos do reator ao mesmo momento, não sendo possível defini-lo em zonas específicas. As equações que descrevem esse reator são apenas três:



### **2.1.3. Variáveis importantes no processo de gaseificação**

Como apresentado anteriormente pelas definições do processo de gaseificação, esta é uma oxidação parcial do combustível, de acordo com a quantidade de ar inserido no reator, portanto, estas são as variáveis mais importantes do processo. Porém, o tipo de reator usado também influencia o desempenho da conversão termoquímica (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Elencada abaixo se tem as variáveis de maior influência nesse processo:

#### **2.1.3.1. Fator de Ar**

A equação 2.13 apresenta a definição dessa variável, sendo correspondente ao quociente entre o valor da relação ar-combustível real utilizada durante o processo e a relação ar-combustível estequiométrico. Essa variável também é chamada de razão de equivalência sendo uma das variáveis operacionais mais importantes na gaseificação. Esse fator expressa a

proporção de combustível que sofre combustão completa com a porção que é gaseificada (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

$$\frac{(R_{A/C})_{real}}{(R_{A/C})_{est}} \quad (2.13)$$

Onde  $(R_{A/C})_{real}$  é a relação ar-combustível real e  $(R_{A/C})_{est}$  é a relação ar-combustível estequiométrica.

Para obter a relação ar-combustível estequiométrica em (m<sup>3</sup>/kg) de biomassa, pode ser usado a equação 2.14, que representa a análise elementar do combustível. Sendo considerada em condições normais de pressão e temperatura (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

$$(R_{A/B})_{est} = 0,0889 * (C^u + 0,376 * S^u) + 0,285 * H^u - 0,0333 * O^u \quad (2.14)$$

Onde: RA é a quantidade de ar em Nm<sup>3</sup>; B é a quantidade de biomassa em kg; C<sup>u</sup> é a fração elementar de carbono presente na biomassa; S<sup>u</sup> é a fração elementar de enxofre presente na biomassa; H<sup>u</sup> é a fração elementar de hidrogênio presente na biomassa; O<sup>u</sup> é a fração elementar de oxigênio presente na biomassa, todos em porcentagem.

Na Tabela 1 estão organizadas alguns valores típicos para madeira de eucaliptos, em condição de 15% de umidade (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Tabela 1 - Análise elementar e relação estequiométrica para madeira de eucaliptos com 15% de umidade em base (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

Biomassa	Análise elementar (base de trabalho)					$(R_{A/C})_{est}$
	C <sup>u</sup>	H <sup>u</sup>	O <sup>u</sup>	N <sup>u</sup>	S <sup>u</sup>	
Pedaços de Madeira	48,03	5,98	45,67	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

A relação ar-combustível real em gaseificadores de leito fixo depende das características físicas do reator. A equação 2.15 é usada para esse cálculo, onde em um teste pode-se quantificar a quantidade total de biomassa consumida no teste (biomassa), a vazão

volumétrica do ar ( $\dot{V}_{ar}$ ) e o tempo total do teste (t), e aplicar a equação (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

$$(R_{A/C})_{real} = \frac{\dot{V}_{ar} * t}{m_{biomassa}} \quad (2.15)$$

### 2.1.3.2. Temperatura

Essa variável está relacionada ao fator de ar utilizado, que nos refere às quantidades de ar e combustível empregados, sendo que a característica elementar do segundo influencia consideravelmente também esta variável. A temperatura deve ser mantida em seu valor correto para que não ocorra a perda de energia por uma transformação parcial do carbono presente na biomassa. A temperatura tem um efeito considerável sobre a concentração dos compostos combustíveis no gás produzido no processo de transformação termoquímica. No caso de gaseificadores de leito fixo a temperatura varia dentro do reator pela heterogeneidade decorrente das reações do processo dando origem a regiões de alta temperatura (GUO, DONG, *et al.*, 2014).

### 2.1.3.3. Capacidade de produção de gás

O gás produzido é determinado pela vazão de gás por unidade de massa de combustível inserido no reator, dado por  $Nm^3$ . Sendo essa produção relacionada ao fator de ar e ao período de permanência dos gases na zona de redução. Para os modelos mais usados de reatores, temos valores entre 2  $Nm^3/kg$  de biomassa para reator de leito fixo e de 1,8 a 2,5  $Nm^3/kg$  para reator de leito fluidizado (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013).

### 2.1.3.4. Composição e poder calorífico do gás produzido

A composição do gás proveniente desse processo é geralmente  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $H_2$ ,  $N_2$  e pequenos valores de alcatrão. Também pode apresentar alguma quantidade de  $O_2$ . Os componentes do gás como  $CO$ ,  $H_2$  e  $CH_4$  são relacionados às reações da gaseificação. Portanto, pode-se concluir que o agente de gaseificação tem um importante papel na composição e no poder calorífico do gás gerado (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

### 2.1.3.5. Eficiência da gaseificação

Para o cálculo da eficiência é usado dois métodos (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013):

- Método a quente: Esse método corresponde ao quociente do somatório entre a energia sensível e química do gás produzido, e a energia química (poder calorífico) do combustível gaseificado.
- Método a frio: Corresponde 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 este evita a obtenção de valores equivocados influenciados pelo valor do calor sensível do gás, que na realidade não é o objetivo mais importante do processo.

Outros fatores do gaseificador devem ser considerados para o cálculo da eficiência, sendo os principais (LORA, ANDRADE, *et al.*, 2013):

- Efeito da composição das cinzas no processo de transformação termoquímica, devido ao caráter catalítico dos minerais presentes nela.
- Outro parâmetro importante no desempenho de gaseificadores de leito fixo é o projeto da placa ou grelha que sustenta a biomassa em conversão e permite retirar as cinzas produzidas no processo, pois controla o tempo de residência da biomassa no gaseificador.
- A granulometria e a umidade do combustível têm papel importante na reação de gaseificação. No caso da umidade, é aconselhável valores abaixo de 25%, pois acima desse valor a composição do gás gerado é afetada, dada à redução da temperatura no interior do reator, por causa da energia requerida para a vaporização da água presente no combustível. Essa diminuição de temperatura diminui a velocidade da reação e conseqüentemente sua eficiência. A granulometria tem influência no tamanho da zona de gaseificação, pequenas granulometrias não influenciam consideravelmente nos fenômenos de transferência de massa e de energia, portanto partículas maiores apresentam menores taxas de volatilização e uma maior transferência de calor entre as mesmas e as partículas próximas, essas partículas maiores dão origem a uma heterogeneidade na temperatura do reator que levam à formação de altos teores de alcatrão. Neste contexto e para o caso dos

reatores de leito fixo, a granulometria do combustível deve ser a mais uniforme possível.

#### 2.1.4. Classificação e tipos de reatores de gaseificação

O gaseificador é o componente mais importante do processo de gaseificação, é onde ocorre a reação. Portanto, esse equipamento deve gerar gás com características combustíveis de excelente qualidade, utilizando para isso uma grande variedade de tipos de biomassa como combustível. De acordo com Sánchez (2010) como parâmetros de projeto, os gaseificadores devem ser capazes de:

- Trabalhar de forma eficiente com pouca atenção, respondendo de forma rápida às variações de carga;
- Deve ter custo e durabilidade compatível com a aplicação.

Como esses requisitos são conflitantes, deve ser considerada a aplicação que se deseja, tanto em relação à biomassa quanto ao uso do gás combustível propriamente dito.

Os reatores de gaseificação podem ser classificados de acordo com algumas características de funcionamento. Na Tabela 2 estão organizadas as principais características. .

Tabela 2 - Classificação dos gaseificadores. Fonte: (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008)

<b>Poder Calorífico do Gás produzido</b>	<b>Tipo de agente gaseificador</b>	<b>Movimento relativo entre a biomassa e o agente gaseificador</b>	<b>Pressão de trabalho</b>	<b>Tipo e forma de biomassa</b>
Baixo: Até 5 MJ/Nm <sup>3</sup>	Ar	Contracorrente	Baixa pressão Atmosférica	Resíduos agrícolas
Médio: 5 a 10 MJ/Nm <sup>3</sup>	Oxigênio	Concorrente	Pressurizado Até 6 Mpa	Resíduos industriais
Alto: 10 a 40 MJ/Nm <sup>3</sup>	Vapor d' água	Fluxo cruzado		Resíduos sólidos urbanos
	Hidrogênio	Leito fluidizado		Biomassa em natura
				Biomassa peletizada
				Biomassa pulverizada

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

### 2.1.4.1. Gaseificador contracorrente

Este modelo de reator apresenta a forma construtiva mais simples dentre todos. A biomassa é inserida pela parte superior e movimenta-se para baixo com a ação da força gravitacional à medida que é consumida na grelha, sendo as cinzas retiradas por baixo da grelha (Figura 3). Nesse reator, a entrada do agente gaseificante fica na parte de baixo do gaseificador, abaixo da grelha, com isso o gás gerado tem um movimento ascendente em relação ao combustível, sendo retirado pelo topo do reator (SANTOS, 2003).

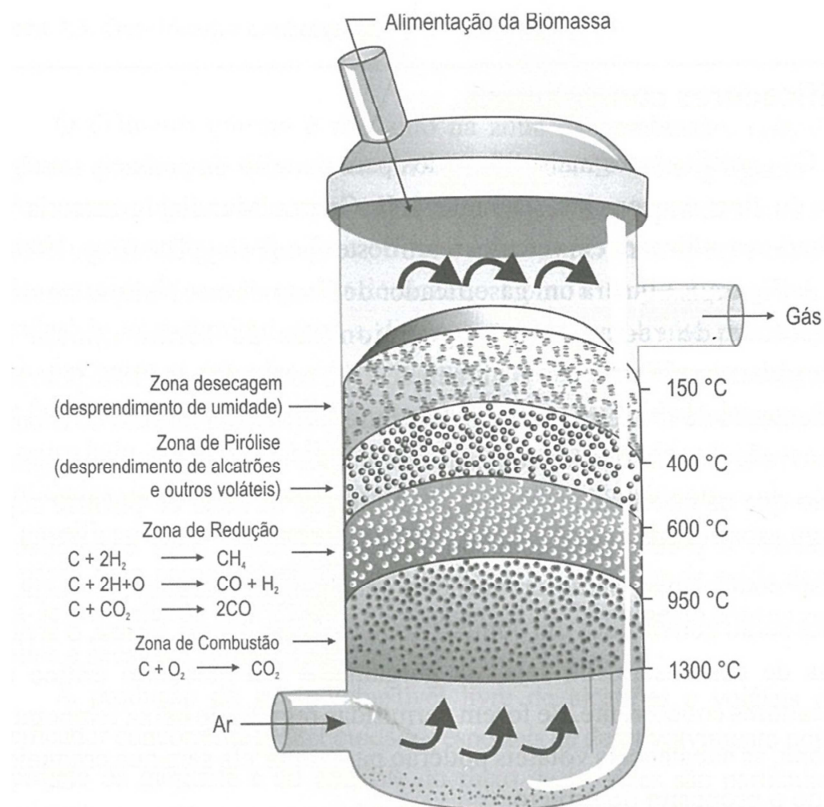


Figura 3 - Reator Contracorrente. Fonte: (SÁNCHEZ, 2010).

Apesar da simplicidade na forma construtiva, esse tipo de reator produz um gás com um valor elevado de vapor d'água e alcatrão em sua composição. Isso porque como é visto pela Figura 3, o movimento do gás é ascendente e o alcatrão que é produzido na zona de pirólise, não é craqueado na região de combustão, podendo causar intupimento das

tubulações. Devido a essa concentração alta de voláteis em sua composição, esse reator é aconselhável em aplicações que se deseja fazer a queima direta do gás para aquecimento. Para aplicar esse gás em motores de combustão interna, é necessário uma limpeza do mesmo, o que torna honeroso o processo (SANTOS, 2003) .

#### 2.1.4.2. Gaseificador concorrente

Este tipo de reator é o mais usado para geração de potência mecânica (SÁNCHEZ, 2010). O agente gaseificante e o gás produzido fluem na mesma direção que a biomassa. O projeto desse reator foi feito pensando na redução dos voláteis, pois, esses passam pela zona de redução e de combustão, com isso, esses componentes sofrem o processo de craqueamento devido à alta temperatura dessas zonas, convertendo-os em compostos mais leves (ZANATTA, 2011).

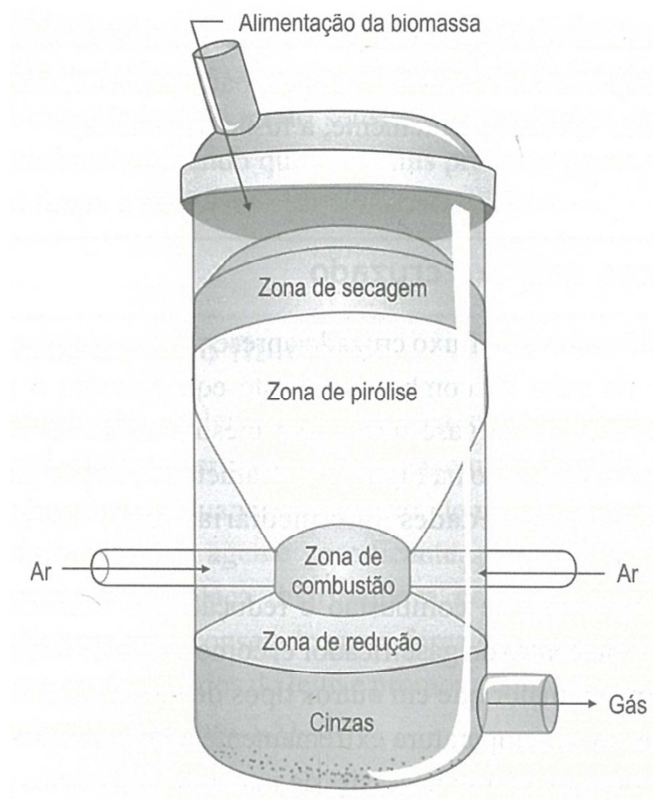


Figura 4 - Gaseificador concorrente. Fonte: (SÁNCHEZ, 2010).

O elemento crítico destes gaseificadores é o arranjo da zona de combustão em formato de garganta. Nela são distribuídos os injetores de ar uniformemente, deixando a temperatura homogênea, para que não haja regiões de baixa temperatura, que causaria a não

transformação do alcatrão. Nesse tipo de reator a temperatura do gás é de aproximadamente 700°C (ZANATTA, 2011).

### 2.1.4.3. Gaseificador de fluxo cruzado

Nos gaseificadores de fluxo cruzado o gás é retirado da lateral da câmara de gaseificação, na mesma altura do leito em que é injetado o ar. O injetor é normalmente arranjado de forma a introduzir ar no centro na zona de combustão. Caracterizam-se por produzir um gás combustível com características intermediárias entre os gaseificadores contracorrente e concorrente (SÁNCHEZ, 2010).

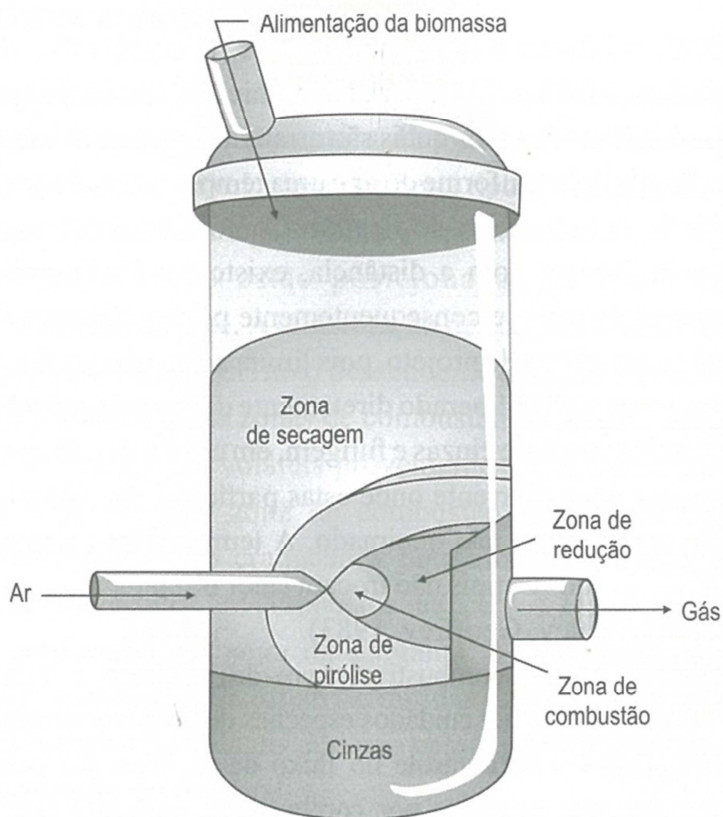


Figura 5 - Gaseificador de fluxo cruzado. Fonte: (SÁNCHEZ, 2010).

A taxa de fornecimento de ar é consideravelmente maior que a de outros tipos de gaseificadores, motivo pelo qual se cria uma zona de combustão de temperatura extremamente alta, com rápida liberação de gases. Ambas as zonas, a de combustão e a de redução, são concentradas em um pequeno volume no centro do gaseificador; isso significa que materiais refratários para delimitar a região são dispensáveis (SÁNCHEZ, 2010).

As principais vantagens desse tipo de gaseificador são a rápida resposta à variação de carga e sua simplicidade de construção. No entanto, são muito sensíveis à composição e à umidade do combustível (SÁNCHEZ, 2010).

#### 2.1.4.4. Gaseificador de leito fluidizado

As partículas do combustível são mantidas suspensas em um leito de partículas inertes (areia, cinzas ou alumina), fluidizadas pelo fluxo de ar, de modo a criar melhores condições de transferência de calor e homogeneidade da temperatura na câmara de reação (ZANATTA, 2011). O agente gaseificante é previamente pressurizado e forçado a passar pela placa distribuidora no sentido ascendente e em quantidade suficiente para conseguir que a força de arraste do escoamento do fluido supere o peso dos sólidos do leito e promova, ao mesmo tempo, a queima parcial do combustível. Nessas condições a maioria dos voláteis estará em contato com as partículas do leito aquecido, contribuindo para uma gaseificação possivelmente completa e limpa (SÁNCHEZ, 2010).

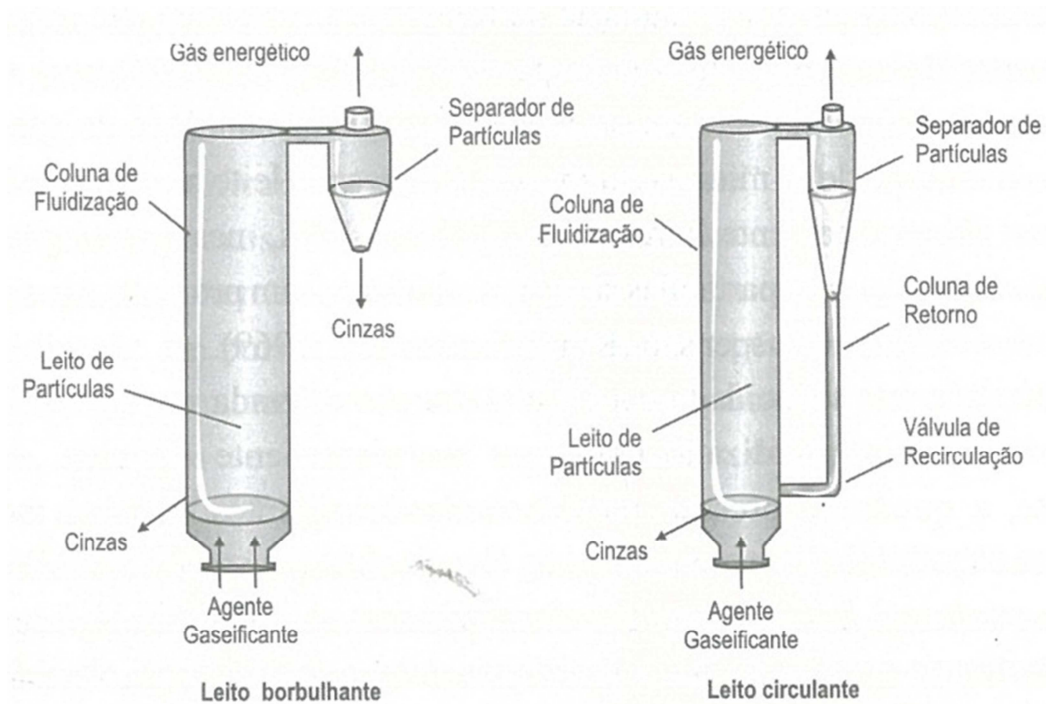


Figura 6 - Gaseificadores de leito borbulhante e fluidizado. Fonte: (SÁNCHEZ, 2010).

A principal vantagem dos gaseificadores de leito fluidizado é o fácil controle da temperatura pela variação na alimentação de ar e de combustível (SÁNCHEZ, 2010).

### 2.1.5. Aplicações da gaseificação na geração de energia

De acordo com Sales et al. (2005) a gaseificação gera um gás com características combustíveis, com isso este gás de biomassa pode ser usado para inúmeras finalidades energéticas entre as quais podem ser citadas;

- Queima direta em queimadores de caldeiras para geração de vapor;
- Queima para geração de calor para secagem de produtos agrícolas;
- Queima em câmaras de combustão de motores de combustão interna (diesel e Otto) e externa (Stirling), turbinas a gás e células combustíveis.

Para utilização na geração de energia elétrica pode ser utilizado diferentes formas para essa conversão, sendo algumas alternativas mais atrativas que outras, devido ao tratamento que esse gás precisa ter para ser utilizado e a fatores econômicos (SALES, ANDRADE e LORA, 2005).

A biomassa tem uma densidade de energia muito baixa comparada com os combustíveis líquidos e sólidos tradicionalmente utilizados, como o petróleo ou carvão. Esse fato aliado à característica dispersa da produção da biomassa favorece sua aplicação a uma conversão energética (eletricidade ou combustíveis) realizada em instalações descentralizadas, relativamente pequenas, para evitar altos custos de transporte de biomassa (SÁNCHEZ, 2010).

A rota de conversão energética é apresentada a seguir (SÁNCHEZ, 2010):

Energia bioquímica (Biomassa) => Energia térmica (Calor) + Energia química (Poder calorífico dos gases) => Máquinas térmicas gerando potência mecânica => Potência mecânica (eixo) => Geradores elétricos => Energia Elétrica.

Uma propriedade do gás muito importante para definir sua aplicação é o poder calorífico de tal, a Figura 7 ilustra essa relação.

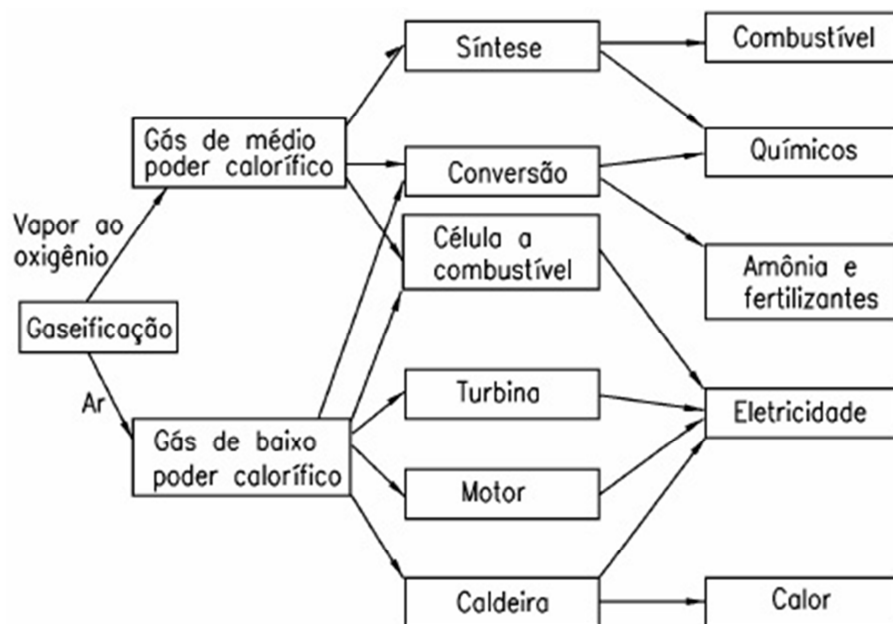


Figura 7 - Relação Poder Calorífico e aplicação do gás. Fonte: (LORA, ANDRADE e ARADAS).

Uma das formas difundidas, tanto no meio industrial como no meio rural para o aproveitamento do gás resultante da gaseificação, é o processo definido como cogeração, onde se tem em um mesmo sistema produção de calor e eletricidade, independente dos equipamentos e meios utilizados. No entanto, a eficiência da conversão em energia elétrica depende da potência, variando de 25% a 38% em relação à energia inicial presente no biogás. A outra parcela de energia armazenada no gás é transformada em energia térmica e outro percentual é perdido por radiação (SOUZA, COLDEBELLA, *et al.*, 2013).

A cogeração é utilizada geralmente em indústrias sucroalcooleiras, apresentando-se como uma excelente alternativa para um país como o Brasil. Portanto, a utilização da gaseificação de biomassa na cogeração de energia elétrica torna mais interessante a utilização de combustíveis renováveis, a Figura 8 ilustra esse sistema (SOUZA, COLDEBELLA, *et al.*, 2013).

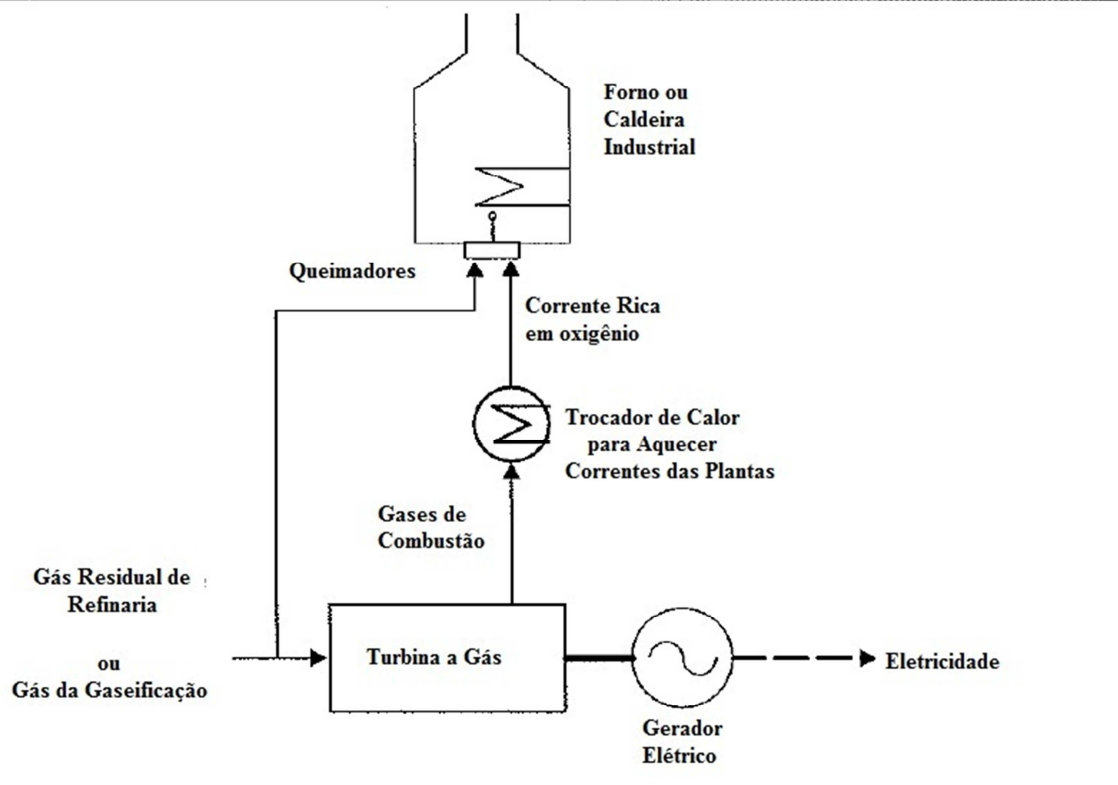


Figura 8 - Cogeração de Energia. Fonte: (CAMPOS, 2010).

### 2.1.5.1. A gaseificação gerando energia elétrica

Apesar de ser uma tecnologia mais complexa, a gaseificação apresenta algumas vantagens quando comparamos com a combustão direta da biomassa.

Quando usado para a geração de energia elétrica em pequena escala pode ser feita sem a utilização de um ciclo de vapor, utilizando o gás gerado diretamente em um motor de combustão interna ou, em perspectiva, num motor *Stirling*, microturbina a gás ou célula combustível. Algumas dessas aplicações podem alcançar a eficiência de centrais térmicas a carvão (SOUZA, COLDEBELLA, *et al.*, 2013).

A faixa de potência de 100 kWe a 2 MWe é considerada a mais viável para produzir eletricidade a partir de biomassa, utilizando reatores de leito fixo fornecendo gás para motores de combustão interna. Sendo que, o tipo concorrente é o mais utilizado devido ao menor teor de alcatrão no gás. Gaseificadores de leito fluidizado são indicados para potências superiores ao intervalo de, 3 a 5 MWe (SOUZA, COLDEBELLA, *et al.*, 2013).

Como apresentando anteriormente, o período de grande evolução da gaseificação foi o posterior a primeira e segunda crise do petróleo. Nessa época a aplicação dessa tecnologia na geração de eletricidade em pequena escala em regiões isoladas e de baixa renda, a partir da

biomassa, foi objeto de diferentes estudos e projetos. Estes foram os anos dos grandes projetos de gaseificação na Índia, China e Tailândia. Nos anos 1980 o Banco Mundial encomendou um estudo visando esclarecer as causas de fracassos e sucessos nos projetos implementados naqueles anos (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

A tecnologia da gaseificação só evolui em períodos de crise e alta nos valores do petróleo, portanto, o desenvolvimento dos equipamentos relacionados com a geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa não tem apresentado grandes avanços para atingir um estágio comercial. A

Tabela 3 expõe um resumo desse desenvolvimento.

Tabela 3 - Maturidade tecnológica e viabilidade comercial de diferentes tecnologias para a geração de eletricidade a partir da biomassa (A – Alta, M – Média, B – Baixa).  
Fonte: (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Faixa de Potência kWe	Tecnologia	Maturidade Tecnológica			Disponibilidade Comercial			Comentários
		A	M	B	A	M	B	
5-200	Gaseificação/MACI		x			x		Poucas ofertas comerciais e projetos de sucesso
	Gaseificação/MS			x			x	P & D
	Gaseificação/MTG			x			x	P & D
	Gaseificação/MS		x				x	Alguns projetos demonstrativos
	Combustão/MTG		x				x	P & D
	Gaseificação/CC			x			x	P & D
	Biodiesel/MACI	x			x			Comercial
200-1000	Combustão/CV	x				x		Comercial, baixa eficiência
	Gaseificação/MACI		x				x	Poucas ofertas comerciais e projetos de sucesso
	Gaseificação/CC			x			x	P & D
>1000	Combustão/CV	x			x			Comercial
	ORC		x				x	Unidades demonstrativas e comerciais, alto custo
	Gaseificação/TG		x				x	Unidades demonstrativas abandonadas
	Gaseificação/CC			x			x	P & D

Nesta tabela a seguinte nomenclatura é utilizada: MACI (Motores Alternativos de Combustão Interna), MS (Motores Stirling), MTG (Microturbina a Gás), TG (Turbinas a Gás), CC (Células a Combustível), CV (Ciclo a Vapor), ORC (Ciclo Orgânico Rankine),

BIG-GT (Sistema Integrado de Gaseificação de Biomassa com Turbinas a Gás). Os dados referem-se a três faixas de potências: a microgeração (2-200 kW), típica de pequenas comunidades isoladas, a minigeração (200-1 000 kW), típica de pequenas e médias indústrias, e a geração em escala industrial com potências superiores a 1 000 kW (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008).

Outras tecnologias relacionadas com a combustão de biomassa, tais como os ciclos a vapor, os ciclos *Rankine* com fluidos orgânicos, as microturbinas a gás e os motores Stirling acoplados a fornalhas para a combustão da biomassa são analisados na

Tabela 3 também (CORTEZ, GOMEZ e LORA, 2008).

Em geral, a faixa de potências correspondente à microgeração se caracteriza pela quase total ausência de tecnologias comerciais. O Programa “Luz para Todos” do Ministério de Minas e Energia do Brasil junto com CNPq “Conselho Nacional de Pesquisas” financiaram uma série de projetos demonstrativos visando à implementação das tecnologias de gaseificação/MACI, Motor *Stirling* acoplado à fornalha à biomassa e uso de óleos vegetais in natura em MACI (CORTEZ, GOMEZ e LORA, 2008).

## 2.2. Controle e Automação de Sistemas

Com a competitividade cada vez maior, empresas de todos os ramos da economia são obrigadas a aprimorar ininterruptamente a produção de suas plantas industriais. Sendo a tecnologia responsável por essa melhoria, as principais áreas atuantes quando tratamos de aumento de produção e facilidade de operação são controle, automação e otimização de processos. Segundo Campos (2010) as vantagens na aplicação dessas tecnologias em processos são enormes:

- Aumento da qualidade do produto final;
- Aumento da eficiência do processo, gerando sempre um produto final, padronizado em relação à qualidade do mesmo;
- Aumento da confiabilidade dos sistemas, os sistemas de controle atuam na preservação do bom funcionamento dos equipamentos, não deixando que eles funcionem com características indesejadas;
- Aumento da segurança do processo, não permitindo que variáveis alcancem níveis perigosos;

- Substitui o operador em atividades manuais, repetitivas e que o possam expor a algum tipo de risco a sua integridade física.

A automação é um conceito e um conjunto de técnicas por meio dos quais se constroem sistemas ativos capazes de atuar com uma eficiência ótima pelo uso de informações recebidas do meio sobre o qual atuam (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

Formalmente, um sistema automatizado possui os seguintes componentes básicos (Figura 9) (MARTINS, 2012):

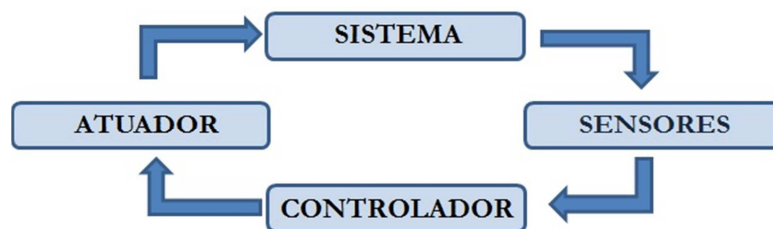


Figura 9 - Componentes básicos de um sistema automatizado.

#### Sensores:

- Responsáveis pela aquisição dos sinais do processo;
- Convertem informações físicas tais como pressão, temperatura, vazão, posição, velocidade, entre outros, em sinais elétricos que são possíveis de ser lidos pelos controladores;

#### Controlador:

- Toma decisões baseadas na programação nele inserida de acordo com os sinais de entrada, que são recebidos dos sensores;
- Gera sinais de saída que fazem com que os atuadores realizem as alterações no processo;
- Esse é o principal componente da automação, sendo o Controlador Lógico Programável o mais usado na indústria devido a sua robustez.

#### Atuadores:

- Converte sinais elétricos provenientes do controlador em ações físicas, mudando o estado do sistema;
- Incluem válvulas de controle de vazão, bombas hidráulicas, dispositivos de posicionamento, dispositivos variadores de velocidade, freios, solenoides, motores de passo, relés de potência, etc.

#### Sistema:

- Planta ou processo que se deseja controlar pela ação direta dos atuadores.

Quando refere-se ao termo “controle de processos” a intenção é abordar sistemas que tem como função principal, manter entre certos limites de operação, as variáveis do processo em questão. Sendo que estes sistemas de controle podem ser monitorados por um operador, ou automaticamente por controladores (CAMPOS, 2010).

Pode-se dividir os sistemas de controle, em malha aberta ou malha fechada. Para melhor entendimento dessa divisão entre as malhas de controle, suponha-se um sistema de controle de vazão conforme a Figura 10.

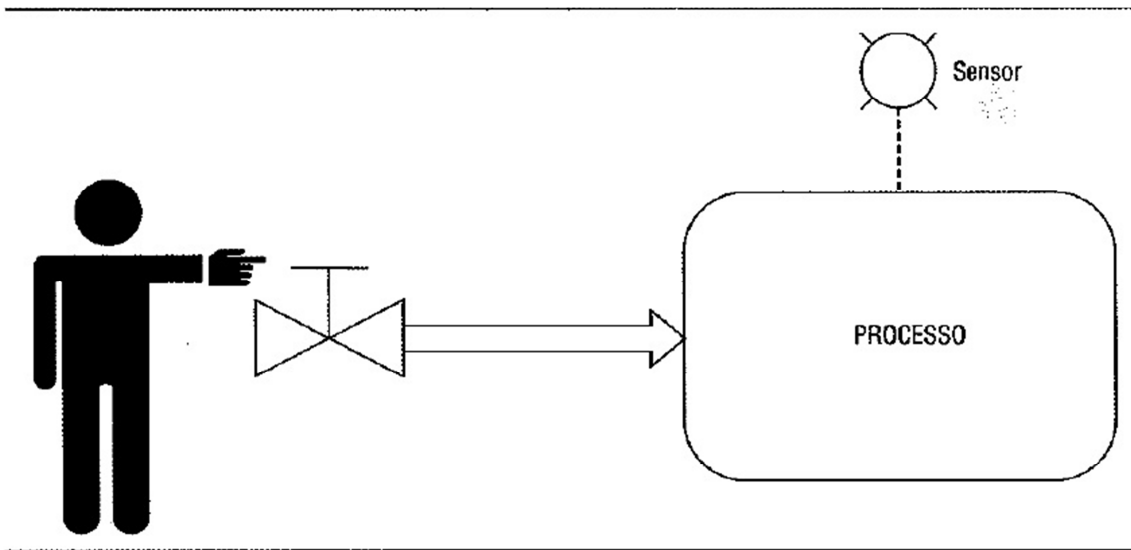


Figura 10 - Sistema de controle em malha aberta. Fonte: (CAMPOS, 2010).

Para se obter certa vazão, o operador consulta uma curva ou tabela de calibração e define qual a abertura da válvula que manterá a vazão constante desconsiderando-se as possíveis perturbações, com isso a vazão de saída não é medida, não interferindo na ação de controle, este tipo de controle é chamado de malha aberta, pois, não tem-se uma realimentação do sistema (CAMPOS, 2010).

Os sistemas de controle em malha aberta apresentam vantagens em relação à simplicidade e custos de implementação. Porém, como maiores desvantagens tem-se que, esses sistemas não compensam as perturbações internas ou externas relacionadas ao processo. Outra desvantagem que pode ser apresentada é a sobrecarga de trabalho monótono e repetitivo para o operador. Nesse tipo de controle, se tem uma redução de eficiência da planta, pois, o operador sempre tenderá a usar uma margem de segurança maior, o que pode significar uma diminuição na produção da planta (CAMPOS, 2010).

Uma forma de resolver as principais desvantagens do sistema de malha aberto, é medir a variável significativa para o sistema (que se deseja controlar) e implementar um

sistema de controle automático em malha fechada, como se pode ver na Figura 11 (CAMPOS, 2010).

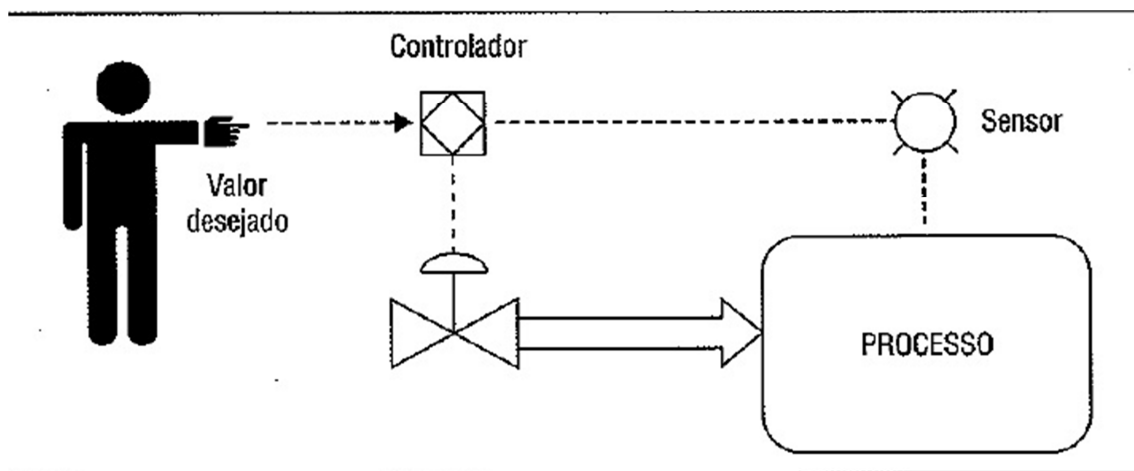


Figura 11 - Controle malha fechada. Fonte: (CAMPOS, 2010).

Portanto, pode-se colocar um sensor de vazão e retroalimentar o sistema com essa grandeza, para que a abertura da válvula seja alterada e a vazão chegue a seu valor determinado ou *setpoint*. Essa comparação entre o valor medido e o valor desejado pode ser feita por meio de um operador humano, ou um controlador automático baseado na lógica nele programada. Os sistemas em malha fechada podem oscilar, podendo levá-lo até mesmo a instabilidade (CAMPOS, 2010).

Existem vários tipos de controladores que podem ser usados, sendo esses baseados em ações simples como os básicos *On-off* (liga-desliga), até alguns que se baseiam em lógica nebulosa e redes neurais. Na decisão do melhor tipo de controlador, deve-se levar em consideração aspectos econômicos e operacionais do sistema a se controlar, sendo sempre escolhido o tipo mais simples que satisfaça as condições do projeto (ALVES, 2005).

### 2.2.1. Controladores Lógicos Programáveis (CLP)

Esse equipamento foi desenvolvido inicialmente para especificações da indústria automobilística e teve como principal a motivação e a diminuição de custos de instalação e manutenção de painéis de controle baseados em lógica de relés (ALVES, 2005).

Os primeiros CLP's eram capazes apenas de executar lógicas feitas com relés, de forma a acionar saídas de acordo com o programa feito pelo usuário e com os sinais das entradas. Com a evolução da tecnologia, funções aritméticas, terminais de programação e os subsistemas remotos de entrada e de saída foram incluídos. Essas novas tecnologias

permitiram a manipulação de variáveis numéricas, tornando possível a sua aplicação em controle de processos, adquirindo dados, executando algoritmos de controle contínuo, além de comunicação em rede (ALVES, 2005).

Segundo a Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, o Controlador Lógico Programável – CLP, é um equipamento eletrônico digital com *hardware* e *software* compatíveis com aplicações industriais.

A norma internacional IEC 61131-1, define o CLP como um “sistema eletrônico digital, desenvolvido para uso em ambiente industrial, que usa uma memória programável para armazenamento interno de instruções do usuário, que realiza funções específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar, por meio de dispositivos de entradas e saídas, vários tipos de máquinas e processos”.

Segundo Silveira e Santos (1998) esse dispositivo é capaz de:

- Permitir fácil diagnóstico de funcionamento ainda na fase de projeto do sistema e/ou de reparos de falhas que venham a ocorrer durante sua operação;
- Ser instalado em cabines reduzidas devido ao pequeno espaço físico exigido;
- Operar em locais com reduzido grau de proteção, pelo fato de não serem gerados faiscamentos;
- Ser facilmente reprogramado, sem necessidade de interromper o processo produtivo (programação *on-line*);
- Possibilitar a criação de um banco de armazenamento de programas que podem ser reutilizados a qualquer momento;
- Manter uma documentação sempre atualizada com o processo em execução;
- Apresentar baixo consumo de energia;
- Manter o funcionamento da planta de produção com uma reduzida equipe de manutenção;
- Garantir maior confiabilidade pela menor incidência de defeitos;
- Emitir menores níveis de ruídos eletrostáticos;
- Ter a flexibilidade de expansão do número de entradas e saídas a serem controladas;
- Ter a capacidade de se comunicar com diversos outros equipamentos.

A arquitetura básica de um CLP é mesma de um computador pessoal doméstico, porém o CLP é usado em aplicações industriais. Os três módulos básicos que o constitui são (PAREDE e GOMES, 2011):

- Unidade central de processamento (UCP);
- Bloco de memória;

- Módulos de entrada e saída (E/S).

Os blocos adicionais são:

- Fonte de alimentação;
- Terminal de programação;
- Bloco de comunicações;
- Interface homem-máquina.

A Figura 12 esquematiza os principais componentes de tal arquitetura.

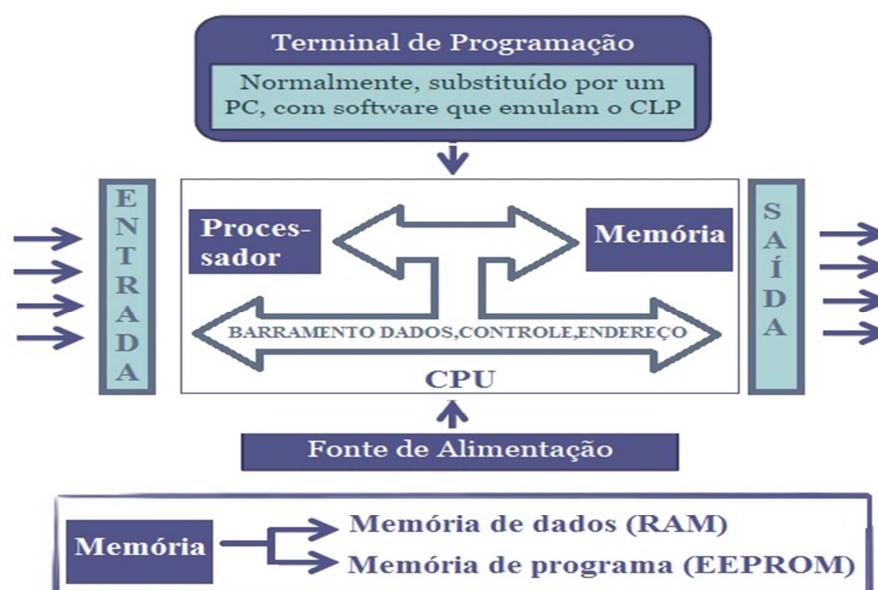


Figura 12 - Arquitetura de um CLP.

Cada um dos módulos básicos da arquitetura do CLP será explicado abaixo com maior detalhe, pois, são partes fundamentais para o entendimento do funcionamento desse controlador.

### 2.2.1.1. Unidade central de processamento

A unidade central de processamento (UCP), ou do inglês a sigla CPU é responsável por controlar e supervisionar as ações executadas nos circuitos eletrônicos do CLP, por meio das instruções do programa do cliente que estão armazenadas na memória. O tráfego de dados internamente entre CPU, o bloco de memória e os módulos de entrada e saída (E/S) e de responsabilidade do barramento interno controlada pela UCP. A velocidade de processamento desses dados está relacionada à frequência de *clock* e também pelo sincronismo entre os

elementos do sistema da UCP. O *clock* é fornecido por um cristal externo ou oscilador RC (PAREDE e GOMES, 2011).

A capacidade de processamento e memória do CLP é levada em consideração quando se deseja escolher o melhor equipamento para aplicação na qual será usado. Controlar um sistema pequeno, de baixa complexidade, requer um CLP simples e memória limitada. Por outro lado controlar um sistema grande, de alta complexidade, exige um CLP maior, com mais funções e memória. Alguns modelos de CLP têm memória expansível, e outros, memória fixa (PAREDE e GOMES, 2011).

Os CLP's são dispositivos microprocessados, sendo que alguns mais modernos e de maior capacidade utilizam microprocessadores adicionais para controlar funções complexas e demoradas, como processamento matemático, controle PID e módulos de E/S inteligentes. O CLP contém diversos conectores para interligá-lo a outros equipamentos (redes, terminal de programação, fonte, interface homem-máquina, entre outros) via cabos (PAREDE e GOMES, 2011).

#### **2.2.1.2. Bloco de memória**

O termo programável do CLP refere-se a uma sequência de instruções, ou seja, o programa a ser executado, o qual é armazenado no bloco de memórias. As memórias semicondutoras, a gravação magnética e a gravação ótica são os métodos mais utilizados para o armazenamento das informações. Os principais componentes utilizados nessas memórias são usualmente *flip-flops* por meio de transistores bipolares, MOS ou outras tecnologias (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

Esse bloco é dividido em memória de programa, onde são armazenados os programas desenvolvidos pelo usuário e pelo fabricante e a memória de dados onde são armazenadas as variáveis do programa do usuário.

A memória é um componente com grande variedade de tipos, tecnologias, organizações, desempenho e custos, em comparação com outros componentes do CLP. Apesar dessas diversidades técnicas, nenhuma das tecnologias de memórias satisfaz totalmente todos os requisitos de armazenamento de dados dos CLP. Assim, um sistema de CLP típico é equipado com uma hierarquia de subsistemas de memórias, algumas internas, diretamente acessíveis pelo processador, e outras externas, acessíveis pelo processador por meio de um módulo de E/S (PAREDE e GOMES, 2011).

O sistema de memória de um CLP é composto por memórias voláteis e não voláteis, sendo as primeiras caracterizadas, pelo fato de perderem as informações quando ocorre à interrupção da alimentação de energia, e as segundas mesmo sem alimentação mantêm retidas as informações contidas nelas (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

Os principais tipos de memórias utilizadas nos CLP's modernos são (SILVEIRA e SANTOS, 1998):

- RAM: (*Random Access Memory*) é o tipo de memória volátil mais amplamente utilizado. Sua principal característica reside no fato de que os dados podem ser gravados e alterados facilmente, ficando a critério das necessidades do usuário. Nos CLP são utilizadas para formar uma área de armazenamento temporário como uma espécie de rascunho de informações tanto de dados como de programas;
- EEPROM: (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*) apesar de ser não voláteis, apresentam a mesma flexibilidade de reprogramação das memórias RAM. A grande maioria dos CLP atuais vem equipada com EEPROM em seu sistema de memória devido à sensível vantagem advinda do seu uso. Esse tipo de memória apresenta duas limitações, a gravação de informações só pode ser feita com a limpeza da célula de memória que será usada e segundo a vida útil é definida pelo número de reprogramações, na ordem de 10.000 limpezas/escritas.

### **2.2.1.3. Módulos de entrada/saída (E/S)**

Os módulos de entrada e saída (E/S) de um CLP conectam fisicamente a CPU com o sistema externo, usando para isso circuitos de interface. Os módulos de entrada do CLP recebem sinais dos sensores e das botoeiras de campo. Os módulos de saída comunicam aos atuadores qual será a ação de controle ou sinalização (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

Esses dispositivos podem ser divididos em dois grandes grupos:

- Dispositivos de entrada — classificados como entradas digitais e entradas analógicas;
- Dispositivos de saída — classificados como saídas digitais e saídas analógicas.

Em CLP de médio e grande porte, os módulos de E/S são encaixados em slots situados na caixa da UCP ou em *rack* de expansão separado, permitindo flexibilidade na configuração do CLP. A utilização de *slots* também possibilita que o módulo danificado seja substituído rapidamente. Já nos CLP pequenos, a quantidade de entradas e saídas é pequena e fixa (menor que oito) e geralmente se resume a sinais digitais (PAREDE e GOMES, 2011).

Os módulos de entrada e saída têm como funções adicionais (PAREDE e GOMES, 2011):

- Isolar eletricamente os sinais do processo dos sinais da UCP, além de prover proteção contra surtos de tensão nas entradas e saídas. Essa isolação é necessária porque o processo automatizado trabalha com tensões elevadas e com a possibilidade de ocorrência de surtos de tensão, provenientes de descargas atmosféricas, sobretudo se os módulos operarem ao ar livre. Sem essa isolação elétrica e a proteção contra surtos de tensão, todo o sistema de controle seria avariado;
- Os módulos de entrada fazem a aquisição, a filtragem e o armazenamento dos sinais de entrada quando solicitado pela CPU;
- Os módulos de entrada enviam os valores dos sinais de entrada, armazenados na memória do módulo de E/S, para a CPU;
- Os módulos de saída recebem da CPU os dados de saída e os armazena em sua memória, aplicando-os às respectivas saídas quando solicitado pela CPU.
- Os módulos de E/S verificam a ocorrência de erros de comunicação módulos CPU, falha nos sensores, falha na fonte de alimentação dos módulos, falha nos cabos de sinal etc. e os comunica à CPU.
- Entradas/Saídas Digitais ou Discretas:

São os tipos de sinais mais comumente encontrados em sistemas automatizados com PLC. Nesses tipos de interface, a informação consiste em um único *bit* cujo estado pode apresentar duas possíveis situações: ligado ou desligado.

Na

Tabela 4, são apresentados componentes que podem ser usados com essas características (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

Tabela 4 - Dispositivos de entrada e saída. Fonte: (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

<b>Dispositivos de Entrada</b>	<b>Dispositivos de Saída</b>
Chaves Seletoras	Relés de Controle
Pushbottons	Solenoides
Sensores Fotoelétricos	Chaves de partida de motores
Chaves fim-de-curso	Válvulas
Sensores de proximidade	Ventiladores
Chaves de sensores de nível	Alarmes
Contatos de partida	Lâmpadas

Esses dispositivos são disponíveis em alguns níveis de tensão alternada ou contínua, sendo os padrões comerciais: 12 Vcc, 24 Vcc, 110 Vca, 220 Vca. A Figura 13 e a Figura 14 esquematizam esses circuitos de interface.

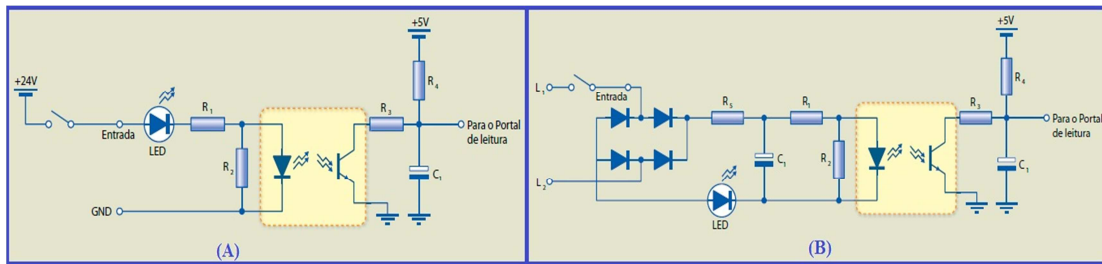


Figura 13 - Entradas Digitais: (A) Entrada CC; (B) Entrada CA. Fonte: (PAREDE e GOMES, 2011)

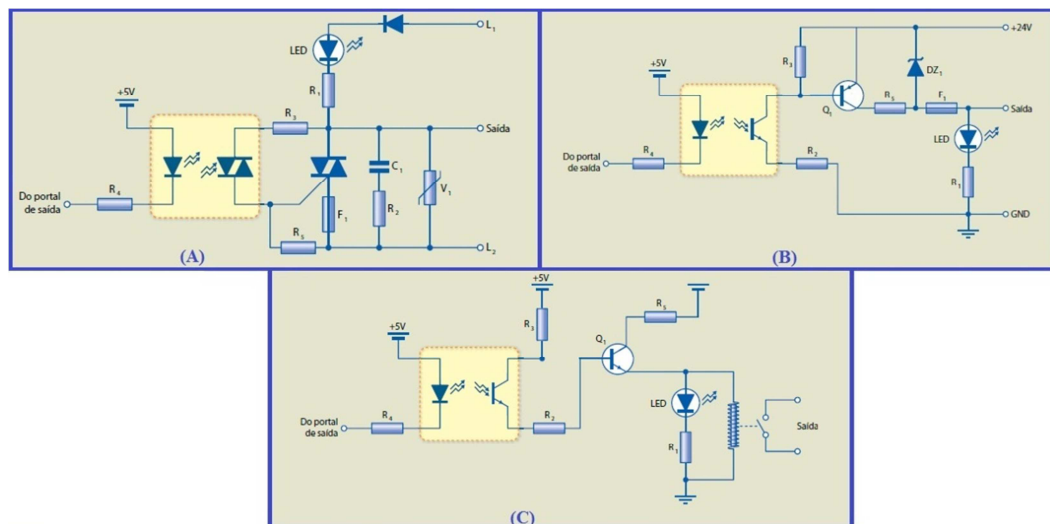


Figura 14 - Módulos de saída: (A) Saída a TRIAC; (B) Saída a Transistor; (C) Saída à relé. Fonte: (PAREDE e GOMES, 2011).

➤ Entradas/Saídas Analógicas:

Esse módulo é baseado em circuitos de conversão analógico-digitais ou digitais-analógico conforme a sua aplicação como entrada ou saída. Fazendo a manipulação de variáveis *multibits* ou variáveis analógicas. Esse tratamento é feito por processadores aritméticos. A Tabela 5 organiza os componentes usados nesses módulos (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

Tabela 5 - Dispositivos Analógicos e *multibits*. Fonte: (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

<b>Entradas Analógicas</b>	<b>Saídas Analógicas</b>	<b>Entradas Multibits</b>	<b>Saídas Multibits</b>
Transdutores de tensão e corrente	Válvulas analógicas	Chave Thumbwheel	Acionamento de motor de Passo
Transdutores de temperatura	Acionamento de motores DC	Encoder Absoluto	Display de sete segmentos
Transdutores de pressão	Controladores de potencia	Encoder incremental	Display alfanumérico
Transdutor de fluxo	Atuadores analógicos		
Potenciômetros	Mostradores gráficos		
L.V.D.T	Medidores analógicos		

A alta escala de fabricação, o baixo custo e a disponibilidade de circuitos integrados possibilitaram que na estrutura do CLP fosse incluída grande capacidade de processamento de dados. Isso também propiciou a expansão da capacidade de E/S e a inserção de módulos analógicos e digitais no CLP. Os módulos de E/S analógicas permitem controlar e monitorar correntes e tensões compatíveis com muitos sensores, válvulas, acionadores de motores e instrumentos de processo (PAREDE e GOMES, 2011).

Os padrões comerciais desses sistemas são: Corrente CC: 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA. Tensão CC: -10 V a +10 V ou -5 V a +5 V ou +1 V a +5 V (SILVEIRA e SANTOS, 1998). Na Figura 15 podem ser observados os diagramas de ligação de tais módulos.

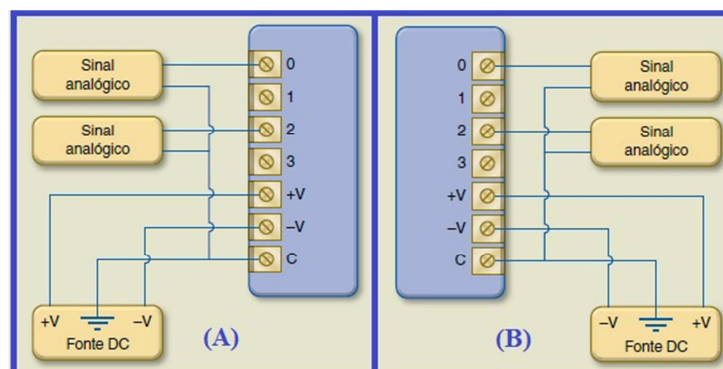


Figura 15 - Esquema de ligação módulo analógico. (A) Entradas analógicas; (B) Saídas Analógicas. Fonte: (PAREDE e GOMES, 2011).

#### 2.2.1.4. Funcionamento dos Controladores Lógicos Programáveis

O funcionamento do CLP é baseado na execução de forma cíclica do programa criado pelo usuário, esse tempo de execução é chamado de Scan ou ciclo de varredura. Dentro desse

ciclo, ocorre primeiramente a leitura dos sinais vindos do meio externo e aplicados às entradas que são transferidos para uma área da unidade de memória interna do CLP, chamada tabela imagem da entrada (SILVEIRA e SANTOS, 1998).

Em seguida, as instruções do programa do usuário são executadas, usando-se os sinais adquiridos durante a etapa de entrada e decidindo quais serão os valores dos sinais de saída digitais e analógicos. Caracterizado os módulos principais de um CLP, é importante conhecermos o seu funcionamento.

Esses valores são guardados em uma região de memória denominada imagem de saída. Durante a execução do programa, os sinais de saída não são alterados, a menos que sejam ativadas entradas de elevada prioridade. Tais entradas são utilizadas para emergências, que não podem esperar o término do scan. Nesse caso, interromp-se o trabalho do CLP, rodando um programa que atende à interrupção. Terminado o atendimento à interrupção, retorna-se ao programa principal. Por fim, no ciclo de scan os valores de saída estabelecidos pelo programa e armazenados na imagem de saída são aplicados aos módulos de saída (PAREDE e GOMES, 2011).

Esse processo ocorre de forma cíclica, de acordo com a capacidade de processamento da CPU do equipamento. Em algumas situações, por exemplo, ao utilizar controladores PID, torna-se necessário fazer as aquisições de sinais (etapa de entrada) em intervalos fixos. Nesse caso, ao terminar a etapa de saída, o CLP fica esperando o instante predefinido para reiniciar o *scan* (operação periódica). Para realizar a tarefa de controle, o processador do CLP simplesmente executa passo a passo o roteiro de instruções contido na tabela de programação que o usuário elaborou. A Figura 16 esquematiza um fluxograma do funcionamento citado (PAREDE e GOMES, 2011).

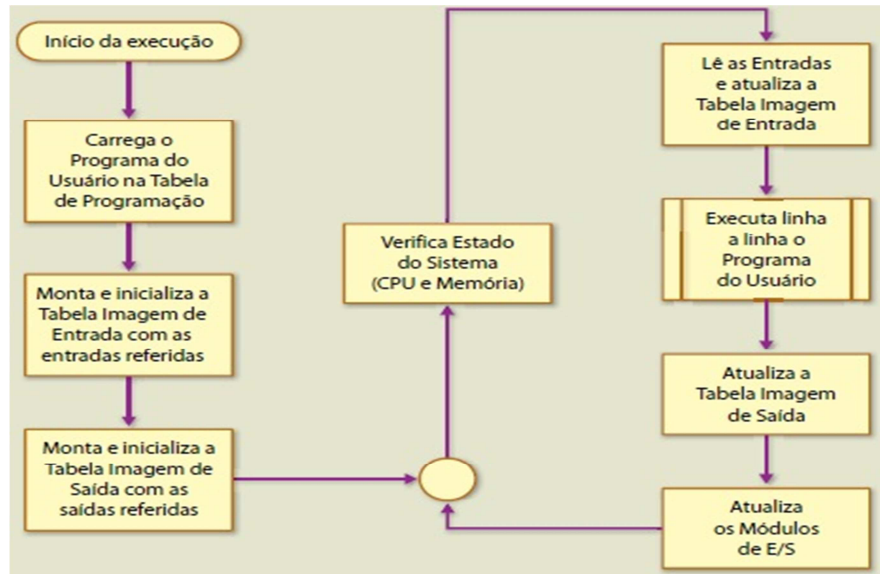


Figura 16 - Fluxograma de funcionamento de um CLP. Fonte: (PAREDE e GOMES, 2011).

### 2.2.2. Instrumentação de Sistemas

Os instrumentos são ferramentas indispensáveis utilizadas para estabelecer e manter padrões de qualidade que identifiquem um produto a ser fabricado. São usados para controlar as variáveis em um processo ou sistema tão precisamente quanto necessário, a fim de alcançar as especificações do produto em composição, forma, cor ou acabamento (SOISSON, 2002).

O instrumento ou sistema de instrumentação pode ser mecânico, pneumático, hidráulico, elétrico, eletrônico, ou uma combinação de quaisquer duas ou mais formas básicas, como o eletromecânico. Cada instrumento ou sistema possui três dispositivos básicos: detector, dispositivos de transferência intermediária (transdutor) e dispositivo de saída (SOISSON, 2002).

A utilidade de um instrumento em qualquer sistema de medição e controle depende da sua capacidade de ativar um dispositivo e controle e da segurança que apresenta para reproduzir a ativação do controle. Tanto a precisão como a segurança de um instrumento depende da sua construção e da capacidade de manter a sua calibração. Um instrumento descalibrado significa um conjunto de medidas casuais e não um verdadeiro dispositivo de medição. Para que uma ferramenta industrial seja útil em um processo, tal instrumento deve ser calibrado dentro de um padrão aceitável (SOISSON, 2002).

A instrumentação torna possível a produção em massa e permite que se estabeleçam limites máximos e mínimos que devem ser mantidos. O uso de padrões de calibração estabelece controles e medições seguras na fabricação e permite que o fabricante se

especialize em um produto, tornando-se fornecedor para outros fabricantes ou grupos montadores (SOISSON, 2002).

Controle e medição industrial, com toda a sua instrumentação associada, são operações que envolvem a aplicação de capital considerável e tem mostrado um enorme crescimento anual (SOISSON, 2002).

### **2.2.3. Sistema SCADA no controle de processos**

Os processos industriais modernos apresentam a necessidade de serem controlados para que se possa obter um maior desempenho. Para esse controle ser eficiente, é necessário um monitoramento adequado. Com isso, tem-se o conceito importante de supervisão de processos, que ao longo dos anos e com a evolução crescente da tecnologia se tornaram cada vez mais rápidos e eficientes. Com a alta tecnologia de processamento de informações moderna, podemos classificar determinado processo como sendo supervisionado em tempo real. Essa definição de tempo real pode ser entendida de maneira fácil, sendo que todas as variáveis supervisionadas no processo são mostradas instantaneamente ao operador, à medida que variam no processo real (LOPES, 2009).

Nos processos industriais, os sistemas supervisórios vêm atender a diversas necessidades e exigências das aplicações. Na indústria, existe a necessidade de uma centralização de informações, para que se possa ter o maior número de informações com o menor tempo possível. Com o uso de Sistemas Supervisórios é possível diminuir o tamanho dos painéis de controle e deixar a interface homem/máquina mais eficiente. São baseados em computadores executando softwares específicos de supervisão de processos industriais. Com esse tipo de softwares, é possível uma visualização gráfica com informações do processo por cores e animações, tornando assim, uma interface mais amigável ao operador. Além dessas vantagens, os projetistas podem contar com diversos tipos de comunicação com as mais variadas marcas e modelos de equipamentos disponíveis no mercado (FUGITA, 2010).

Os sistemas supervisórios modernos têm várias ferramentas, além de ser possível visualizar na tela tudo o que está ocorrendo no processo industrial, também é tarefa do sistema supervisório controlá-lo. Esse tipo de supervisório é denominado SCADA (*Supervisory Control And Data Acquisition*). As variáveis retiradas da planta são processadas por uma unidade de processamento e após a efetivação do processamento teremos o *feedback* do que é necessário ser reajustado no processo, esse sinal é recebido por um acionamento que sinalizará para o atuador, que está na planta, realizar sua tarefa (ALVES, 2005).

Nos tempos modernos, os sistemas de automação industrial fazem uso de tecnologias de computação e comunicação para automatizar o controle e a supervisão dos processos, efetuando coleta de dados em ambientes complexos, geralmente separados geograficamente, e apresentando de modo amigável para o operador, com recursos gráficos avançados através de uma Interface Homem Máquina (IHM) (ALVES, 2005).

Os sistemas SCADA identificam os *tags*, que são variáveis numéricas ou alfanuméricas envolvidas na aplicação desenvolvida, podendo executar operações matemáticas, lógicas, com vetores ou *strings* entre outras ou representar pontos de entrada/saída de dados do processo que está sendo controlado. Neste caso, corresponde às variáveis do processo real, como temperatura, nível, vazão entre outros, se comportando como a ligação entre o controlador e o sistema. É com base nos valores das tags que os dados coletados são apresentados ao usuário (LOPES, 2009).

As condições de alarmes do processo são verificadas pelos sistemas SCADA, essas situações são identificadas quando o valor da *tag* atinge uma faixa ou condição pré-estabelecida, sendo possível programar a gravação de registros em bancos de dados, ativação de som, mensagem, e-mail, celular, para alertar a pessoa responsável pelo processo (LOPES, 2009). A arquitetura básica de um sistema SCADA, usando como elemento de captação de dados e controle um CLP, pode ser vista na Figura 17, onde são apresentados seus principais componentes.

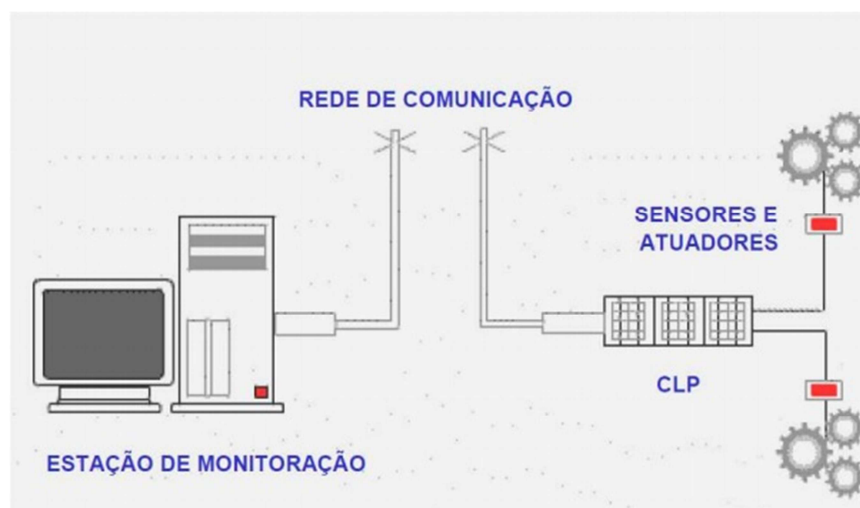


Figura 17 - Componentes Básicos de um sistema SCADA. Fonte: <http://paginas.fe.up.pt/~ee94082/SCADA.htm> acesso 19 de outubro de 2015.

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1. Gaseificador de fluxo concorrente

O gaseificador utilizado foi projetado por Zanatta (2011), Esse reator é do tipo concorrente. A entrada de biomassa se dá pela parte superior. A entrada de ar ocorre em fluxo descendente e passa pelas zonas de oxidação (combustão) e redução, o controle desse ar de entrada foi feito utilizando o sistema desenvolvido por (BARBOSA, 2015). Para mais informações dos projetos dos sistemas usados os trabalhos citados devem ser consultados, informações de tais projetos foram omitidos, pois, o foco do trabalho é o sistema de alimentação de biomassa. Na Figura 18 se observa as partes principais do reator que se deve conhecer.

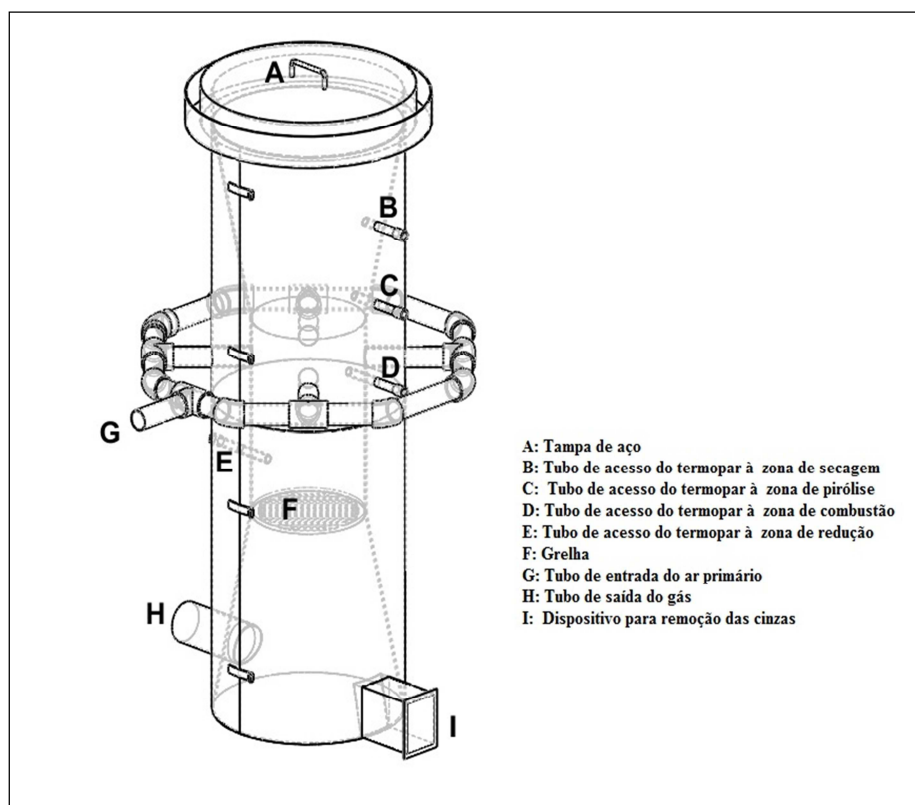


Figura 18 - Esquema do reator e partes constituintes. Fonte: (ZANATTA, 2011).

#### 3.2. Caracterização da biomassa

A caracterização da biomassa é importante, pois, traz informações relevantes para a compreensão de propriedades fundamentais e particulares para cada aplicação. O uso de

biomassa em processos de conversão energética exige um conhecimento abrangente das propriedades físicas e químicas de tal.

Em processos termoquímicos para conversão energética é importante analisar para caracterização da biomassa usada como 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.

Para se obter a granulometria foi utilizado um paquímetro digital, régua milimétrica. Mediram-se os diâmetros e os comprimentos de pelo menos 50 amostras tirando a média entre elas, para se determinar a granulometria média.

Os parâmetros densidade média e composição elementar (hidrogênio, carbono, enxofre, nitrogênio, oxigênio) do combustível utilizado, foram obtidos de forma teórica em consulta bibliográfica.

As caracterizações das propriedades a seguir, foram todas feitas no Laboratório de Energia da Madeira e Painéis do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

O poder calorífico superior do combustível, foi determinado usando a técnica da bomba calorimétrica (D-2015). Esta bomba foi utilizada para medir o calor liberado pela combustão do biocombustível com o oxigênio. Todas as amostras passaram por uma peneira malha 60 e foram queimadas em oxigênio pura a uma pressão de 3000 kPa. Para se determinar o poder calorífico inferior são usados métodos analíticos, sendo a equação 3.1 usada para este fim:

$$PCI = PCS - \frac{2508 * (U_b + 9 * H_2)}{1 + U_b} \quad (3.1)$$

Onde: PCS => Poder calorífico superior, kJ kg<sup>-1</sup>; PCI => Poder calorífico inferior, kJ kg<sup>-1</sup>; U<sub>b</sub> => Teor de água da biomassa, em decimal, base seca; H<sub>2</sub> => Fração de hidrogênio no combustível kg kg<sup>-1</sup>; 2508 => entalpia de vaporização da água, kJ kg<sup>-1</sup>.

A quantidade de cinzas das amostras foram determinadas segundo a norma ASTM D-3.174, onde a temperatura das amostras é elevada a 750 °C por duas horas.

A análise da umidade foi feita primeiramente pesando-se as amostras em uma balança eletrônica de precisão com resolução de 0,01% depois as amostras eram colocadas em uma estufa para a secagem, em uma temperatura entre 104 e 110 °C até que não ocorra mais variação do peso, o tempo de secagem utilizado foi de 48 horas. Depois da secagem as

amostras foram novamente pesadas com a balança eletrônica e, de posse das massas obtidas antes e depois da secagem, foi calculado o teor de umidade em base seca.

### 3.3. Sistema de alimentação de biomassa

O sistema mecânico foi montado pela ferraria da Universidade Federal de Viçosa, vinculado a Pró Reitoria de Administração (PAD). Modificações e ajustes foram feitos pelo próprio autor, no setor de armazenamento do Departamento de Engenharia Agrícola da mesma universidade.

Com intenção de facilitar a operação do gaseificador, foi desenvolvido o sistema de automação do processo de carga do reator, para poder deixa-lo autônomo por um tempo, determinado pela capacidade de armazenamento da madeira. E também deixar este funcionando sem a necessidade de um operador ficar por conta de fazer a recarga deste, portanto, o sistema de automação é baseado no controle de carga de biomassa contida no reator e da carga do armazenamento de biomassa. Um esquema que representa uma visão geral do sistema mecânico desenvolvido pode ser observado na Figura 19.

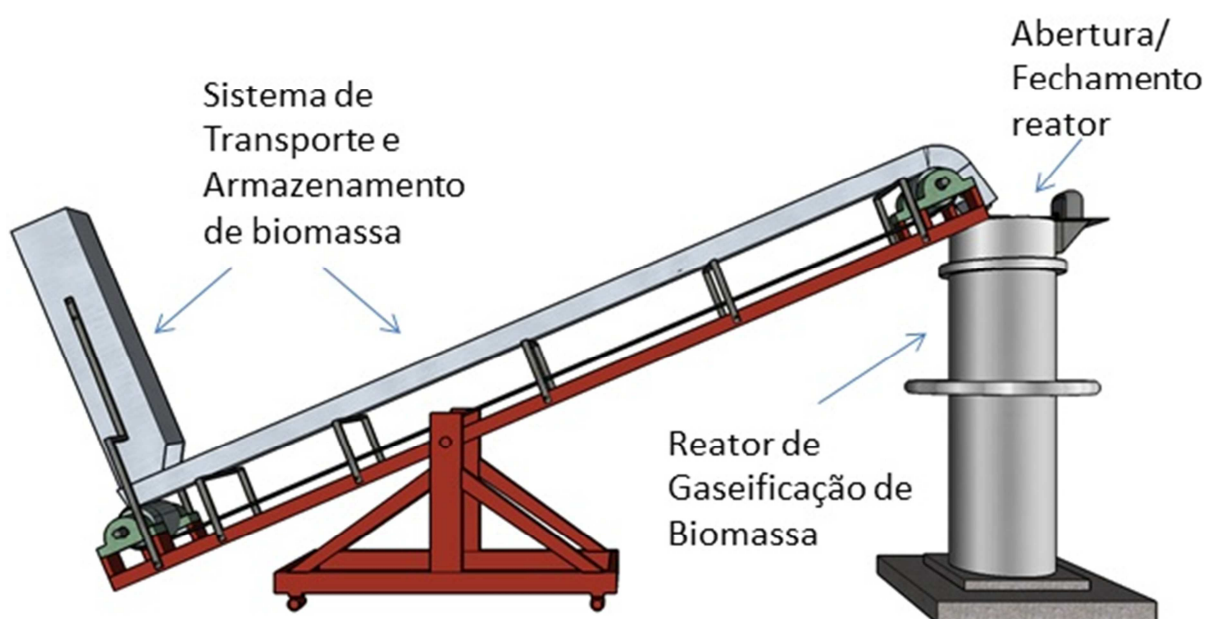


Figura 19 - Esquema geral do sistema mecânico desenvolvido.

A lógica de funcionamento do sistema relacionada ao controle de nível da carga de biomassa é esquematizada na Figura 20.

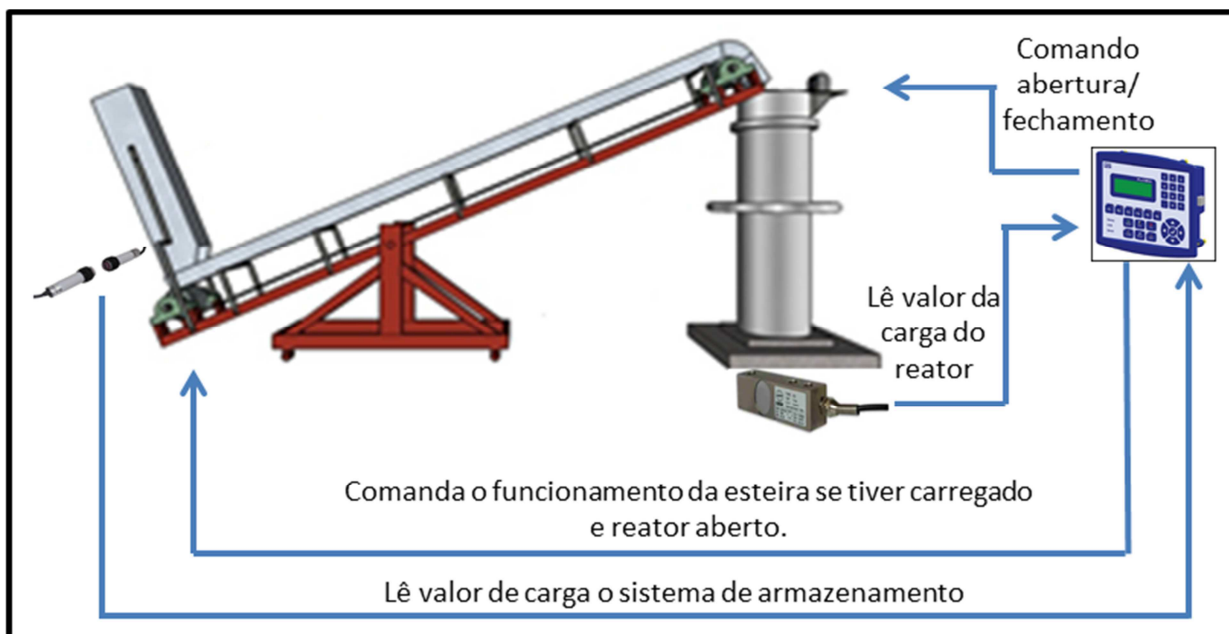


Figura 20 – Lógica de funcionamento do sistema de automação.

### 3.3.1. Armazenamento da biomassa

O sistema de armazenamento foi projetado a fim de deixar o processo de gaseificação autônomo por tempo determinado por sua capacidade, para que essa tecnologia possa ser aplicada na geração de energia em processos que necessitem desta de forma contínua ao longo do tempo. Uma aplicação que necessita dessa autonomia é a utilização de gaseificadores acoplados a motor-gerador para geração de energia elétrica em pequenas comunidades ou em propriedades rurais, pois, dependendo da utilização, a eletricidade é necessária durante quase todas as horas do dia.

Os requisitos de projeto que devem ser atendidos pelo sistema de armazenamento são:

- Apresentar maior capacidade de carga possível;
- Apresentar facilidade de carga e descarga;
- Ter menor gasto energético no armazenamento, carga e descarga.

Devida às dificuldades de armazenamento da biomassa utilizada em silos fechados por suas propriedades físicas, foi necessário se fazer testes de escoamento em vários modelos de silos. Os modelos testados no desenvolvimento do projeto podem ser observados na Figura 21, onde temos o primeiro com seção estreita, formato triangular e saída lateral. O segundo

apresenta seção aberta triangular e com a saída por baixo do silo, e o terceiro testado apresenta formato retangular, sendo a carga e a descarga com as mesmas medidas.

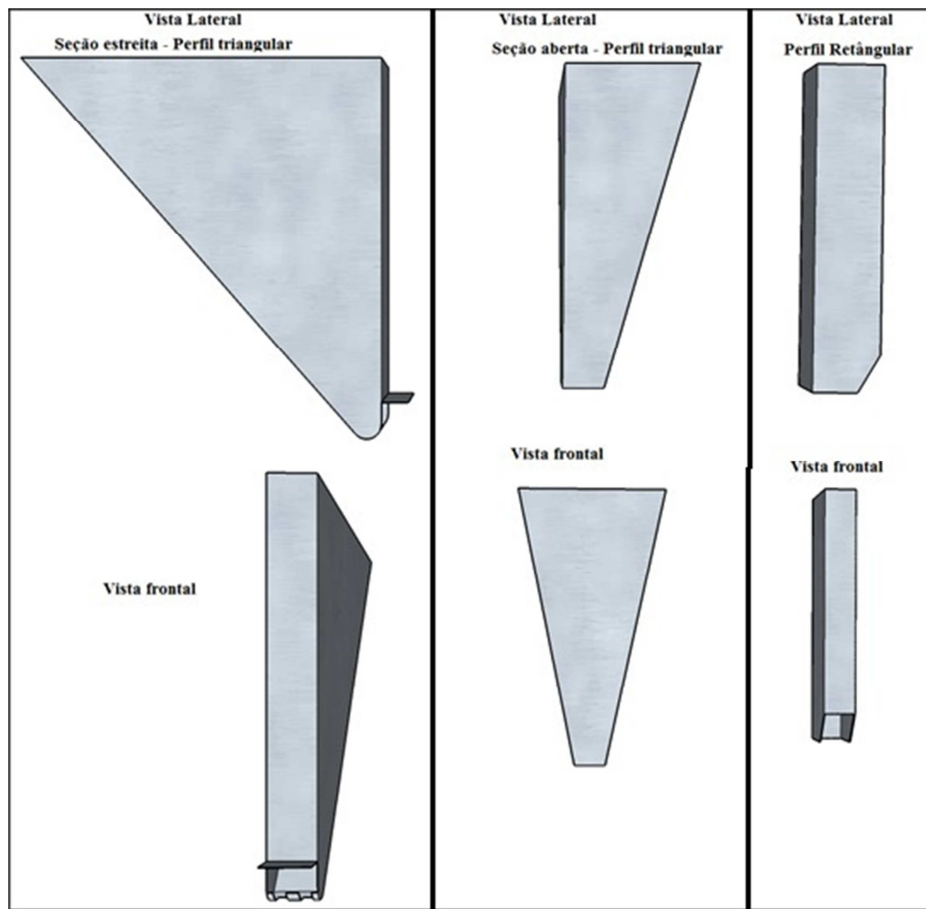


Figura 21 - Modelos de silos testados.

### 3.3.2. Correia transportadora da biomassa

Devido à granulometria alta e a baixa fluidez da biomassa utilizada foi usada para levar a biomassa do armazenamento até o gaseificador uma correia sem fim, que se movimenta entre um tambor livre, no ponto de alimentação, e outro de acionamento na extremidade de descarga. A correia fica apoiada em uma calha feita com uma chapa galvanizada 27, suportando o peso da correia e da biomassa transportada. A calha também serve como armazenamento para o sistema, aumentando sua capacidade. O projeto feito para a esteira transportadora usada (Figura 22) é composto pela calha onde a correia passa e que também serve como armazenamento da biomassa.

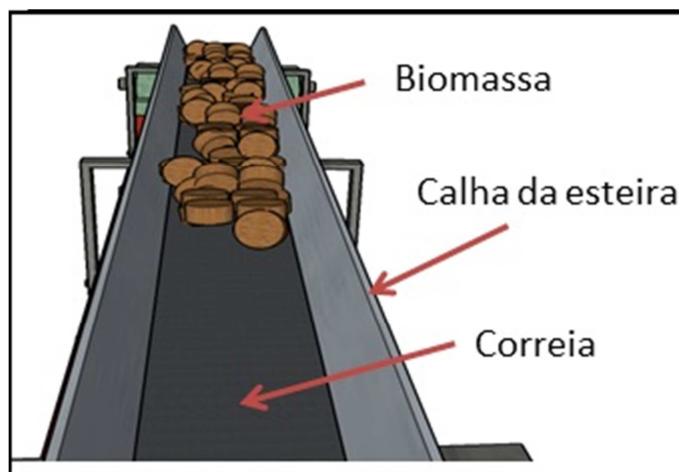


Figura 22 - Correia sem fim.

Segundo Silva et al. (2008) as equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 são usadas para o dimensionamento da força motriz necessária para movimentar a esteira levando em consideração uma altura de elevação de  $h$  metros para esteiras apoiadas em estruturas rígidas. Os transportadores de correia tem consumo de energia relativamente baixo. Essa energia é usada para mover a correia, vencer as perdas por atrito e elevar o material sólido.

Cálculo da potência necessária para movimentar a correia sem carga:

$$Cva = \frac{V * L * 1,292 * (0,015 + 0,00328 * C)}{100} \quad (3.2)$$

Cálculo da potência necessária para transportar o material horizontalmente:

$$Cvb = \frac{Cap * (0,48 + 0,099 * C)}{100} \quad (3.3)$$

Cálculo da potência necessária para elevar o material, ou seja, quando trabalha a certa inclinação.

$$Cvc = \frac{h * 3,33 * Cap}{100} \quad (3.4)$$

Sendo:

$Cv$  = Potencia em CV;

$V$  = velocidade da correia em metro por minuto;

$L$  = Largura da correia em centímetro;

$C$  = Tamanho do transportador em metro do transportador;

$Cap$  = Capacidade em tonelada/hora;

$h$  = Altura de elevação em metros.

De posse dessas equações a potência total requerida pelo motor de acionamento da correia é dada pela soma das potências, mostrada na equação 3.4.

$$Cv_{total} = Cva + Cvb + Cvc \quad (3.5)$$

### 3.3.3. Sistema de abertura e fechamento do gaseificador

O sistema de abertura e fechamento do gaseificador foi projetado a fim de abri-lo no momento da recarga e fechá-lo depois de feita a recarga. Para manter a vedação foi feita uma porta para correr em trilhos acionada por um motor monofásico com uma pequena caixa de redução. Na Figura 23 podemos observar o projeto 3D do sistema, onde a abertura e o fechamento são conduzidos por um fuso de rosca. Se o motor girar para um lado ele abre e se girar para outro ele fecha. Duas chaves fim de curso foram acopladas para detectar a posição da porta.

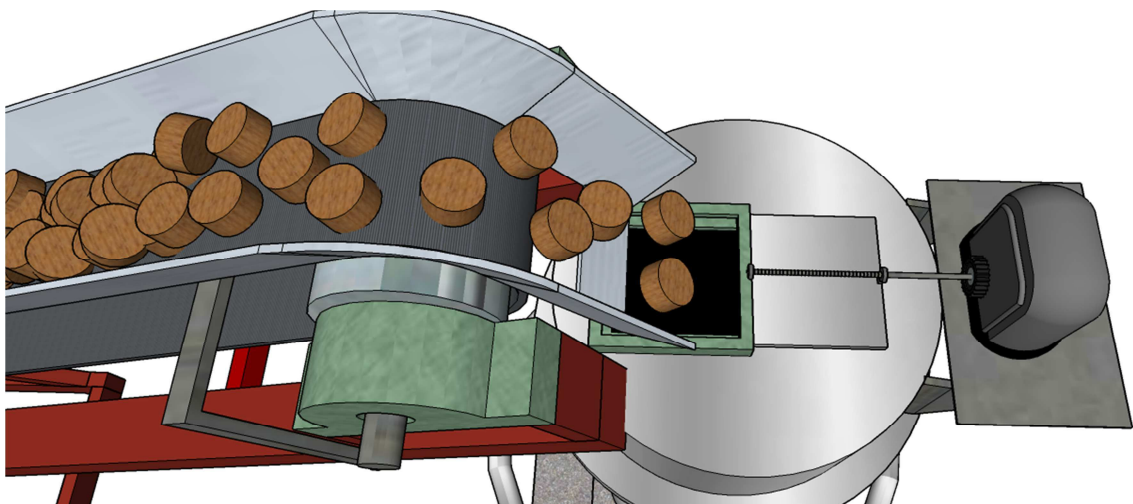


Figura 23 - Sistema de abertura e fechamento do gaseificador.

### 3.3.4. Controlador Lógico programável e IHM

Como elemento principal do sistema de automação, foi utilizado um controlador lógico programável, sendo o modelo usado o PLC 300 da empresa WEG.

O PLC300 é um CLP com interface homem-máquina (IHM) integrada, desenvolvido para atender a necessidade de interface com o usuário em painéis e máquinas e ao mesmo tempo um completo e robusto CLP expansível, rápido e com várias portas de comunicação, possibilitando que o produto seja mestre de redes CANopen (rede CAN) e/ou Modbus RTU (rede RS-485) além de Modbus TCP (rede Ethernet) (WEG, 2011).

As principais características desse equipamento que foram levantadas para sua escolha foram (WEG, 2011):

- Memória de programa 1 MB, possui o processador ARM Cortex-M3 de 32 bits - 120 MHz e a função *hot download* (alteração *online* da programação), é alimentado por uma tensão de 24 VCC com display traseiro (disponível nas versões fundo de painel - BP ou BS) e IHM frontal e possibilidade de customização da membrana (disponível na versão com IHM incorporada - HPC ou HSC), apresenta relógio de tempo real (RTC) e *slot* para cartão SD.
- O ciclo de *scan* para programa de 500 linhas (1.000 instruções, contatos e bobinas): Tamanho ocupado: 12 KB, *scan* por KB de programa: 142 µs/KB, ciclo de *scan* total: 1,7ms.

O PLC300 apresenta 10 entradas digitais com consumo em 24 V de 10 mA sendo as entradas DI1 a DI8 com frequência máxima de 4 kHz e as entradas DI9 e DI10 com frequência máxima de 100 kHz. Apresenta também 9 saídas digitais, sendo de DO1 a DO8 estas são do tipo PNP- 30 VCC - 500 mA, a saída DO9, pode ser programada em PWM. Pode ser usada como saída digital normal do tipo *push-pull* 30 VCC - 100 mA e frequência máxima de 300 kHz.

Possui uma saída analógica com resolução de 10 bits nos padrões de 0 a 10 V CC, 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA, configurável. E também um entrada analógica com resolução de 12 bits também nos padrões 0 a 10 V CC, 0 a 20 mA ou 4 a 20 mA, também configurável. Tem a possibilidade de conexão de até dois módulos de expansão digitais e analógicos, e também expansão de entradas e saídas digitais e analógicas via rede *CANopen*.

O PLC300 permite salvar dados, programa, fazer log de eventos, receitas em um cartão de memória tipo SD. Como padrões de comunicação apresenta porta de comunicação

USB (programação e monitoração), porta RS232 com protocolo Modbus-RTU escravo, com monitoramento e programação a distância, via modem em linha telefônica ou utilização de leitor de código de barras ASCII, porta RS485 isolada com protocolo Modbus-RTU mestre/escravo, porta CAN isolada com protocolo CANopen mestre/escravo e porta Ethernet 10/100 com protocolo Modbus-TCP mestre/escravo.

Esse equipamento apresenta uma interface de operação sendo composto por um display de LCD 4 linhas x 20 caracteres com *backlight*, teclado alfanumérico 12 teclas de funções e ainda com a possibilidade de configuração de até 512 telas.

O produto é programado em linguagem *ladder* através do *software* WPS (*Weg Programming Suite*).

Além da programação *ladder*, o WPS permite a montagem das telas, graficamente, configuração dos alarmes, atribuição das teclas de função, configuração do equipamento além do firmware que pode ser atualizado diretamente via PC. A programação pode ser feita via USB, *Ethernet* ou Serial RS232 e RS485. A Figura 24 é uma vista frontal do equipamento e a Figura 25 uma vista da parte traseira e seus componentes.



Figura 24 - Interface de operação PLC 300. Fonte: (WEG, 2011).

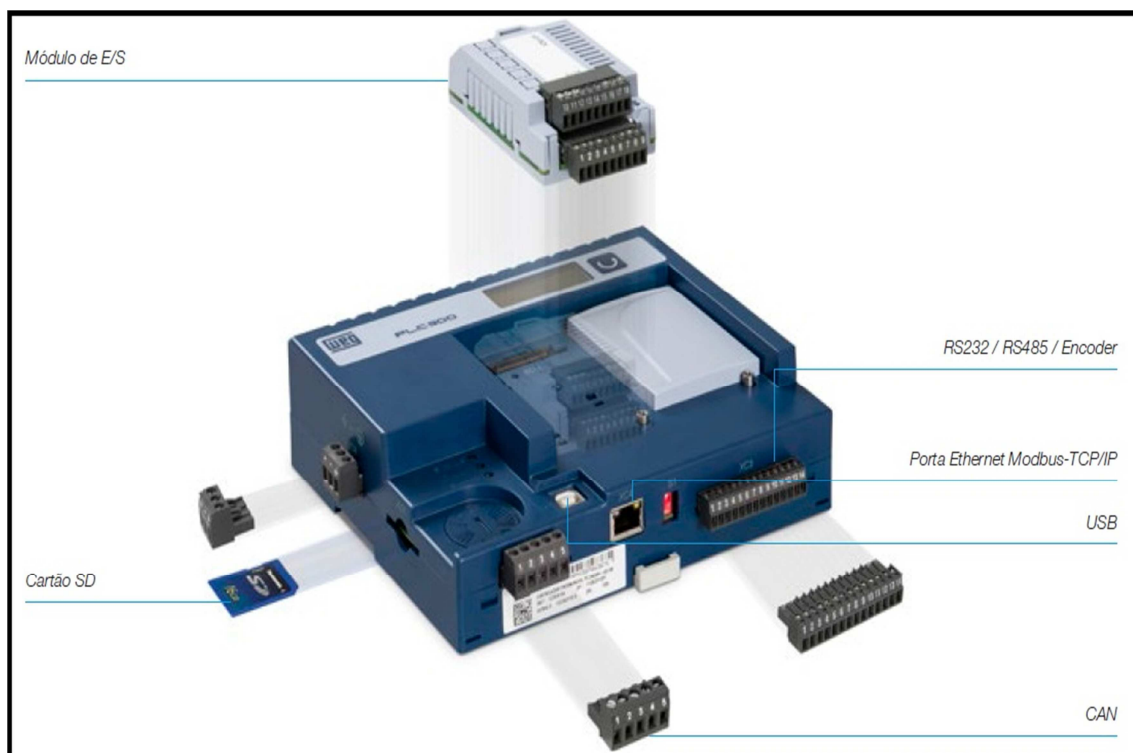


Figura 25 - Vista traseira e módulos do PLC 300. Fonte: (WEG, 2011).

Além da IHM do próprio CLP usado, foi criada uma interface para monitoramento e controle a ser usada em computador pessoal com o intuito de se fazer uma estação de monitoramento controle e aquisição de dados em tempo real, o que completa a estrutura de um sistema SCADA. Para isso, foi utilizado o *software* Elipse SCADA versão demonstração, disponível no site [www.elipse.com.br](http://www.elipse.com.br), de forma gratuita. Essa versão apresenta algumas limitações, porém, para essa aplicação ela é suficiente.

### 3.3.5. Instrumentos de medidas

A automação e instrumentação do sistema têm como principal finalidade o controle de nível de biomassa dentro do reator de gaseificação e do sistema de armazenamento de madeira para que o reator gaseifique continuamente.

#### 3.3.5.1. Medida do nível de biomassa do reator

Para fazer a medida de nível da carga de biomassa dentro do reator foram pesquisados vários instrumentos. Porém, pelo fato da alta temperatura do processo de

gaseificação os equipamentos usados para medida de nível dentro do reator apresentam alto custo, pois devem suportar a alta temperatura do processo.

Com isso, optou-se pela medição de nível indireta, através de uma célula de carga para a medida do peso da biomassa do reator, para se definir os níveis de atuação do sistema de automação.

As células de carga mais utilizadas são as baseadas em extensômetros. Esse componente no qual as células de carga são baseadas é uma fina tira de metal, projetado para medir carga mecânica pela mudança de resistência quando esticado ou comprimido, dentro de seus limites elásticos.

No esquema interno das células de carga (Figura 26), temos uma configuração chamada Ponte de *Wheatstone*. Com a aplicação de força sobre a célula de carga, temos a compressão ou alongamento dos extensômetros, o que faz a resistência variar e a ponte de *Wheatstone* ficar desbalanceada, surgindo uma tensão entre as saídas +SIG e -SIG. Caso contrário não haverá diferença de tensão na saída. O nível da tensão de saída é expressa em mV/V (milivolts de sinal por volt de excitação) com carga máxima. Como exemplo, para excitação de 10 V em uma célula de carga 2 mV/V, a saída máxima, sendo aplicado a maior capacidade de força, seria apenas de 20 mV (AGILENT TECHNOLOGIES, 2012).

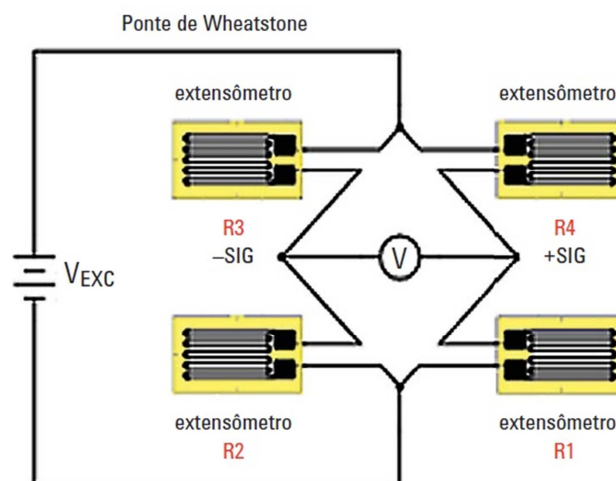


Figura 26 - Configuração Célula de carga. Fonte: (AGILENT TECHNOLOGIES, 2012).

A célula de carga utilizada no projeto foi a do tipo *beam* modelo ICS de 1 t da marca IWM, com sensibilidade de 2 mV/V ( Figura 27).



Figura 27 - Célula de carga utilizada. Fonte: <http://www.iwm-brasil.com.br>. Acesso em 19 de dezembro 2015.

Ela foi instalada embaixo de um dos pés do reator, como se observa na Figura 28. O suporte que apoia o reator na célula tem aproximadamente 15 cm do pé do reator, para evitar a influencia da temperatura proveniente do reator. Esse suporte de sustentação pode ser observado na Figura 28.



Figura 28 - Montagem da célula de carga embaixo do gaseificador.

O sinal proveniente da célula de carga é ligado a um conversor de sinal que amplifica e converte o sinal de tensão da célula para um sinal de 4 a 20 mA, o modelo usado foi o CS-

0900-P1 da GEFTRAN. O esquema elétrico é ilustrado na Figura 29, o sinal de corrente é aplicado à entrada analógica do CLP, que faz a leitura dessa variável.

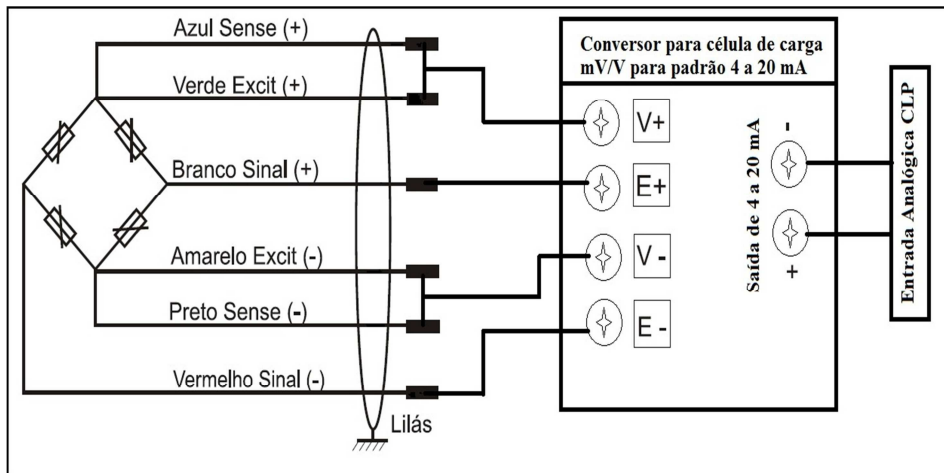


Figura 29 - Esquema elétrico de ligação Célula de carga.

### 3.3.5.2. Medida do nível do sistema de armazenamento

Para fazer a medida de nível da biomassa no sistema de armazenamento, que deixa o reator autônomo por um tempo maior, foram usados sensores óticos de barreira da METALTEX M18 tubular (Figura 30).



Figura 30 - Sensor ótico de barreira. Fonte: [www.metaltex.com.br](http://www.metaltex.com.br) acesso 19 de dezembro 2015.

Esse sensor é composto por um emissor e um receptor montados em dispositivos diferentes. Ao serem alinhados, os dois componentes criam entre si um feixe de luz infravermelho. Com a presença de biomassa entre eles, faz com que esse feixe de luz seja interrompido e o sensor seja ativado, como se vê na Figura 31. Com isso, eles são posicionados nos níveis desejados de medição, que definem os níveis alto e baixo de biomassa.

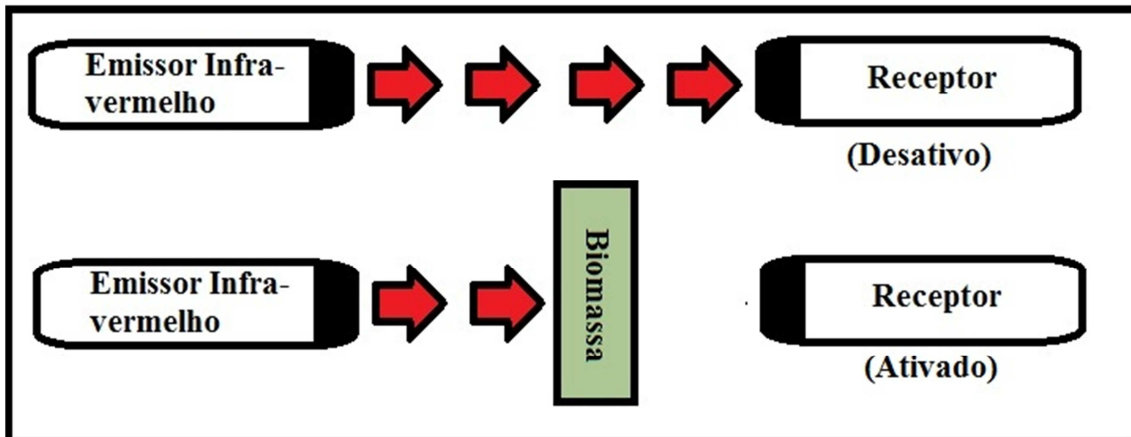


Figura 31 - Funcionamento dos sensores de barreira.

O esquema de ligação dos sensores óticos de barreira pode ser observado na Figura 32, onde temos a ligação do emissor e do receptor como PNP, foi usada a lógica normalmente aberta. Onde temos o bloco de carga na figura, representa a ligação ao borne de entrada digital do CLP.

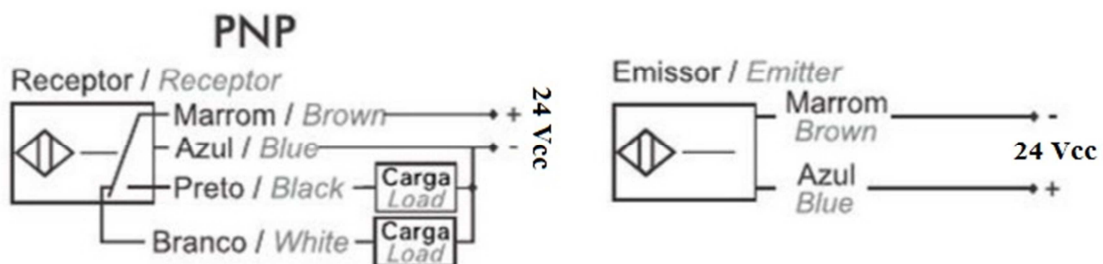


Figura 32 - Esquema de ligação dos sensores fotoelétrico de barreira. Fonte: [www.metaltex.com.br](http://www.metaltex.com.br). Acesso 19 de dezembro de 2015.

### 3.3.5.3. Chaves fim de curso

Chaves fim de curso com contato normalmente aberto (Figura 33), foram usadas para detectar se a porta do gaseificador está aberta ou fechada de acordo com sua posição.



Figura 33 - Chave fim de curso. Fonte: [www.filipeflop.com](http://www.filipeflop.com) acesso dia 19 de dezembro de 2015.

### 3.4. Análise do gás e eficiência do reator

Para analisar a composição do gás combustível resultante da gaseificação e calcular a eficiência do reator, faz-se necessário a coleta de amostras e sua análise. Com isso é possível validar o sistema de automação proposto, pois, se este causar uma influência significativa nesses parâmetros, se torna totalmente inviável a sua utilização e implantação.

Os gases analisados e quantificados em concentração percentual são o monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), gás hidrogênio (H<sub>2</sub>), gás metano (CH<sub>4</sub>), além da quantificação do poder calorífico inferior (PCI). 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 montagem pode ser observada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, sendo que, para que o gás seja inserido no analisador é preciso passá-lo por um resfriamento e uma filtragem. O processo, é composto por uma serpentina de canos de ¼” de cobre e imersa em água fria para resfriá-lo. Depois o gás passa por um filtro de álcool 92,8°, sílica gel e carvão ativado para remover impurezas e umidade.



Figura 34 - Sistema de resfriamento, filtragem e análise do gás.

O cálculo da eficiência foi feito baseado no método a frio, onde tem-se o quociente entre a energia química do gás e a energia química do combustível. O método foi retirado de (BARBOSA, 2015) adaptado de (GUO, DONG, *et al.*, 2014). A equação 3.6 define o cálculo desse método.

$$\eta = \left( \frac{PCI_{gás} * V_{gás}}{PCI_{lenha}} \right) * 100 \quad (3.6)$$

onde:  $PCI_{gás}$  => Poder calorífico inferior do gás  $\text{kJ Nm}^{-3}$ ;  $V_{gás}$  => Volume específico do gás  $\text{Nm}^3 \text{Kg}^{-1}$ ;  $PCI_{lenha}$  => Poder calorífico da lenha  $\text{kJ Nm}^{-3}$ .

Para se encontrar o volume específico do gás, foi baseado na análise elementar gases que compõe o gás resultante da gaseificação. Sendo este gás composto por concentrações de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e o restante da concentração serão atribuídos ao gás N<sub>2</sub>. Pode-se utilizar tal aproximação, pois os gases respeitam a Lei Dos Gases Ideais e o gás limitando do processo é o N<sub>2</sub>.

$$V_{gás} = V_{CH_4} * CH_4 + V_{H_2} * H_2 + V_{CO_2} * CO_2 + V_{CO} * CO + V_{N_2} * N_2 \quad (3.7)$$

onde:  $V_{gás}$  => volume específico do gás resultante da gaseificação;  $V_{CH_4}$  => volume específico do gás metano;  $V_{H_2}$  = volume específico do gás hidrogênio;  $V_{CO_2}$  = volume específico do gás dióxido de carbono;  $V_{CO}$  => volume específico do gás monóxido de carbono;  $V_{N_2}$  => volume específico do gás nitrogênio, todos em  $\text{Nm}^3 \text{kg}^{-1}$ ;  
 $H_2$  => 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, concentrações dadas em %.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Depois dos testes feitos no sistema de automação durante o desenvolvimento do sistema, foram realizados três testes com o gaseificador situado no Laboratório de Energias Alternativas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa-MG.

No teste inicial, feito em conjunto com (BARBOSA, 2015), foi feita uma caracterização do funcionamento do reator, onde se definiu características fundamentais para o desenvolvimento dos sistemas discutidos em ambos os trabalhos. Foram determinadas as temperaturas do processo, o consumo de biomassa por hora, entre outras características importantes aos projetos.

Nos testes seguintes foi analisado o funcionamento do sistema de alimentação de biomassa automático. Para isso, foi feita a análise do gás de saída para o cálculo de rendimento do reator e o levantamento do perfil de temperatura, para comparar com o trabalho de (BARBOSA, 2015), e a verificação de possíveis influências causadas pela abertura do reator.

### 4.1. Caracterização da biomassa utilizada

A biomassa utilizada no trabalho foi lenha de eucalipto cortada em discos, para ter maior fluidez no sistema de alimentação. A Figura 35 mostra uma imagem desse combustível.



Figura 35 - Lenha de eucalipto utilizada como combustível.

As características da biomassa foram determinadas de acordo com o descrito no item 3.2, onde foram analisadas três amostras, os resultados para os valores de PCS, PCI, teor de cinzas e umidade, das amostras de biomassa são apresentadas na Tabela 6, onde temos expressado o valor da média, o desvio padrão e o coeficiente de variação. Sendo que o PCI foi calculado pela equação 3.1.

Tabela 6 - Características da lenha de eucalipto.

	<b>PCS (kJ/kg)</b>	<b>PCI (kJ/kg)</b>	<b>Teor de Cinzas (%)</b>	<b>Umidade em base seca (%)</b>
Média	18988,51	16620,07	0,1	17
Desvio Padrão	193,65	197,23	46,25	0,71
Coeficiente de Variação (%)	1,02	1,19	15,3	4,18

De acordo com os dados da Tabela 6, pode-se deduzir que a biomassa apresenta uma característica homogênea entre as amostras, com isso temos um combustível com características semelhantes durante todo o experimento, isso é comprovado pelo pequeno valor do coeficiente de variação. Na tabela também é possível notar que o combustível utilizado apresenta uma alta umidade, isso se deve ao local onde estava acomodada.

As características físicas da biomassa foram determinadas, em 50 amostras sendo medidos os diâmetros, o comprimento. Estas características podem ser observadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Características físicas da lenha do eucalipto.

<b>Características</b>	<b>Máximo (cm)</b>	<b>Mínimo (cm)</b>	<b>Médio (cm)</b>	<b>Desvio Padrão (cm)</b>	<b>Coeficiente de variação (%)</b>
Diâmetro	12	4,0	8,2	16,81	2,05
Comprimento	4,8	2,8	3,3	3,96	1,2

Essa tabela, também nos comprova a uniformidade das lenhas de eucalipto em relação ao seu tamanho.

## 4.2. Sistema automático de alimentação de biomassa

O sistema automático tem por finalidade facilitar a operação da gaseificação e mantê-lo autônomo por um tempo maior do que a capacidade do reator permite. Para isso, foi desenvolvido um sistema mecânico para a movimentação dessa biomassa, sendo esse sistema comandado por um controlador lógico programável, que executa um controle liga/desliga.

Esse controle foi utilizado, pois, quando se escolhe um controlador para um processo, a premissa a ser usada é que o controle deve ser o mais simples possível que atenda a tal aplicação. Além do motivo do reator possuir pequena capacidade e baixo consumo, um controle contínuo, como um PID, seria difícil de ser aplicado, pois, a dosagem do reator seria mínima, o que esbarraria nas características físicas do combustível.

Para validar o funcionamento do sistema automático, foram feitos testes no reator, gaseificando-se lenha de eucalipto e analisando o gás, produto final da gaseificação. Por motivos de segurança, esse gás foi totalmente queimado em um combustor.

Primeiramente, um sistema de armazenamento para a lenha teve que ser desenvolvido, pois esse tipo de biomassa apresenta dificuldades de armazenamento, devido suas características. Inicialmente foi utilizado toras de 10 cm de diâmetro e 15 cm de comprimento, porém, não se encontrou formato de silo que torne o escoamento dessas madeiras de forma ordenada, devido ao tamanho.

Com esse problema, foi adotada a lenha em formato de discos, como apresentada no item 4.1. Os formatos de silos testados para essa biomassa foram apresentados no item 3.3.1.

Os dois formatos triangulares, que apresentavam estreitamento entre a boca de carga e descarga não apresentaram fluidez alguma para essa biomassa, pois, estas obstruíam o silo no afunilamento. Foi colocado um sistema vibratório nesses modelos, mas não se obteve êxito.

Devido à obstrução da passagem, foi projetado um silo que apresentasse o mesmo tamanho, tanto no lado de carga quanto no de descarga. Com isso, chegou-se ao formato funcional para o experimento, que é o formato de seção retangular, com descarga na parte de inferior e carga na parte superior. As dimensões usadas foram 18 cm x 30 cm x 150 cm. Na Figura 36 apresenta-se a parte interna do modelo de silo utilizado.



Figura 36 - Vista interna do silo utilizado.

Nesta figura é possível notar que a madeira fica apoiada sobre a correia transportadora e à medida que esta se movimentava, carrega a biomassa posicionada próxima à seção de descarga.

Para a medida de nível de biomassa no sistema de armazenamento, foram utilizados sensores óticos de barreira, onde foi feita uma medida de nível discreta, pois temos definido apenas dois pontos nível alto de biomassa no silo, e nível baixo de biomassa. Além do silo, o sistema de transporte formado pela esteira apresenta uma calha de 10 cm de altura que serve também para o armazenamento de biomassa. Com isso, o sistema de armazenamento tem capacidade para 30 kg de lenha cortada em discos, o que dobra o tempo de gaseificação sem interrupção do sistema. A Figura 37 apresenta esses componentes do sistema.



Figura 37 - Sistema de armazenamento e medição de nível.

Na Figura 37, é possível ver a esteira transportadora que é composta por uma correia de 16 cm de largura, pois, essa largura é compatível com o tamanho do reator. Para manter a esteira dentro da inclinação de 30°, que é recomendado para esse tipo de esteira, foi feito uma esteira com 4 m de comprimento deixando-a com uma inclinação de aproximadamente 25°.

A capacidade em Toneladas/hora da correia foi calculada de acordo com o consumo do reator. Esse dado foi levantado em trabalho antigo e em teste preliminar feito em conjunto com (BARBOSA, 2015). Para caracterizar o seu funcionamento, tanto relacionado ao consumo quanto a outros parâmetros, este foi feito no reator ainda sem automação alguma. De acordo com o teste o reator consome em média 10 kg/h ou 0,01T/h.

A velocidade da esteira é escolhida em função do tipo de material a transportar. Geralmente não se usa menos do que 15 metros por minuto (0,25 m/s) e nem mais do que 200 metros por minuto (1,3 m/s). Foi escolhida a menor velocidade 15 metros por minuto para o dimensionamento da força motriz.

Portanto, a velocidade escolhida não foi adequada para a aplicação, pois, a esteira passa por baixo do silo retirando as madeiras deste, logo a velocidade tem que ser tal que

aconteça essa retirada de forma ordenada e segura. Variando a velocidade de acionamento do motor com um inversor de frequência foi determinado que o acionando a 20 RPM, o sistema funcionava de forma ordenada. Acima disso, a velocidade tornava essa retirada de madeira do silo inadequada. Como usamos roletes de 20 cm de diâmetro, é possível calcular a velocidade linear da esteira que é de 4 m/mim. Fazendo o redimensionamento da força motriz não se teve alteração do motor usado. A Figura 38 apresenta uma imagem da esteira carregada.



Figura 38 - Esteira transportadora com a calha carregada de biomassa.

Usando os dados anteriormente apresentados e as equações 3.2, 3.3, 3.4 e 3.5 do item 3.3.2 chegou-se em uma potência de 0,04 CV, pois, a capacidade e tamanho da esteira são pequenos. Com isso, como se possuía um motor de 1 CV este foi utilizado na força motriz da esteira em conjunto com uma caixa de redução de velocidade para aumentar o torque da esteira em baixa velocidade, como mostrado na Figura 39.

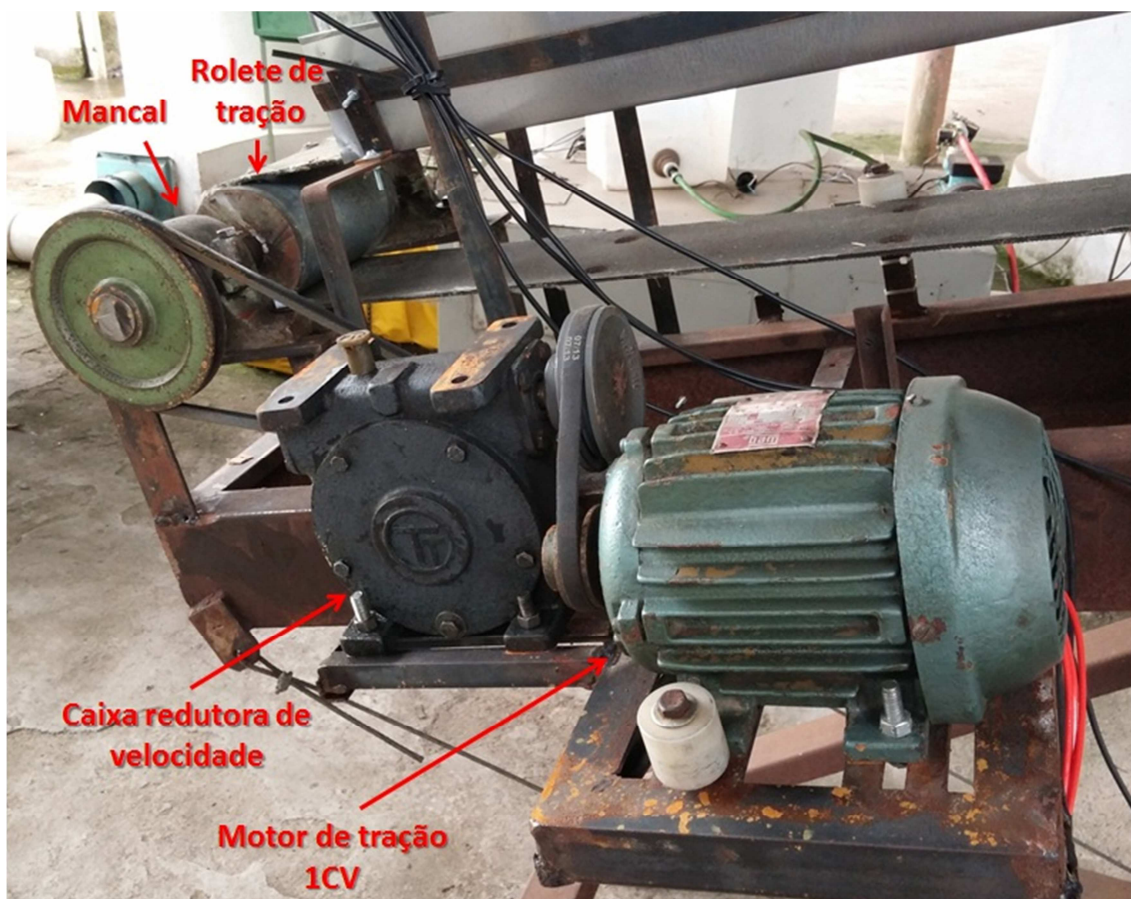


Figura 39 - Componentes de tração e movimentação da esteira.

Para poder recarregar o reator, foi projetado um sistema para abri-lo e fecha-lo. Sendo que essa porta deve possuir a maior vedação possível. O sistema projetado é mostrado na Figura 40.



Figura 40 - Sistema de abertura e fechamento do reator.

A porta apresenta as dimensões 20 x 20 cm, isso se deve ao tamanho do reator, que tem dimensões reduzidas. Esse sistema foi feito na tampa do reator, modificando o projeto da tampa de (ZANATTA, 2011). Foi feito também um aumento de 20 cm na altura dessa tampa, para não atrapalhar no fechamento do reator e ainda manter a zona de secagem com certo nível de biomassa.

Essa porta apresentou um problema quando aberta, pois, como o reator utilizado é de pequeno porte, sua capacidade de biomassa é reduzida, sendo sua zona de pirolise e secagem pequena. Ao abrir o reator, uma quantidade significativa de alcatrão saía pela porta, inviabilizando seu uso em locais fechados. Por outro lado, quando foi colocada lã de vidro, dentro dos trilhos que corre a porta, sua vedação quando fechada tornou-se satisfatória para os testes tanto no quesito saída de fumaça e alcatrão quanto no quesito entrada de ar. A Figura 41 apresenta a porta fechada em pleno funcionamento do reator, onde pode ser observada a quantidade mínima de fumaça que sai por esta.



Figura 41 - Sistema de abertura em pleno funcionamento do reator.

### 4.3. Controlador e Interface Homem-Máquina

O controlador utilizado foi o PLC 300, no item 3.3.4 são apresentadas todas as suas características importantes. Foram utilizadas as entradas digitais, a entrada analógica, as saídas digitais e a porta de comunicação *ModBus RTU*, por meio da interface RS-485 para comunicação com o sistema de monitoramento e controle feito no computador. O PLC 300 foi programado na linguagem *Ladder*. Na Tabela 8 são organizadas todas as entradas e saídas usadas do CLP bem como suas funções.

Tabela 8 - Tabela de entradas e saídas do CLP usadas.

<b>Entradas digitais do CLP</b>	<b>Dispositivo elétrico comando/acionamento usado</b>	<b>Descrição do funcionamento</b>
DI1	Chave gangorra	Habilita malha de controle automático
DI2	Chave gangorra	Liga a esteira manualmente
DI3	<i>Push botton</i>	Abre/fecha porta do reator manualmente
DI4	<i>Push botton</i>	Desativa todo o sistema (segurança)
DI7	Chave N/A fim de curso	Indica quando a porta do reator está fechada
DI8	Chave N/A fim de curso	Indica quando a porta do reator está aberta
DI9	Sensor de barreira	Sensor de nível alto de biomassa no silo
DI10	Sensor de barreira	Sensor de nível baixo de biomassa no silo
Entrada Analógica do CLP	Dispositivo elétrico comando/acionamento usado	Descrição do funcionamento
AI1	Célula de carga	Medição de nível do reator de gaseificação
Saídas digitais do CLP	Dispositivo elétrico comando/acionamento usado	Descrição do funcionamento
DO1	Relé 24 v	Aciona o motor da esteira transportadora
DO2	Relé estado sólido	Aciona o motor para abrir o reator
DO3	Relé estado sólido	Aciona o motor para fechar o reator

O esquema elétrico do conector de entradas digitais e analógica é apresentado na Figura 42. Na Figura 43 tem-se os conectores das saídas digitais e da alimentação do CLP, e consultando a Tabela 8, são apresentados todos os dispositivos referentes às ligações.

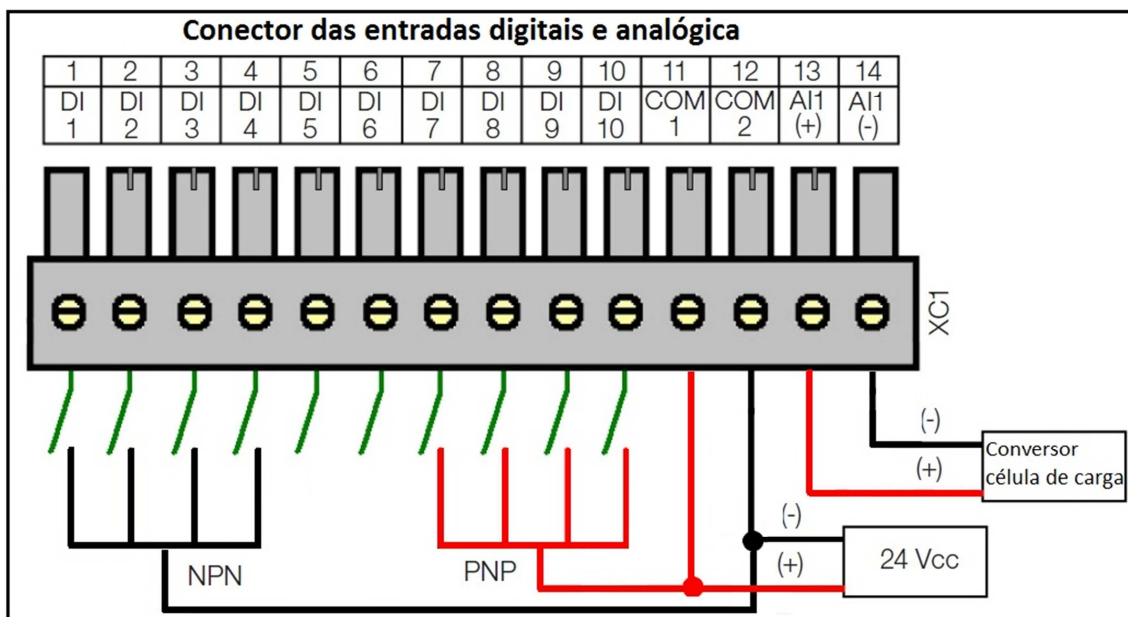


Figura 42 - Esquema elétrico das entradas do CLP.

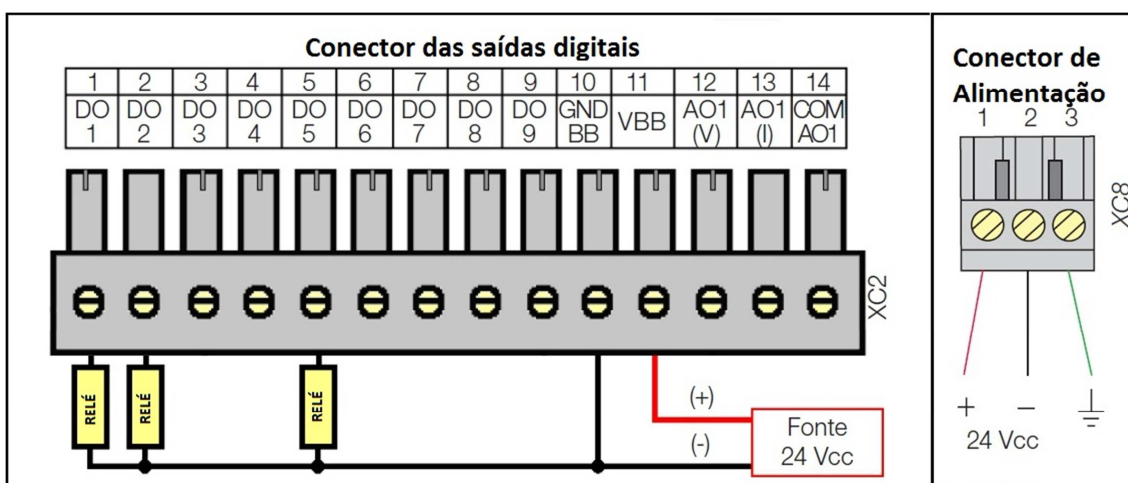


Figura 43 - Esquema elétrico das saídas e da alimentação do CLP.

Como descrito no item 3.3.5.1 o nível do reator foi medido indiretamente com uma célula de carga. Para ajustar a medição do sensor é necessário levantar sua curva de calibração, para isso é usado uma balança comercial aferida. Com a balança foram feitas amostras de 10 Kg de madeira. Encheu-se o reator com as amostras e leu-se os dados da variável digital convertida pelo CLP, que é proporcional ao peso colocado no reator. Primeiramente foi lida a variável para o reator sem nenhuma biomassa dentro, depois se acrescentou de 10 em 10 Kg, anotando o valor da variável digital no CLP. Com esses dados foi possível traçar a curva de calibração do sistema, o qual nos dá o peso da biomassa dentro do reator a todo o instante de leitura. A Figura 44 se vê a linearização dos dados, e a equação que melhor representa essa transformação.

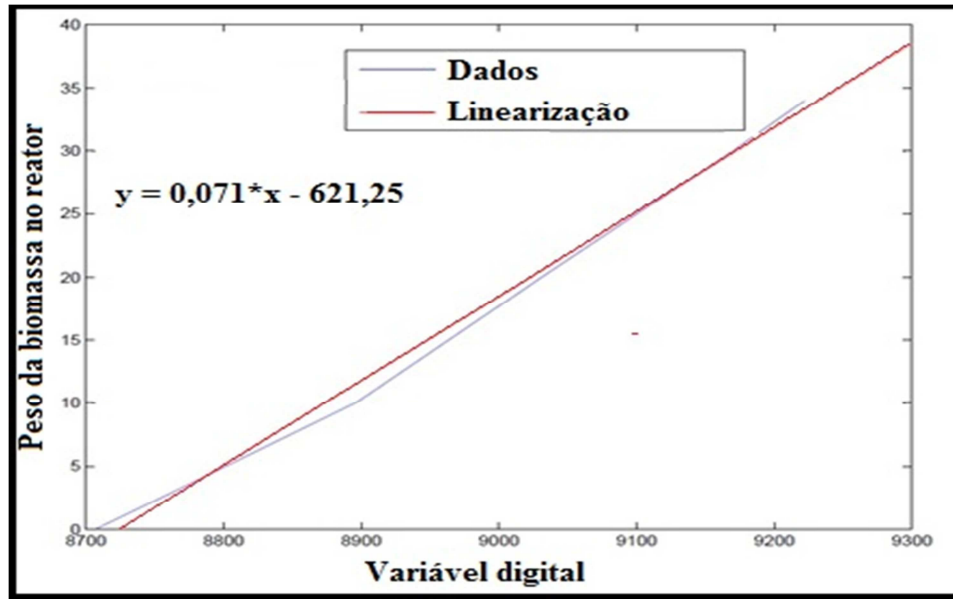


Figura 44 - Curva de Calibração da célula de carga.

Com o ajuste feito, foi possível definir os níveis máximo e mínimo de biomassa do gaseificador, utilizados no sistema de controle. O nível mínimo foi definido para que a região de secagem do reator não fosse esvaziada completamente e o nível máximo foi definido de acordo com as limitações físicas do reator. O nível mínimo foi atingido com 20 Kg de biomassa, e o máximo com 34 Kg de biomassa. Essa calibração foi usada para que fosse possível mostrar essa variável na tela para controle do operador. Na programação *ladder*, a leitura da porta analógica era feita de 10 em 10 s, e eram feitas 50 médias antes de convertê-la para o valor de massa real usando a equação da Figura 44. Com isso foi possível se estabilizar a leitura e retirar grandes variações na amostragem.

A montagem do CLP em campo foi feita em uma caixa hermética. A Figura 45 mostra a montagem feita, com os dispositivos de entrada e saída acoplados.



Figura 45 - Quadro de comando do sistema.

Para fazer o programa foram seguidas às condições organizadas na Tabela 9, onde temos quais condições são usadas pela lógica do programa para acionar as saídas.

Tabela 9 - Condições de acionamento das saídas.

Saídas Digitais	Condições de acionamento
DO5	(Botão liga manual (DI2) ou atingir valor mínimo de biomassa no reator ou Malha de tempo para recarga for acionada) & (reator estiver aberto (DI8) & botão desliga geral (DI4) está desativado & Silo está carregado)
DO1	(motor ligado para fechar está desativado) & (Se o reator estiver fechado (DI7) & o botão abre/fecha for pressionado (DI3)) ou (Nível mínimo do reator é atingido & Reator está fechado & Armazenamento ainda tem biomassa) ou Malha de tempo para recarga for acionada
DO2	(motor ligado para abrir está desativado) & (Esteira está parada & Nível máximo é atingido) ou (Tempo de recarga é atingido) ou (Se o reator estiver aberto (DI7) & o botão abre/fecha for pressionado (DI3))

Quando o sistema opera no modo automático, existem duas malhas de controle importantes para o seu funcionamento, uma malha fechada onde, de acordo com a leitura da célula de carga do nível do reator e com informações do nível do sistema de armazenamento de biomassa, é ligado ou desligado o sistema de alimentação. Sendo que no nível mínimo do reator o sistema é ligado e quando atinge nível máximo o sistema é desativado e o reator é fechado.

A outra malha de controle que é usada para causar certa redundância no sistema de controle e serve como um sistema de proteção para caso os sensores da malha fechada estejam fazendo alguma leitura errada. É uma malha aberta configurada por tempo. Nessa malha assim que o sistema automático é ligado, existe um temporizador responsável por a cada hora dar o comando de carregamento do reator. Existe um temporizador que conta quatro segundos, a partir do momento que a esteira é ligada. Após os quatro segundos, a esteira é desligada, o reator é fechado e a contagem recomeça. Esses tempos foram retirados dos testes feitos para caracterizar o sistema onde se verificou que este é o tempo médio para consumo do nível de biomassa que se deseja controlar e o tempo desejado para recarga dessa mesma quantidade pelo sistema.

Outra situação importante para um sistema SCADA é a programação de alarmes, onde esta passa informações de mudança de estágios para o operador ou situações de perigo que requerem uma atenção de tal. Os alarmes programados no CLP foram:


- Alarme de fio partido, pois o conversor da célula de carga é do padrão 4 a 20 mA;
- Alarme de silo vazio avisa quando o sistema de armazenamento está com baixo nível de biomassa;
- Alarme de reator aberto avisa quando o reator está no estado aberto, pois, é uma situação crítica ao processo.
- Alarme de mudança de estado para o sistema automático.

O programa completo *Ladder* desenvolvido é apresentado no anexo para que possa ser apreciado pelo leitor.


Apesar de o CLP usado apresentar um IHM, com todas as informações do sistema, para fechar o conceito de sistema SCADA, foi criada uma interface gráfica de monitoramento e controle para ser usada pelo computador, como descrito no item 3.3.4.

A tela principal da interface é mostrada na Figura 46, onde é possível monitorar e controlar o sistema. Nessa figura é possível ver também a opção de navegação de tela, onde além da tela principal temos a tela de *Login* do Usuário, usada para dar acesso restrito ao sistema, a tela Gráfico de Tendências é usada por monitorar variáveis ao longo do tempo e armazena-la em gráficos, e a tela de Histórico de Alarmes onde é feito um banco de dados com todos os alarmes que já foram ativos durante o processo. Este é o padrão industrial usado para interfaces de controle e monitoramento.


### Navegação de telas



**UFV DEEA**  
Departamento de Engenharia Agrícola



LOGIN DO USUÁRIO    TELA PRINCIPAL    GRÁFICO DE TENDÊNCIA    HISTÓRICO DE ALARMES



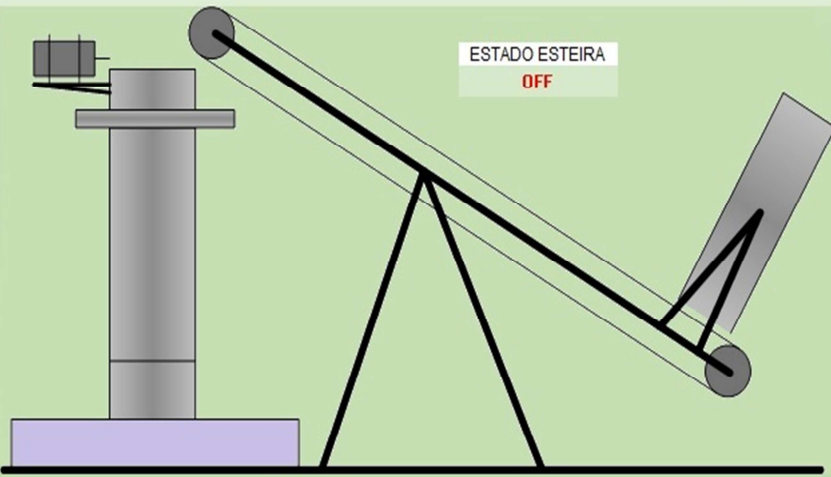
---

Nível do reator  
**0**

## Monitoramento das variáveis do processo

Nível de Biomassa Armazenada  
**0**

PORTA REATOR  
**FECHADA**



ESTADO ESTEIRA  
**OFF**

### Botões de Comando

ATIVA SISTEMA DE CONTROLE AUTOMÁTICO

AUTO-DESLIGADO

ATIVA/DESATIVA ESTEIRA

LIGA ESTEIRA

ABRE/FECHA REATOR

ABRE/FECHA REATOR

ALARMES DO SISTEMA

dd/mm hh:mm:ss Pri ComentárioNomeTag Valor Usuário

## Histórico de Alarmes

Figura 46 - Página Inicial do sistema supervisorio.

#### 4.4. Análise da gaseificação

Para a análise do gás foram feitos dois testes gaseificando-se lenha de eucalipto em forma de discos. Os testes foram realizados nos dias 9 e 11 de dezembro de 2015 no setor de armazenamento da Universidade Federal de Viçosa, sendo que ambos os testes duraram cerca de seis horas, com isso o sistema de alimentação dobrou o tempo de gaseificação ininterrupta do reator.

Primeiramente pode-se observar na Figura 47, o gráfico de tendências obtido com a interface gráfica criada, onde temos a variação do peso dentro do reator. Nessa figura observamos quando o sistema atinge o *setpoint*, e executa o processo de recarga do reator. Depois do tempo decorrido de enchimento vê-se que o reator atinge o peso máximo e, conseqüentemente, o nível máximo de biomassa.

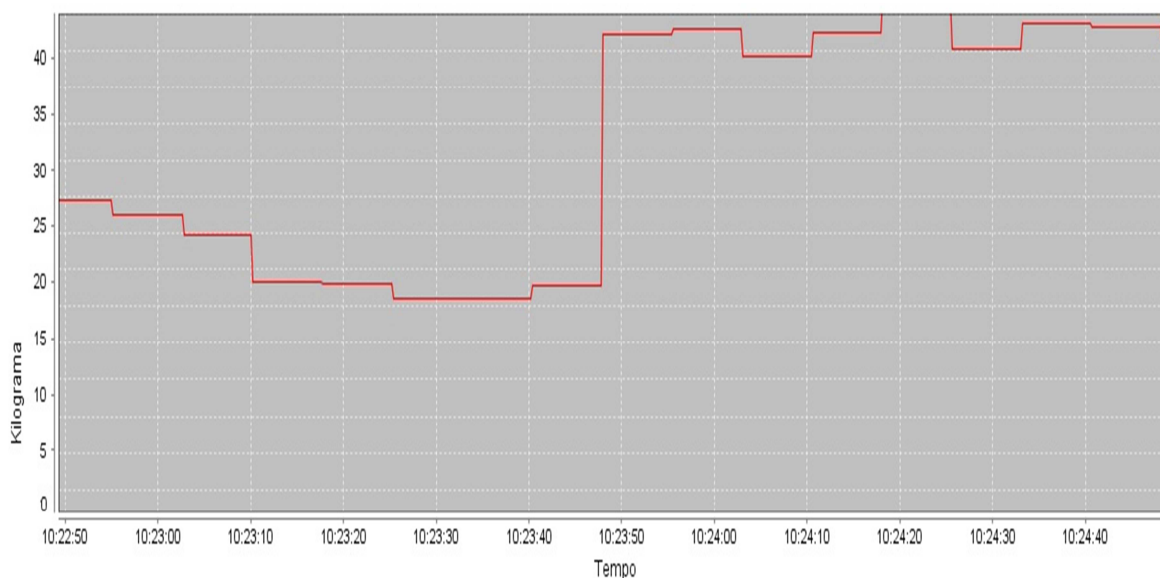


Figura 47 - Gráfico de tendência da massa dentro do reator.

A análise do processo de gaseificação está baseada na análise do gás gerado do rendimento do reator e do perfil de temperatura, principalmente a temperatura da zona de combustão e a zona de gaseificação, para que se possa notar a influência do sistema automático de alimentação no processo de gaseificação. No item 3.4 são apresentados os procedimentos adotados. A Tabela 10 é possível observar os dados referentes à composição elementar do gás e o valor de PCI deste.

Tabela 10 - Valores da análise feita do gás.

<b>PCI (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>H<sub>2</sub> (%)</b>
1,84	0,32	4,38	0,96	8,83
1,77	0,48	4,75	0,88	7,91
3,84	2,08	19,16	2,2	6,96
4,23	2,34	21,44	2,2	6,97
4,26	2,29	21,45	2,2	6,98
3,86	2,34	20,79	1,82	5,99
3,98	2,41	21,15	1,83	6,02
3,97	2,39	21,29	1,83	6,02
3,88	2,43	21,09	1,73	5,69
3,87	2,43	21,18	1,74	5,7
3,91	2,41	21,11	1,77	5,73
3,92	2,41	21,29	1,76	5,74
3,91	2,35	21,07	1,78	5,77
3,54	2,39	19,31	1,51	5,11
3,55	2,33	19,52	1,5	5,14
3,54	2,43	19,56	1,47	5,1
3,54	2,41	19,45	1,45	5,11
3,56	2,27	20,02	1,47	5,11
3,55	2,47	19,28	1,41	5,13
3,55	2,47	19,94	1,39	5,14
3,56	2,42	19,83	1,37	5,14
3,58	2,63	20,15	1,29	5,29
3,57	2,65	20,14	1,21	5,31
3,64	2,76	20,59	1,21	5,59
3,67	2,66	20,9	1,18	5,59
3,37	2,35	21,81	1,23	5,55

Os dados foram colhidos durante todo o tempo de execução dos testes. Na Tabela 11 temos uma análise estatísticas desses dados, para se ter noção da variabilidade das amostras.

Tabela 11 - Análise estatística dos dados coletados do gás.

<b>Análise dos dados</b>	<b>PCI (MJ/Nm<sup>3</sup>)</b>	<b>CO<sub>2</sub> (%)</b>	<b>CO (%)</b>	<b>CH<sub>4</sub> (%)</b>	<b>H<sub>2</sub> (%)</b>
Média	3,59	2,27	19,26	1,55	5,87
Desvio Padrão	0,56	0,56	4,31	0,35	0,92
Coefficiente de Variação	0,16	0,25	0,22	0,22	0,16

Com a análise dos dados é possível verificar que as propriedades do gás apresentam uma uniformidade nas amostras. Com isso, é possível concluir que a gaseificação não sofreu

consequências, durante a recarga do reator com biomassa pelo sistema automático, essa afirmação também pode ser confirmada analisando-se os dados de (BARBOSA, 2015), onde o PCI médio encontrado foi de 3,58 MJ/Nm<sup>3</sup>.

Para calcular a eficiência a frio do reator foi usada a equação 3.6. Para isso, é necessário ter o volume específico total do gás. Neste cálculo é usada a equação 3.7, que utiliza os volumes específicos dos gases componentes do gás gerado. Os volumes específicos dos gases componentes foram retirados de (BARBOSA, 2015), e são vistos na Tabela 12.

Tabela 12 - Volume específico dos gases componentes. Fonte: (BARBOSA, 2015).

<b>Gás</b>	<b>Volume específico (Nm<sup>3</sup>/kg)</b>
CH <sub>4</sub>	0,657
CO <sub>2</sub>	1,799
CO	1,145
H <sub>2</sub>	0,082
N <sub>2</sub>	1,880

Para calcular o volume específico do gás resultante da gaseificação e como não foi mensurada a quantidade de N<sub>2</sub>, este foi adotado como gás responsável pela restante da concentração no gás da gaseificação, adotando-se uma concentração média de N<sub>2</sub> de 71,05% para os cálculos.

Usando-se a equação 3.7, as concentrações médias da Tabela 11, os volumes específicos da Tabela 12 e a concentração estimada de N<sub>2</sub> ou obtêm-se um valor de volume específico do gás gerado no reator de 1,612 Nm<sup>3</sup>/kg. Aplicando a equação 3.6 obtêm-se um valor de eficiência do reator de 32,71 % . Valor abaixo do teórico citado por (CORTEZ, LORA e GOMÉZ, 2008) de 70% e próximo ao encontrado por (BARBOSA, 2015) de 36,37% para o mesmo reator. Isso se deve, principalmente as condições precárias do reator usado, que deve ser refeito com isolamento térmico em torno de sua seção cônica e a alta umidade da biomassa usada.

A Figura 48 mostra os dados de temperatura ambiente, temperatura da zona de gaseificação e da zona de redução do reator durante parte do primeiro teste.

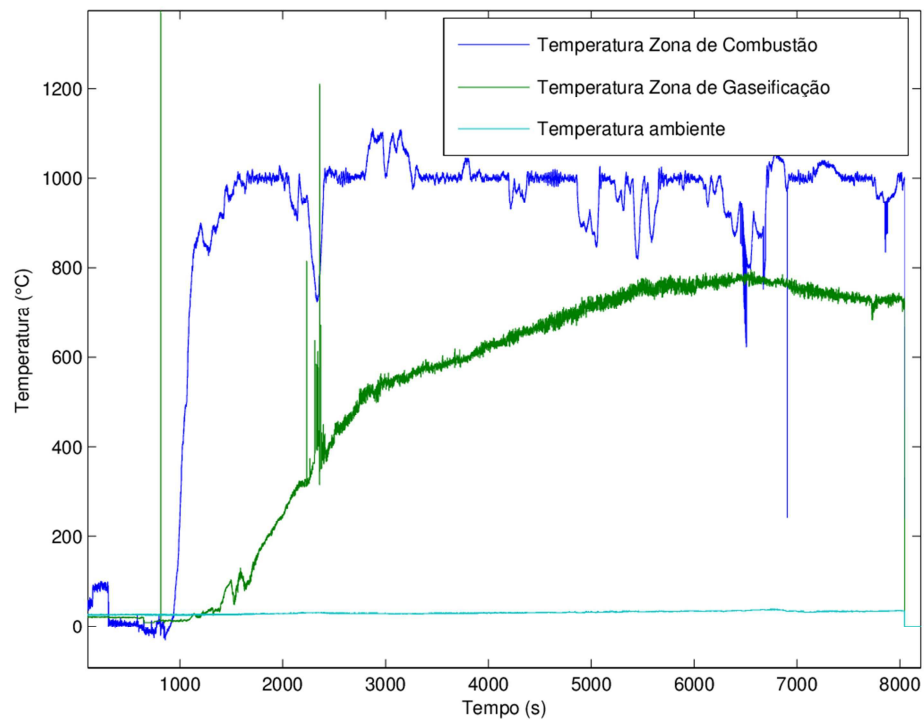


Figura 48 - Temperatura na zona de redução, gaseificação e temperatura ambiente.

Nessa figura, vê-se em azul escuro a temperatura da zona de combustão. Observa-se que o *setpoint* de temperatura usado por (BARBOSA, 2015), não foi alterado significativamente, existe sim alguma variação na temperatura quando o reator era alimentado, porém pode-se notar que a reação termoquímica da gaseificação não é prejudicada substancialmente. A temperatura na zona de gaseificação em verde não sofre nenhuma influencia como pode ser visto, seguindo o mesmo perfil de temperatura de trabalhos que usaram o mesmo reator.

## 5. CONCLUSÕES

O sistema de alimentação automático de biomassa para o reator de gaseificação funciona adequadamente, controlando a recarga de biomassa do gaseificador de forma eficiente e não influencia negativamente na produção de gás combustível, tornando o reator aplicável em situações de geração de energia térmica e elétrica.

O sistema mecânico de movimentação e armazenamento da biomassa funcionou de acordo com as especificações de projetos estabelecidas. Os problemas encontrados se deram principalmente ao fato do protótipo ter sido construído por profissionais sem experiência na área de máquinas agrícolas, sendo estes, principalmente na vedação do reator e em algumas partes mecânicas.

O sistema de controle lógico e os sensores de medição de nível funcionaram com precisão e de acordo com as condições programadas, apresentando uma boa resposta com a curva de calibração desenvolvida.

A interface homem máquina feita no computador serviu como um facilitador para a aplicação deste sistema, tornando-o de fácil manuseio e controle. Com a IHM, qualquer pessoa com um mínimo de conhecimento em computadores consegue operar o sistema como um todo.

Conclui-se então, que o sistema automático de alimentação de biomassa atingiu seu objetivo de deixar o reator autônomo, dobrando sua capacidade de carga, proporcionando uma alimentação contínua de biomassa. Sendo assim, a gaseificação não é interrompida por falta de combustível. Outro fato importante é a preservação da integridade física do operador, tanto pelo fato da exposição à alta temperatura quanto pela inalação de gás tóxico de possíveis vazamentos no reator.

Como indicação de trabalhos futuros, seria importante a unificação dos sistemas automáticos desenvolvidos, tanto para o agente oxidante e de biomassa em um único controlador. Tornando-o um produto final e pronto para uso.

## REFERÊNCIAS

- AGILENT TECHNOLOGIES. **Resolvendo Problemas em Aplicações de Célula de Carga com a Solução de Conectividade Sem Fio da Agilent.** [S.l.]. 2012.
- ALVES, J. L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos.** Rio de Janeiro: LTC, 2005. ISBN 978-85-216-1442-5.
- BARBOSA, R. C. **Modelagem dinâmica e desenvolvimento de um controlador para automação de um gaseificador de biomassa.** Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, MG, p. 87. 2015.
- BORBA, M. C. V.; GASPAR, N. F. **Um futuro com energia sustentável: iluminando o caminho.** Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo: [São Paulo] : FAPESP ; [Amsterdam] : InterAcademy Council ; [Rio de Janeiro] : Academia Brasileira de Ciências;, p. 300. 2010. (978-90-6984-531-9).
- CAMPOS, M. C. M. M. D. **Controles Típicos de equipamentos e processos industriais.** 2. ed. São Paulo: Blucher, 2010. ISBN 978-85-212-0552-4.
- CARDOSO, M. T. **Da iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas: história técnica e econômica da gaseificação.** São Paulo, p. 125. 2013.
- CHAVES, L. I. **Microgeração de energia elétrica com gás de síntese de um gaseificador concorrente utilizando Mazilaurus Itaúba.** UNIOESTE. Cascavel, PR, p. 58. 2012.
- CORTEZ, L. A. B.; GOMEZ, E. O.; LORA, E. E. S. **Biomassa para Energia.** 1. ed. Campinas: UNICAMP, 2008.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMÉZ, E. O. **Gaseificação.** In: \_\_\_\_\_ **Biomassa para Energia.** Campinas, SP: Unicamp, 2008. p. 241-327.
- EPE. **Balanço Energético Nacional 2015 – Ano base 2014: Relatório Síntese.** Rio de Janeiro. 2015.
- FÁBRICA DE AÇO PAULISTA S.A. **Manual de Transporte de Correias - FAÇO.** São Paulo.
- FIGUEIREDO, F. L. **Avaliação de uma unidade autônoma de produção de energia elétrica composta por sistema de gaseificação concorrente e grupo gerador com capacidade de 50 kVA.** Universidade Estadual de Londrina. Londrina, p. 141. 2012.
- FUGITA, M. **Integração das funções de supervisor e gerenciamento de rede via SNMP.** Itajubá. 2010.
- 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>>.

INTERACADEMY COUNCIL. **Lighting the way: Toward a sustainable energy future**, Amsterdam, 2007. Disponível em: <<http://www.interacademycouncil.net/File.aspx?id=24548>>. Acesso em: 6 maio 2015.

KAUPP, A.; GOSS, J. . R. **State of the art report for small scale (to 50 kw) gas producer**, 1981. Disponível em: <[http://pdf.usaid.gov/pdf\\_docs/PNAAK705.pdf](http://pdf.usaid.gov/pdf_docs/PNAAK705.pdf)>. Acesso em: 01 out. 2015.

LOPES, M. A. M. **A importância dos sistemas supervisórios no controle de processos industriais**. Ouro Preto. 2009.

LORA, E. E. S. et al. **Gaseificação E Pirólise Para Conversão da Biomassa em Eletricidade e Biocombustíveis**. In: \_\_\_\_\_ **Biocombustíveis**. Itajubá: UNIFEI, 2013. p. 88. Disponível em: <[http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/downloads\\_pt.html](http://www.nest.unifei.edu.br/portugues/pags/downloads/downloads_pt.html)>. Acesso em: 30 Março 2014.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ARADAS, M. E. C. **Geração de energia elétrica em pequena escala a partir da gaseificação de biomassa**. Itajubá-MG.

MARTIN, S. **Gaseificador de biomassa para aquecimento de ar para a secagem de produtos agrícolas**. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, p. 105. 2005.

MARTINS, G. M. **Apostila de princípios de Automação Industrial**. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, p. 154. 2012.

MARTINS, J. H. **Instrumentação de Processos Agrícolas utilizando a Tecnologia 1-Wire™ e Dispositivos Digitais Endereçáveis**. Viçosa.

PAREDE, I. M.; GOMES, L. E. L. **Eletrônica: Automação Industrial**. Centro Paula Souza. São Paulo, p. 277. 2011. (978-85-8028-050-0). (Coleção Técnica Interativa. Série Eletrônica, v. 6).

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>>.

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.

RHAMAN, 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*, 2014. 108-119.

RIBEIRO, V. S. et al. **Propriedades Físicas de produtos agrícolas**. Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.4, n.1, v. v.4, n. n.1, p. p 1-6, 2002.

SALES, C. A. V. B. D.; ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa. Biomassa & Energia, v. 2, p. 195-204, 2005.

SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da Gaseificação de Biomassa**. Campinas, SP: Átomo, 2010.

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

SILVA, J. D. S. E. et al. **Manuseio de grãos**. In: SILVA, J. D. S. Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2008. p. 312-314. Disponível em: <ftp://ftp.ufv.br/Inetpub/ftproot/Dea/Disciplinas/juarez/Secagem%20e%20Armazenagem%20Livro%20eletr%F4nico%20demonstra%E7%E3o/Cap%EDtulo%2012.pdf>. Acesso em: 20 agosto 2015. Capítulo 12 - Manuseio de Grãos.

SILVEIRA, P. R. D.; SANTOS, W. E. D. **Automação e controle discreto**. São Paulo: Érica, 1998. (Coleção Estude e Use. Série Automação Industrial).

SOISSON, H. E. **Instrumentação Industrial**. Curitiba: Hemus, 2002.

SOUZA, S. N. M. D. et al. **Potencial de geração de eletricidade com gaseificação do bagaço e resíduos da colheita de cana de açúcar no estado do Paraná**. Acta Iguazu, Cascavel, v. 2, n. 3, p. 1-7, 2013. ISSN 2316-4093. Disponível em: <e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/download/8559/6312>. Acesso em: 6 maio 2015.

SUZUKI, M. A.; HERNANDEZ, F. B. T. **Hidráulica e Irrigação** - UNESP - Ilha Solteira. UNESP. Disponível em: <http://www.agr.feis.unesp.br/curso2.htm>. Acesso em: 01 junho 2015.

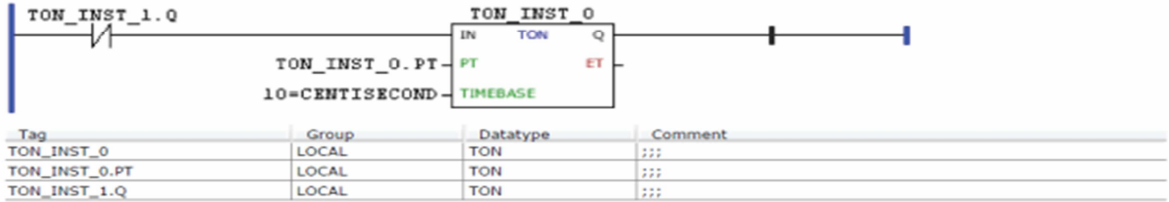
WEG. **Controlador lógico programável PLC300**. [S.l.]. 2011.

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.

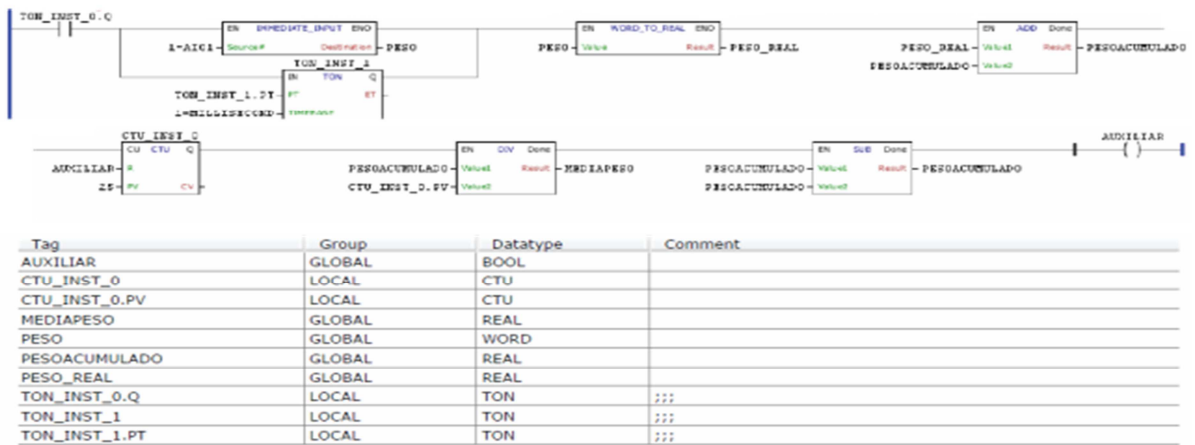
## ANEXO

No anexo é apresentado o programa *Ladder* desenvolvido no CLP.

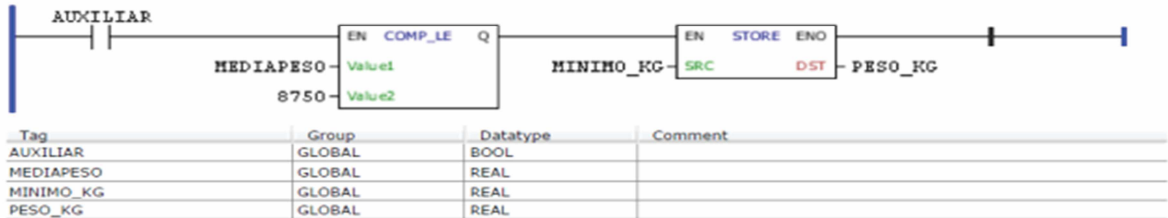
1: Temporizador que define tempo para aquisição do peso



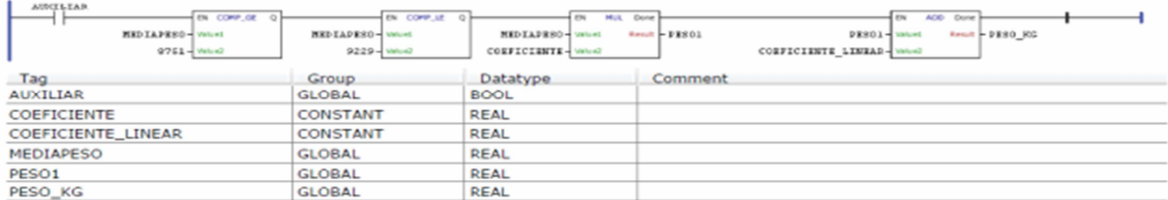
2: Aquisição da variável peso e cálculo da média



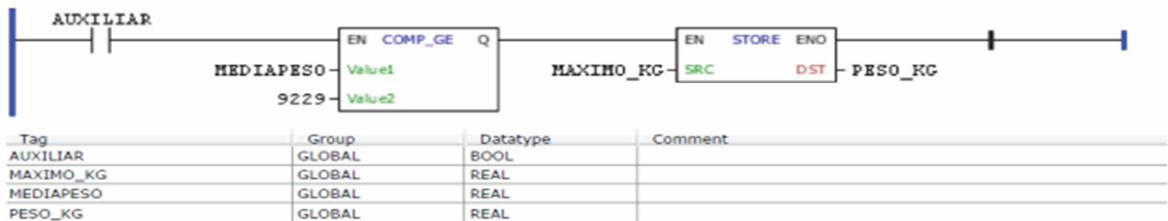
3: Cálcula valor peso em Kg para <=0



4: Cálcula o valor de Kg para media >= 0



5: Cálcula valor para não passar do valor máximo do reator em Kg



6: Comparação do valor referente ao nível mínimo do reator



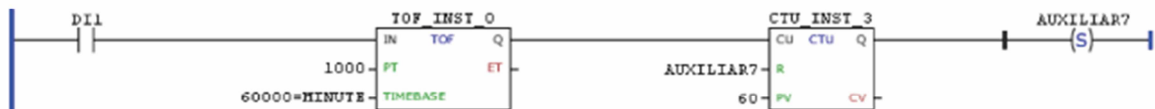
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR2	GLOBAL	BOOL	
CTU_INST_2	LOCAL	CTU	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
MEDIAPESO	GLOBAL	REAL	
SETPESO	GLOBAL	REAL	

7: Comparação do valor referente ao nível máximo do reator



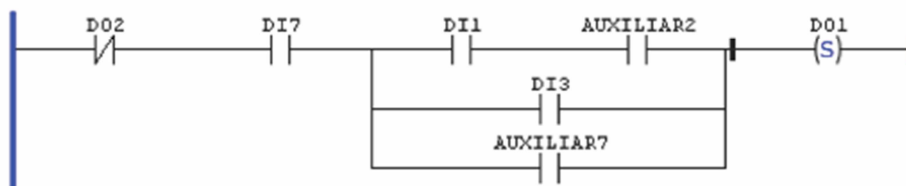
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR3	GLOBAL	BOOL	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
MEDIAPESO	GLOBAL	REAL	
SETMAX	GLOBAL	REAL	

8: Malha aberta do sistema de recarga



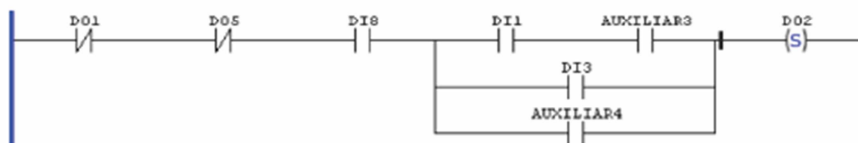
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR7	GLOBAL	BOOL	
CTU_INST_3	LOCAL	CTU	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
TOF_INST_0	LOCAL	TOF	

9: ABRE o Gaseificador



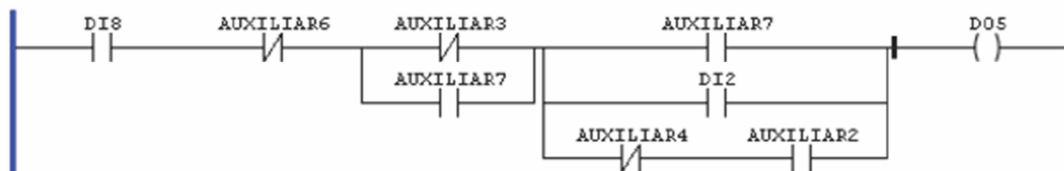
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR2	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR7	GLOBAL	BOOL	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
DI3	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 3
DI7	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 7
DO1	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 1
DO2	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 2

10: FECHA o Gaseificador



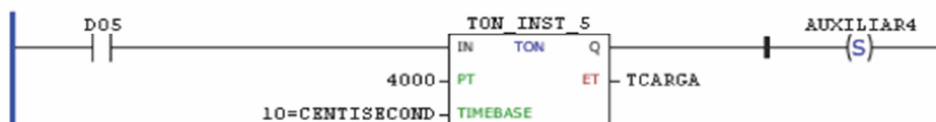
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR3	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR4	GLOBAL	BOOL	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
DI3	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 3
DI8	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 8
DO1	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 1
DO2	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 2
DO5	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 5

#### 11: Aciona ESTEIRA TRANSPORTADORA



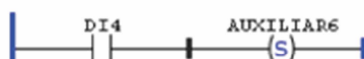
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR2	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR3	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR4	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR6	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR7	GLOBAL	BOOL	
DI2	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 2
DI8	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 8
DO5	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 5

#### 12: Contagem do tempo de carga- esteira ligada



Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR4	GLOBAL	BOOL	
DO5	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 5
TCARGA	GLOBAL	WORD	
TON_INST_5	LOCAL	TON	

#### 13: Botão que para todos os dispositivos



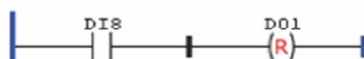
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR6	GLOBAL	BOOL	
DI4	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 4

#### 14: Sinalização de nível baixo



Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR5	GLOBAL	BOOL	
DI10	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 10
DI9	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 9

#### 15: Desliga a abertura do gaseificador



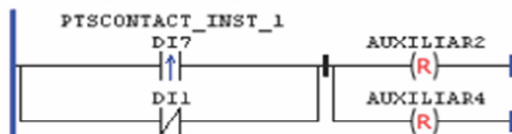
Tag	Group	Datatype	Comment
DI8	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 8
DO1	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 1

16: Desliga o fechamento do gaseificador



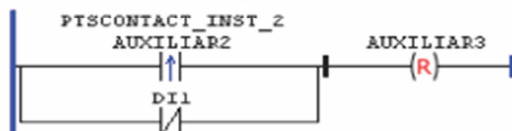
Tag	Group	Datatype	Comment
DI7	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 7
DO2	GLOBAL_IO	BOOL	Saída digital 2

17: Reset das variáveis auxiliares



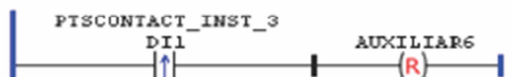
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR2	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR4	GLOBAL	BOOL	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
DI7	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 7
PTSCONTACT_INST_1	LOCAL	PTSCONTACT	

18: Reset nivel alto



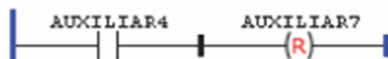
Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR2	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR3	GLOBAL	BOOL	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
PTSCONTACT_INST_2	LOCAL	PTSCONTACT	

19:



Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR6	GLOBAL	BOOL	
DI1	GLOBAL_IO	BOOL	Entrada digital 1
PTSCONTACT_INST_3	LOCAL	PTSCONTACT	

20:



Tag	Group	Datatype	Comment
AUXILIAR4	GLOBAL	BOOL	
AUXILIAR7	GLOBAL	BOOL	