

UNIVERSIDADE DO ESTADO DE SANTA CATARINA – UDESC
CENTRO DE CIÊNCIAS AGROVETERINÁRIAS – CAV
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL – PPGEF

THIAGO HENRIQUE MOMBACH

**SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA INDICAÇÃO DO NÍVEL DE BIOMASSA EM
GASEIFICADOR DO TIPO CONTRACORRENTE**

LAGES

2022

THIAGO HENRIQUE MOMBACH

**SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA INDICAÇÃO DO NÍVEL DE BIOMASSA EM
GASEIFICADOR DO TIPO CONTRACORRENTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Florestal pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Prof^a. Dr^a Martha Andreia Brand.

Co-orientador: Prof^o Dr^o Matheus Fontanelle Pereira

LAGES

2022

THIAGO HENRIQUE MOMBACH

**SISTEMA DE MEDIÇÃO PARA INDICAÇÃO DO NÍVEL DE BIOMASSA EM
GASEIFICADOR DO TIPO CONTRACORRENTE**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia Florestal pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, da Universidade do Estado de Santa Catarina – Udesc.

Orientador: Prof. Dr^a Martha Andreia Brand.

Co-orientador: Prof^o Dr^o Matheus Fontanelle Pereira

BANCA EXAMINADORA

Prof^a Dr^a Martha Andreia Brand
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membros:

Prof^o Dr^o Jeferson Fraytag
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof^o Dr^o Marco Aurelio Woehl
Instituto Federal de Santa Catarina

Lages, 30 de maio de 2022

**Ficha catalográfica elaborada pelo programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UEDESC,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)**

Mombach, Thiago Henrique
Sistema de Medição para Indicação do Nível de Biomassa em
Gaseificador do tipo Contracorrente / Thiago Henrique Mombach. --
2022.
81 p.

Orientadora: Martha Andreia Brand
Coorientador: Matheus Fontanelle Pereira
Dissertação (mestrado) -- Universidade do Estado de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2022.

1. biomassa. 2. instrumentação. 3. gaseificador de biomassa. 4.
sensores. I. Brand, Martha Andreia. II. Pereira, Matheus Fontanelle .
III. Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências
Agroveterinárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Florestal. IV. Título.

Dedico este trabalho a minha mãe, Marlene Klock pelo incentivo e apoio durante toda minha vida para nunca parar de estudar e me qualificar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha professora e orientadora Dr^a Martha Andreia Brand por ter aceitado orientar este trabalho, pelo apoio e pelos ensinamentos repassados.

Agradeço ao meu co-orientador Prof^o Dr^o Matheus Fontanelle Pereira por todo o apoio durante esta etapa.

Aos colegas de trabalho, Ariton e Marlon pelo apoio técnica na área de fabricação mecânica.

RESUMO

A geração de energia por meio de um gaseificador de biomassa é um processo crítico e complexo. São inúmeros fatores que interferem na geração de energia, como por exemplo a quantidade de ar que ingressa no sistema, a quantidade de biomassa dentro do reator, as perdas de temperatura no processo, entre outros. Para manter estável a produção de gases em um gaseificador de biomassa, é necessário conhecer a proporção entre a biomassa e o ar que está sendo inserido dentro do reator do gaseificador e manter essa proporção constante. Assim, o objetivo deste projeto foi projetar um sistema de medição que possa ser aplicado para determinar a quantidade de biomassa existente no leito de um reator de um gaseificador de biomassa, a fim de manter a produção dos gases do gaseificador com eficiência máxima. Para tanto, foi utilizado um modelo de um protótipo de um gaseificador piloto do tipo contracorrente, no qual foi acoplado um conjunto de sensores para medir a quantidade de biomassa acumulada no interior do reator. Foi realizada uma pesquisa bibliográfica e de mercado para determinar o sensor que melhor se adapta as condições de funcionamento do protótipo de gaseificador de biomassa. O sensor capacitivo, instalado de modo invasivo, se mostrou a melhor opção para realizar a medição em função de suportar altas temperaturas e ser de fácil construção. Os sensores foram conectados a um sistema de aquisição de dados que transformou os sinais elétricos provenientes dos sensores em dados numéricos, mostrando o nível de biomassa acumulada em um display.

Palavras chaves: biomassa, instrumentação, gaseificador de biomassa, sensores.

ABSTRACT

The generation of energy through a biomass gasifier is a critical and complex process. There are numerous factors that interfere with energy generation, such as the amount of air that enters the system, the amount of biomass inside the reactor, temperature losses in the process, among others. To keep the production of gases in a biomass gasifier stable, it is necessary to know the proportion between the biomass and the air being introduced into the reactor of the gasifier and keep this proportion constant. Thus, the objective of this project was to design a measurement system that can be applied to determine the amount of biomass existing in the bed of a reactor of a biomass gasifier, in order to maintain the production of gasifier gases with maximum efficiency. For this purpose, a model of a prototype of a pilot countercurrent gasifier was used, in which a set of sensors was attached to measure the amount of biomass accumulated inside the reactor. A bibliographic and market research was carried out to determine the sensor that best adapts to the operating conditions of the biomass gasifier prototype. The capacitive sensor, installed in an invasive way, proved to be the best option to carry out the measurement due to the fact that it withstands high temperatures and is easy to build. The sensors were connected to a data acquisition system that transformed the electrical signals from the sensors into numerical data, showing the level of accumulated biomass on a display.

Keywords: biomass, instrumentation, biomass gasifier, sensors.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Matriz elétrica brasileira de 2020.....	18
Figura 2: Pellets de madeira	21
Figura 3: Gaseificador de leito fixo tipo contracorrente.....	23
Figura 4: Gaseificador de leito fixo do tipo concorrente.....	24
Figura 5: Gaseificador de leito fixo do tipo cruzado	24
Figura 6: Medição analógica	25
Figura 7: Conversão de sinais.....	26
Figura 8: Instrumentos de medidas analógicos e digitais.....	27
Figura 9: Medição com alta precisão.....	28
Figura 10: Chave de nível pá rotativa.....	29
Figura 11: Capacitor de placas paralelas	30
Figura 12: Medidor de nível capacitivo.....	31
Figura 13: Medição de nível com célula de carga	32
Figura 14: Medidor de nível ultrassônico.....	32
Figura 15: Medidor de nível do tipo radar.....	33
Figura 16: Medidor de nível por radiação	34
Figura 17: Plataforma mydaq	35
Figura 18: Janelas do labview	36
Figura 19: Esquema do protótipo de gaseificador de biomassa	38
Figura 20: Protótipo de gaseificador de biomassa em teste.....	39
Figura 21: Modelo de reator de aço com sensores instalados	41
Figura 22: Sensores capacitivos	42
Figura 23: Sistema de medição para teste dos sensores capacitivos	43
Figura 24: Teste dos sensores capacitivos em temperatura ambiente	43
Figura 25: Resposta do sensor capacitivo	44
Figura 26: Teste com dois sensores capacitivos.....	45
Figura 27: Diagrama de blocos.....	46
Figura 28: Painel frontal.....	48
Figura 29: Painel frontal indicando a presença de biomassa.....	49
Figura 30: Teste das placas b no modelo de reator.....	51
Figura 31: Elemento sensor capacitivo.....	52
Figura 32: Possíveis arranjos para instalação dos elementos sensores.....	53

Figura 33: Esquema do circuito eletrônico.....	55
Figura 34: Representação das impedâncias do circuito eletrônico.....	58
Figura 35: Circuito eletrônico de detecção.....	59
Figura 36: Diagrama de programação	61
Figura 37: Tela do software.....	61
Figura 38: Esquemático do sistema de medição de nível.....	63
Figura 39: Teste do sistema completo em temperatura ambiente (23 °C)	63
Figura 40: Sensores de temperatura instalados no modelo de reator	66
Figura 41: Teste dos elementos sensores capacitivos em alta temperatura.....	67
Figura 42: Biomassa posicionada em frente a placa inferior	68
Figura 43: Biomassa posicionada em frente as duas placas dos elementos sensores.....	69
Figura 44: Medição de capacitância em temperaturas elevadas.....	70
Figura 45: Regressão linear para capacitância sem a presença de biomassa.....	71
Figura 46: Extrapolação da capacitância para temperaturas entre 500 e 1100 °C	74

LISTA DE TABELA

Tabela 1: Classificação de gaseificadores de biomassa quanto ao poder calorífico	22
Tabela 2: Capacitância para os arranjos a e b.....	53
Tabela 3: Valor das reatâncias elétricas	57
Tabela 4: Valores de comparação para teste em temperatura ambiente (23 °C).....	65
Tabela 5: Tabela de dados para regressão linear	71
Tabela 6: Análise de variância quando não há detecção de biomassa.....	72
Tabela 7: Análise de variância para o caso em que o sensor inferior está detectando biomassa	73
Tabela 8: Análise de variância para o caso em que os dois elementos sensores estão detectando biomassa	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D – Analógico para digital

D/A – Digital para analógico

GPCEBio - Grupo de Pesquisa em Conservação e Exploração Racional de Bioenergia

DAQ – Sistema de aquisição de dados

IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina

ANOVA – Análise de Variância

LISTA DE SÍMBOLOS

C – Capacitância elétrica em farad

V – Tensão elétrica em volt

X_C – Reatância elétrica em ohm

R – Resistência elétrica em ohm

Z – Impedância Elétrica em ohm

R^2 – coeficiente de determinação

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	15
2.	OBJETIVOS	17
2.1	OBJETIVO GERAL.....	17
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOMASSA.....	18
3.2	GASEIFICADORES DE BIOMASSA	21
3.3	SENSORES INDUSTRIAIS	25
3.4	INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E SEUS PARÂMETROS.....	26
3.5	Medição de nível.....	28
3.6	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ).....	34
3.6.1	Placa de aquisição de dados	35
4.	DESENVOLVIMENTO.....	37
4.1	PROTÓTIPO DO GASEIFICADOR DE BIOMASSA	37
4.2	SELEÇÃO DO SENSOR DE NÍVEL.....	38
4.3	TESTES DOS SENSORES CAPACITIVOS INDUSTRIAIS.....	40
4.4	SOFTWARE DE MEDIÇÃO PARA O TESTE DOS SENSORES.....	46
4.5	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO NO MODELO DE REATOR DE GASEIFICADOR DE BIOMASSA	49
4.5.1	Projeto e construção do elemento sensor capacitivo	50
4.5.2	Disposição dos elementos sensores	52
4.5.3	Projeto do circuito eletrônico de medição de variação de capacitância	54
4.6	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	59
4.7	TESTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO	62
4.7.1	Teste em temperatura ambiente.....	63
4.7.2	Teste em temperatura elevada.....	65

4.7.2.1	Extrapolação para temperaturas de até 1100 °C	70
5	CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
6	ESTUDOS FUTUROS.....	78
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	79

1. INTRODUÇÃO

O uso de biomassa para geração de energia elétrica no Brasil vem aumentando a cada ano. Em 2020, o uso deste tipo de combustível para geração de energia elétrica correspondeu a 37,4% da geração termelétrica e a 9,1 % da geração elétrica total (EPE, 2021). Além da geração de energia elétrica, esse tipo de combustível tem sido utilizado em usinas de cogeração, que produzem simultaneamente energia elétrica e energia térmica.

Além da co-geração em termelétrica (Ciclo Rankine), outra forma de gerar energia elétrica através da biomassa é o processo de gaseificação. A gaseificação consiste na decomposição de combustível sólido, como a biomassa, a fim de produzir gases com qualidade energética que podem ser usados como fonte de energia térmica e elétrica (SÁNCHEZ, 2010). Neste processo é utilizado um equipamento denominado gaseificador, sendo um dispositivo que utiliza como combustível a biomassa proveniente de resíduos vegetais ou animais (ROSILLO-CALLE, BAJAY e ROTHMAN, 2005). Os gases gerados no processo podem ser usados para movimentar uma turbina conectada a um gerador de energia elétrica.

O gaseificador de biomassa pode ser utilizado em indústrias que produzem resíduos orgânicos que possuem difícil destinação, como empresas de estocagem de grãos e do ramo florestal. Ao invés de descartar os resíduos, essas indústrias podem transformá-los em energia térmica e elétrica que podem ser utilizadas pela própria unidade fabril, podendo também a energia elétrica ser repassada as distribuidoras de energia elétrica da região. De qualquer forma, as empresas reduziriam seu custo com energia elétrica das suas fábricas e diminuiriam o descarte de resíduos.

A geração de energia por meio de um gaseificador de biomassa é um processo crítico e complexo. São inúmeros fatores que interferem na geração de energia, como por exemplo a quantidade de agente gaseificador que ingressa no sistema, a quantidade e as características da biomassa dentro do reator, as perdas de temperatura no processo e o tempo de residência da biomassa (LORA et al, 2012).

Para manter estável a produção de gases em um gaseificador de biomassa, é necessário conhecer a proporção entre a biomassa e o ar que estão sendo inseridos dentro do reator do gaseificador e manter essa proporção constante. Como a gaseificação da biomassa não ocorre instantaneamente, pode ocorrer o acúmulo de biomassa no leito do reator e a produção dos gases na saída pode sofrer uma variação indesejada. Portanto, é de grande valia conhecer a quantidade de biomassa no leito do reator, a fim de determinar a quantidade de ar e biomassa que devem ser inseridos e manter a produção de gases constante.

No projeto de pesquisa “Protótipo de um Microgerador à Biomassa”, coordenado pelo professor Matheus Fontanelle Pereira, ainda não foi possível determinar a quantidade de biomassa dentro do reator (PEREIRA et al, 2019). Desta forma, este trabalho visa incrementar o trabalho citado a fim de possibilitar a manutenção da saída de gases do gaseificador constante por meio da medição da biomassa no leito do reator.

Como não há como visualizar as biomassas dentro do reator, devido à alta temperatura (em torno de 800 °C, chegando a 1100 °C) e o reator ser de aço, é necessário projetar um meio para saber a quantidade de biomassa existente no leito do reator do protótipo, visto que a biomassa não é gaseificada instantaneamente, quando entra no reator, e com isso vai se acumulando até ser gaseificada totalmente.

Se a quantidade de biomassa dentro do reator for conhecida, é possível controlar a entrada de biomassa e ar dentro do reator e manter a geração de gases constante. Dessa forma, é possível gerar o máximo de energia elétrica e térmica, diminuindo as perdas e garantindo uma eficiência maior do gaseificador.

Uma forma de determinar a quantidade de biomassa no leito do reator é utilizar um sensor eletrônico, ou um conjunto deles, para fazer a medição da biomassa. Esse sensor deve ser resistente as altas temperaturas de funcionamento do gaseificador e sua medição não deve ser afetada pela parede metálica do reator e seu isolamento térmico, existente no lado externo.

Considerando que é necessário determinar o sensor que apresente um comportamento mais linear possível e que não esteja sujeito aos efeitos térmicos existentes durante o funcionamento do gaseificador, as hipóteses desta dissertação foram:

- H_0 (Hipótese de pesquisa): o sensor capacitivo é o sensor mais adequado para realizar a medição da quantidade de biomassa no leito do reator.
- H_a (Hipótese alternativa): o sensor de microondas é o sensor mais adequado para realizar a medição da quantidade de biomassa no leito do reator.
- H_a (Hipótese alternativa): Outro tipo de sensor apresenta melhores resultados.

Desta forma, a questão de pesquisa que se coloca é: Qual tipo de sensor deve ser utilizado para realizar a medição da biomassa no leito do reator a fim de manter a produção de gases do gaseificador de biomassa constante?

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Projetar um sistema de medição que possa ser aplicado para a medição da altura da coluna de biomassa dentro do reator de um protótipo de gaseificador de biomassa a fim de otimizar a produção dos gases resultantes.

2.2 Objetivos Específicos

- ✓ Definir o sensor industrial mais adequado para a medição da quantidade de biomassa.
- ✓ Projetar a instalação do sensor ou do conjunto deles no reator a fim de minimizar os erros de leitura e os efeitos da temperatura.
- ✓ Utilizar um dispositivo de aquisição de dados para receber o sinal dos sensores e tratar o sinal de forma a transformar a resposta do sensor em um dado visível e disponível em microcomputador.

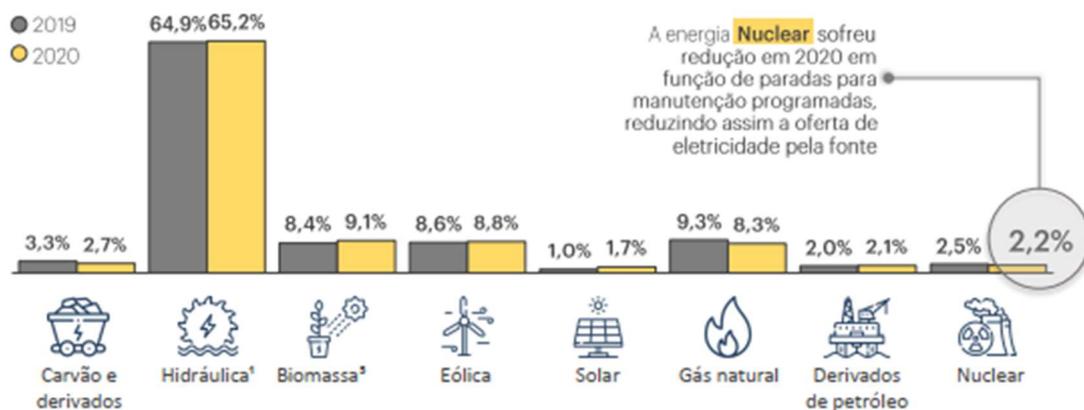
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM BIOMASSA

Conforme Brand (2010), a biomassa é uma fonte de bioenergia primária, renovável e que pode ser utilizada para a geração de energia elétrica. As biomassas podem ser desde resíduos de agroindústrias e cidades, até resíduos florestais, como galhos e folhas. Para a geração de energia elétrica no Brasil, utiliza-se principalmente a biomassa de cana, como bagaço e palha, lenha na forma de cavacos, gases de auto-forno a carvão vegetal e a lixívia ou licor negro, efluente na produção de pasta de celulose (EPE, 2018).

O uso de biomassa para geração de energia elétrica no Brasil vem aumentando nos últimos anos. Em 2020, houve um acréscimo de 6,9 % em relação ao ano anterior, na quantidade de energia elétrica gerada através da queima de biomassa, totalizando 56.167 GWh (EPE, 2021). Na Figura 1, é representada a Matriz Elétrica Brasileira do ano de 2020. Pode-se observar que as biomassas correspondem a 9,1% do total da matriz nacional, ficando atrás somente da fonte hidráulica (EPE, 2021).

Figura 1: Matriz Elétrica Brasileira de 2020.



Fonte: Adaptado de EPE (2021)

Há vários processos que utilizam a biomassa para a produção de vapor e geração de energia elétrica. O tipo e o estado da matéria da biomassa determinam a tecnologia adequada para a transformação de energia. O Atlas de Energia Elétrica do Brasil cita a combustão direta, os processos termoquímicos e os processos biológicos como as principais tecnologias empregadas atualmente para a transformação da biomassa em energia elétrica (BRASIL, 2002).

A combustão direta consiste na queima de biomassa sólida em fornos ou caldeiras e normalmente é um processo ineficiente devido à baixa densidade energética do combustível (BRASIL, 2002). Este tipo de tecnologia é muito utilizado em regiões em que a produção de determinado insumo é sazonal e os resíduos da produção (biomassa) são queimados para produção de vapor e posteriormente geração de energia elétrica (EPE, 2018). Desta forma, além de gerar energia elétrica e energia térmica, o produtor está agregando valor ao seu produto pois os resíduos seriam descartados caso não fossem utilizados para geração de energia. Como exemplos da utilização da combustão direta temos as usinas termelétricas que utilizam a casca do arroz e o bagaço de cana de açúcar como combustível para suas caldeiras.

Um dos principais processos termoquímicos utilizados é a gaseificação. Essa tecnologia consiste em transformar a biomassa em uma mistura gasosa que pode ser utilizada em diversas aplicações, como, por exemplo, em turbinas a gás e motores de combustão (EPE, 2018). Apesar de ser uma tecnologia não muito recente, a gaseificação ainda é pouco utilizada se comparada à combustão direta. Porém, Ruiz et al. (2013) afirmam que a gaseificação apresenta vantagens que possibilitam o aumento da utilização dessa tecnologia, em comparação com a combustão direta. Como exemplo das vantagens têm-se a maior eficiência energética e a menor emissão de CO₂ para a atmosfera.

Ao comparar gaseificação com combustão direta para geração de eletricidade em pequena escala, Lora et al. (2004) indicam que a gaseificação possui a vantagem de não precisar de um ciclo de vapor para gerar eletricidade, pois o gás produzido pode ser aplicado diretamente em um motor de combustão interna.

Lora et al. (2012) relatam que a gaseificação ocorre através da oxidação parcial em temperaturas entre 800 e 1100°C e com pressão atmosférica ou superior, nesse último caso o sistema de gaseificação é pressurizado. Para realizar a gaseificação, é necessário um agente gaseificador, normalmente ar, vapor de água ou oxigênio. Esse agente gaseificador é misturado com a biomassa e é aquecido a altas temperaturas para que ocorra a pirólise e posteriormente a gaseificação.

Há diversas variáveis que são importantes no processo de gaseificação (LORA et al, 2012):

- Fator de ar – esse fator é utilizado quando o ar é utilizado como agente gaseificador e indica a relação ar-combustível real dentro do reator dividido pela relação ar-combustível teórica ou estequiométrica. Desta forma, o fator de ar representa a relação entre a biomassa queimada no processo e a biomassa que foi gaseificada. Lora et al

(2012) consideram que esse fator é uma das variáveis mais importantes do processo de gaseificador.

- Agente gaseificador – o agente gaseificador irá influenciar no poder calorífico do gás produzido, na eficiência do processo de gaseificação e na composição do gás de síntese. Lora et al (2012) chamam o gás produzido com a gaseificação da mistura de biomassa e ar como gás pobre por possuir um poder calorífico inferior entre 3 e 6 MJ/Nm³. Os autores indicam que a substituição do ar pelo oxigênio puro como agente gaseificador pode elevar o poder calorífico inferior para a faixa de 10 a 19 MJ/Nm³, porém o custo para a produção do gás de síntese aumenta.
- Tempo de residência – esse fator determina o tempo em que a biomassa fica depositada dentro do reator do gaseificador até ser transformada por completo. É dependente do tipo de alimentação do gaseificador e da forma física do mesmo.
- Características da biomassa – as características físico-químicas e energéticas da biomassa também influenciam no processo de gaseificação. A umidade da biomassa, por exemplo, afeta diretamente no tempo de residência da mesma dentro do reator.
- Temperatura – Lora et al (2012) relatam que a temperatura deve estar condicionada pela quantidade de agente gaseificador e biomassa que participam da reação. Uma temperatura fora da faixa ideal acarreta em perdas de energia no sistema pois o processo de gaseificação não ocorre da forma correta.

A eficiência do processo de gaseificação é determinada através da comparação entre a energia química do gás produzido e a energia química da biomassa utilizada como combustível (LORA et al, 2012). Porém todos os fatores citados acima influenciam diretamente na eficiência do processo e devem ser considerados.

Ahmad et al. (2016) e Kirubakaran et al. (2009) relatam que outra característica que influencia na eficiência do processo de gaseificação é o tamanho da partícula de biomassa. Os autores concordam que o tamanho da partícula de biomassa deve ser o mais uniforme possível, a fim de evitar espaços livres entre as partículas ao serem depositadas dentro do reator. Desta forma, evita-se a heterogeneidade da temperatura dentro do reator.

Para melhor aproveitamento da biomassa em sistemas industriais é desejável que a mesma seja a mais homogênea possível, tanto em termos de dimensões como no teor de umidade. Para isso é comum o uso da biomassa compactada, principalmente na forma de *pellet*, conforme Figura 2. (PEKSA-BLANCHARD et al.,2007).

Figura 2: Pellets de madeira



Fonte: Adaptado de Bioeco Pellet (2022)

As biomassas podem ser transformadas em *pellets*, por meio de um processo chamado peletização (QUÉNO et al. 2019). Esse processo realiza a moagem e secagem das biomassas, sendo posteriormente compactada em um formato cilíndrico e resfriada. A peletização aumenta a eficiência energética da biomassa e reduz o espaço necessário para armazenamento da matéria-prima (PEKSA-BLANCHARD et al., 2007).

3.2 GASEIFICADORES DE BIOMASSA

Os gaseificadores de biomassa são os dispositivos que transformam a biomassa (combustível) em gases energéticos. A gaseificação pode ser classificada de acordo com os parâmetros do gás produzido e da forma com que foi obtido esse gás.

Lora et al. (2004) classificam os gaseificadores por meio de quatro parâmetros:

- Poder calorífico do gás produzido:

Segundo Lora et al. (2004), o poder calorífico do gás produzido irá determinar a aplicação do gaseificador. Para geração de eletricidade e calor, são utilizados gaseificadores que produzem gás de baixo poder calorífico. A classificação dos gaseificadores conforme o poder calorífico dos gases produzidos pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação de gaseificadores de biomassa quanto ao poder calorífico

	Poder calorífico (MJ/Nm ³)
Baixo poder calorífico	< 5
Médio poder calorífico	5 - 10
Alto poder calorífico	10 - 40

Fonte: Adaptado de Lora et al. (2004)

- Tipo de agente de gaseificação:

Para que ocorra a pirólise e a gaseificação, é necessário que se misture com o combustível um agente gaseificador. Em gaseificadores de biomassa, normalmente são utilizados o ar, o vapor de água ou o oxigênio (BRIONES-HIDROVO et al., 2021).

- Pressão de trabalho:

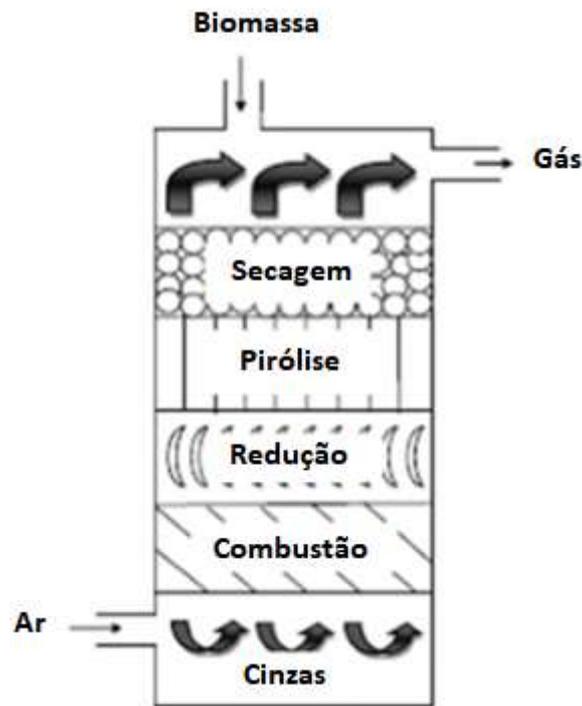
Os gaseificadores de biomassa poder ser projetados para trabalhar em pressão atmosférica ou pressurizado. Essa característica é determinada no momento do projeto e na construção do gaseificador (LORA et al, 2004).

- Tipo de leito:

A principal classificação dos gaseificadores é referente ao movimento de entrada da biomassa em relação ao agente gaseificador. Os gaseificadores podem ser classificados em leito fixo contracorrente, leito fixo concorrente, leito fixo cruzado e leito fluidizado (SÁNCHEZ, 2010). A diferença entre cada tipo de gaseificador se dá pela forma de entrada do combustível (biomassa) e do agente gaseificador (SANSANIWAL et al. 2017).

Os gaseificadores do tipo contracorrente, conforme Figura 3, são conhecidos por terem a entrada de biomassa na parte superior e a entrada de ar na parte inferior. A biomassa se acumula no interior do reator sobre uma grelha e conforme vai se transformando em gás, este é liberado por uma cavidade superior (SANSANIWAL et al. 2017). Este tipo de gaseificador é indicado para a produção de energia térmica e elétrica em baixas potências (LORA et al., 2012).

Figura 3: Gaseificador de leito fixo tipo contracorrente

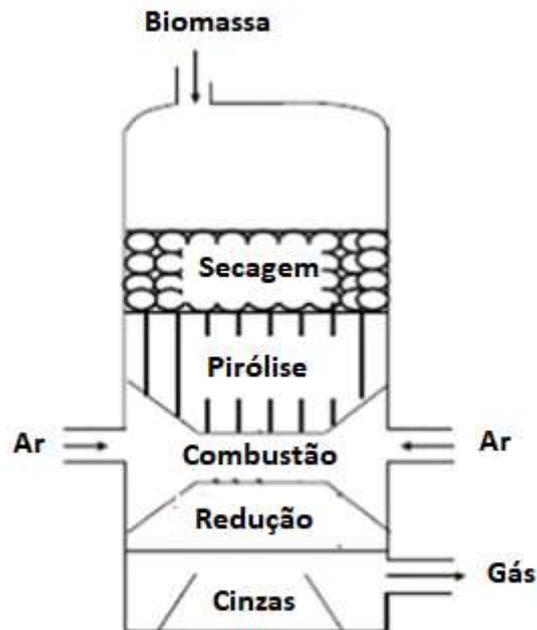


Fonte: Adaptado de SANSANIWAL et al. (2017)

Os gaseificadores do tipo concorrente são caracterizados por possuírem a entrada de biomassa na parte superior do reator, porém a saída dos gases é na parte inferior do reator do gaseificador. O fluxo interno do gaseificador do tipo concorrente pode ser visualizado na Figura 4.

Lora et al. (2012) indicam que a principal vantagem deste tipo de gaseificador é o baixo teor de alcatrão presente no gás produzido.

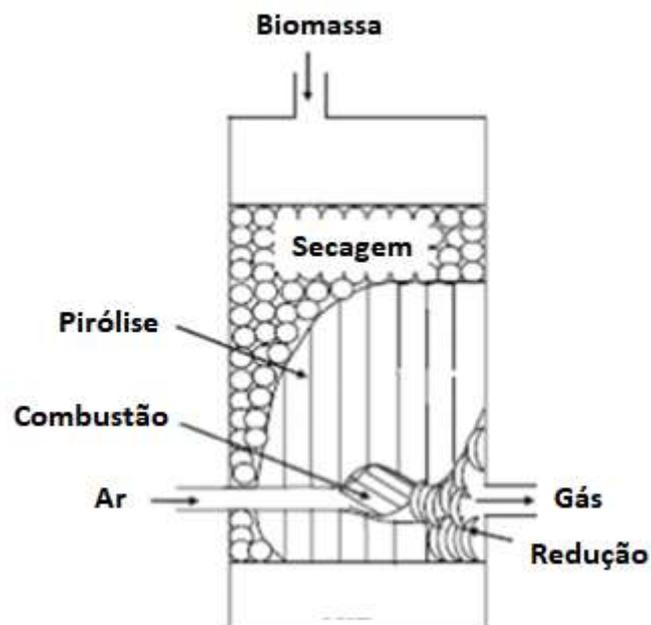
Figura 4: Gaseificador de leito fixo do tipo concorrente



Fonte: Adaptado de SANSANIWAL et al. (2017)

Os gaseificadores com leito fixo tipo cruzado são conhecidos por terem a alimentação de biomassa pela parte superior do reator e a entrada do agente gaseificador em uma das laterais. A saída dos gases resultantes é localizada em frente à entrada de ar, como é possível verificar na Figura 5.

Figura 5: Gaseificador de leito fixo do tipo cruzado



Fonte: Adaptado de SANSANIWAL et al. (2017)

Segundo Lora et al. (2012) este tipo de gaseificador é mais indicado para a produção de energia térmica, devido ao alto teor de alcatrão apresentado no gás gerado.

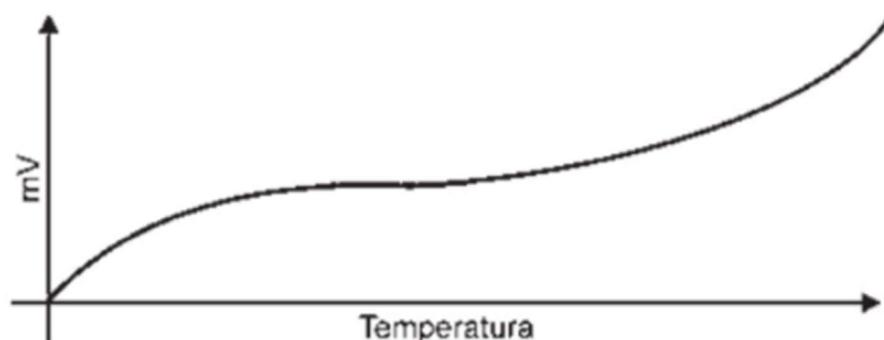
O gás de gaseificação pode ser utilizado para geração de energia elétrica ou como vapores para aquecimento em uma planta industrial, dependendo da necessidade da indústria. Caso se queira utilizar tanto os vapores como gerar energia elétrica, então o processo é chamado de cogeração (LORA et al., 2004).

3.3 SENSORES INDUSTRIAIS

Ao realizar uma medição, estamos medindo uma determinada grandeza física. Essa grandeza pode ser força, temperatura, velocidade, distância, entre outras. Segundo Balbinot (2019) o dispositivo que realiza a medição de uma variável física e fornece em sua saída um sinal correspondente ao valor medido é chamado de transdutor. Esses dispositivos detectam uma determinada forma de energia em sua entrada e convertem essa energia para outra, normalmente elétrica, e que possa ser manipulada. O elemento que interage com o fenômeno a ser medido é chamado de sensor (BALBINOT, 2019).

Sensores são dispositivos que são sensíveis a alguma forma de energia e suas variações (THOMAZINI e ALBUQUERQUE, 2020). Os sensores podem ter em suas saídas, sinais analógicos ou digitais, dependendo da forma em que o dispositivo fornece o sinal de saída. Segundo Thomazini e Albuquerque (2020), os sensores com saída analógica são caracterizados por representar qualquer valor da grandeza ao longo do tempo, tendo como resposta gráfica de sua saída um sinal ininterrupto. Como exemplo, é possível observar na Figura 6 uma medição de temperatura em que o sensor fornece em sua saída um sinal correspondente, porém convertido para tensão elétrica.

Figura 6: Medição analógica

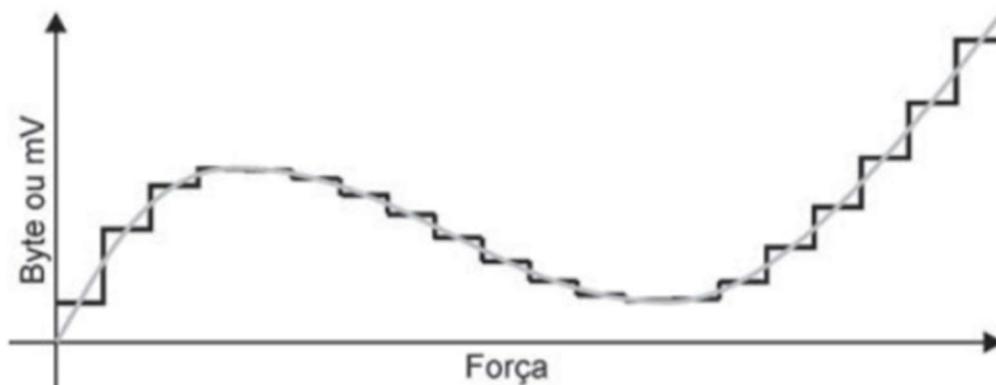


Fonte: Adaptado de Thomazini e Albuquerque (2020).

Os sensores com saída digital se diferenciam pela forma em que fornecem o sinal de saída. Diferentemente dos sensores analógicos, eles fornecem um sinal discreto. Um exemplo de resposta de um sensor digital é a indicação de ligado ou desligado de uma determinada máquina.

É possível converter a resposta de um sensor de analógica para digital ou de digital para analógica. Para isso, segundo Thomazini e Albuquerque (2020), utiliza-se os conversores analógicos para digital (A/D) e digital para analógicos (D/A). Conversores A/D realizam a conversão de um sinal analógico para digital, enquanto um conversor D/A converte um sinal digital para analógico. Na Figura 7 é possível identificar uma medição de força realizada por um sensor com resposta analógica e na forma de tensão elétrica. Ao passar a resposta desse sensor por um conversor A/D, obtêm-se um sinal discreto que representa a força em *Bytes* (degraus)

Figura 7: Conversão de sinais



Fonte: Adaptado de Thomazini e Albuquerque (2020).

3.4 INSTRUMENTOS DE MEDIÇÃO E SEUS PARÂMETROS

Um instrumento de medição é um dispositivo que utiliza sensores para a medição de uma determinada grandeza e fornece em um *display* o valor medido (BALBINOT, 2019). O valor mostrado pode ser no formato digital (um número em um display) ou analógico (um ponteiro com escala gravada no equipamento). Na Figura 8 é possível observar dois multímetros, que são equipamentos utilizados para medir algumas grandezas elétricas. O equipamento da esquerda fornece o valor da grandeza de forma analógica, através de um ponteiro que se move conforme o valor medido. O equipamento da direita fornece a informação

medida de forma numérica, de forma que o usuário tem mais facilidade na interpretação do resultado da medição.

Figura 8: Instrumentos de medidas analógicos e digitais

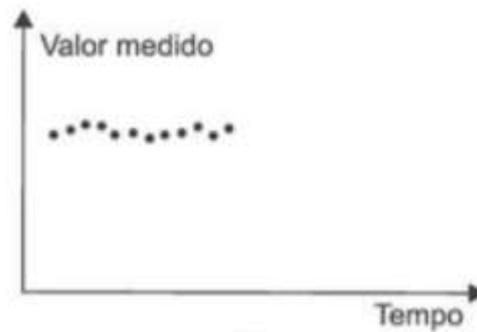


Fonte: Portal da construção (2020).

Ao realizar uma medição, se deve ter certeza se o valor medido é confiável e representa o valor real da grandeza. Dessa forma, Thomazini e Albuquerque (2020), Balbinot (2019) sugerem uma maior atenção aos seguintes parâmetros dos dispositivos de medição.

- **Sensibilidade:** é a razão da variação na saída em função da variação da entrada no sensor. Um sensor com alta sensibilidade consegue detectar pequenas variações no sinal de entrada e transmitir essas variações para a saída do sensor (THOMAZINI E ALBUQUERQUE, 2020).
- **Exatidão:** é o quanto um valor medido se aproxima do valor real da grandeza. Um sensor com alta exatidão é sempre indicado para uma medição industrial (BALBINOT, 2019).
- **Precisão:** ao realizar repetidas medições de uma mesma grandeza, se todas as medições apresentarem o mesmo valor ou um valor aproximado, então a medição apresenta alta precisão. Um exemplo de precisão é apresentado na Figura 9, onde foram realizadas diversas medições em um determinado tempo e todas apresentam um valor parecido.

Figura 9: Medição com alta precisão



Fonte: Adaptado de Thomazini e Albuquerque (2020)

- **Linearidade:** é uma curva levantada entre valores de entrada e saída de um sensor. Se um sensor tem resposta linear, a sua saída é proporcional ao sinal de entrada. A linearidade deve ser sempre buscada a fim de tornar fácil a manipulação dos dados (FIALHO, 2010).
- **Alcance ou range:** é a faixa de valores que o sensor consegue medir em sua entrada. Por exemplo, um determinado sensor de temperatura pode realizar uma medição entre 0°C e 100°C, fora dessa faixa o sensor não tem capacidade de medição.

3.5 MEDIÇÃO DE NÍVEL

Alves (2017) cita que a medição de nível tem dois objetivos: avaliação de estoques em tanques de armazenamento e controle de processos contínuos. Em ambas aplicações, a ideia é medir a quantidade de material depositado em determinado recipiente. Como exemplo pode-se utilizar a caixa d'água utilizada em residências, onde se utiliza um sensor do tipo chave boia que interrompe a entrada de água na caixa d'água quando ela está cheia e aciona o fornecimento de água quando a caixa não está cheia. Segundo Franchi (2015) este tipo de sensor é chamado de chave de nível flutuadora e é utilizada para medição de nível de líquidos.

Fialho (2010) chama esse tipo de medição de medição direta, pois há o contato entre a substância a ser medida e o sensor. Caso não houver o contato, Fialho (2010) chama de medição indireta.

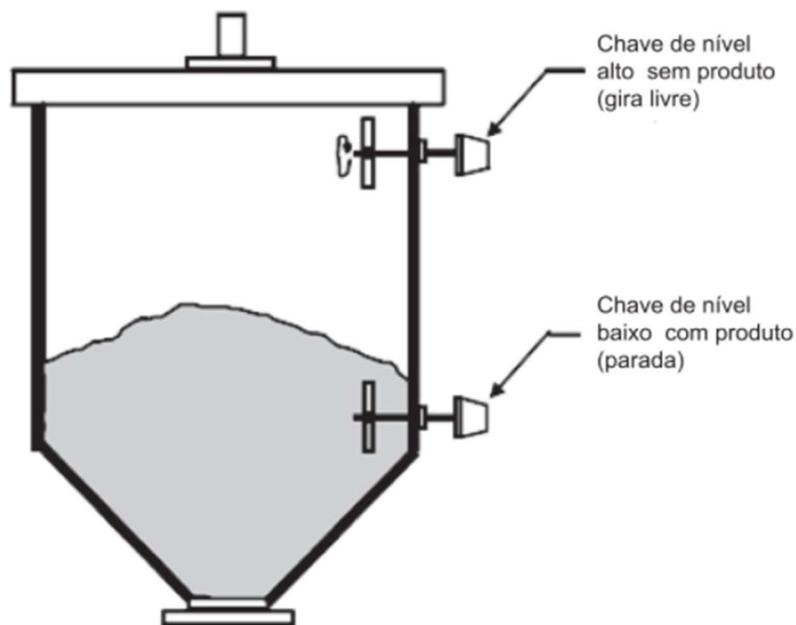
Fialho (2010); Franchi (2015); Balbinot (2019); Thomazini e Albuquerque (2020) citam diversos tipos de sensores de nível utilizados para medição de nível de líquidos e sólidos.

Como este trabalho tem o foco em medição de nível de sólidos fragmentados, somente os sensores de nível para sólidos serão apresentados. Os principais são:

- **Pás rotativas:**

Segundo Franchi (2015) este tipo de sensor é constituído de uma pá giratória rotacionando em uma velocidade muito baixa. Quando houver o contato da pá com o material ocorre um atrito que causa uma redução da velocidade de rotação ou até mesmo a parada da pá e desta forma é possível saber o nível do material armazenado. Na Figura 10 é possível verificar a aplicação da pá giratório em um silo de armazenamento de grãos. Há uma chave de nível inferior que detecta o nível baixo do silo e uma chave de nível superior que detecta o nível máximo do silo.

Figura 10: Chave de nível pá rotativa



Fonte: Franchi (2015)

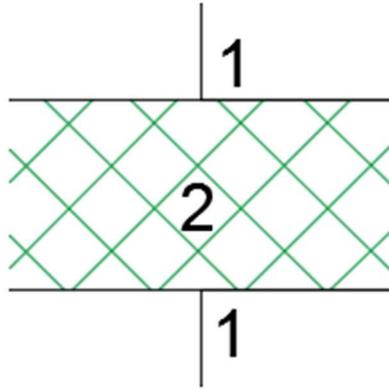
- **Capacitivo:**

Nesse tipo de medição de nível, utilizá-se o princípio da capacitância elétrica. A capacitância elétrica define quanta energia elétrica um capacitor consegue armazenar (PETRUZELLA, 2014).

Segundo Horowitz e Hill (2017) um capacitor é um dispositivo composto de duas placas de metal, separadas por um material isolante. Na Figura 11 é possível verificar um capacitor de placas paralelas. Os terminais representados pelo número "1" da Figura 11 são as duas placas

de material condutor, chamadas também de armadura e a região “2” representa o material isolante (dielétrico) que fica entre as placas (PETRUZELLA, 2014).

Figura 11: Capacitor de placas paralelas



Fonte: Elaborado pelo autor

Os capacitores tem a propriedade de armazenar energia elétrica e essa capacidade depende das dimensões do capacitor e do material isolante entre as placas (PETRUZELLA, 2014). Para calcular a capacitância elétrica do capacitor da Figura 11, pode-ser utilizar a equação 1:

$$C = K \cdot \epsilon_0 \cdot (A/d) \quad (1)$$

Onde: C = capacitância elétrica em farad (F);

K = constante dielétrica do isolante;

ϵ_0 = permissividade elétrica no vácuo ($8,85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2\text{N}^{-1}\text{m}^{-2}$)

A = área das placas do capacitor (m^2);

D = distância entre as placas (m).

É possível modificar a capacitância de um capacitor sem mudar o tamanho das placas e a distância entre elas. Para isso, Franchi (2015) sugere substituir o material isolante entre as placas. Isso se deve ao fato de que cada material possui uma constante dielétrica diferente. Como exemplo temos o ar, com constante dielétrica aproximadamente igual a 1 e o vidro com constante dielétrica igual a 3, então para um capacitor com as mesmas características de tamanho, colocando o vidro como isolante triplica a capacitância, em relação ao capacitor com o ar como isolante.

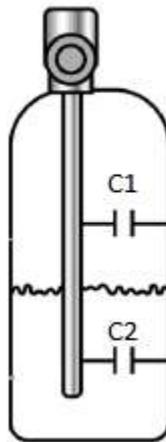
Caso a forma construtiva do capacitor mude, a equação que determina a capacitância também irá se modificar. Fialho (2010) cita o capacitor cilíndrico, muito utilizado em

aplicações onde se deseja medir o nível de líquidos. Na Figura 12 é possível observar a aplicação de uma haste metálica dentro de um recipiente com um determinado fluido. As placas do capacitor são a haste metálica e a parede do recipiente, enquanto o fluido e o ar são os materiais isolantes.

Balbinot (2019) explica que a área das placas, neste caso, depende da área interna do recipiente e da área externa da haste cilíndrica. Balbinot (2019) também indica que a capacitância total do sistema é soma de duas capacitâncias: a capacitância entre a haste e a parede do recipiente considerando o fluido (C_2) e a capacitância entre a haste e a parede interna do recipiente considerando o ar (C_1).

Quando o nível do fluido variar, tanto C_1 como C_2 irão variar também e através de uma calibração dos instrumentos é possível saber qual o nível do fluido dentro do tanque.

Figura 12: Medidor de nível capacitivo



Fonte: Adaptado de Balbinot (2019)

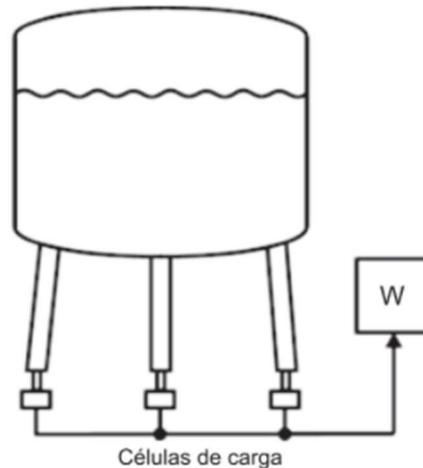
Thomazini e Albuquerque (2020) citam que este tipo de medidor de nível é virtualmente imune a variação de temperatura, é livre de manutenção e de baixo custo. Fialho (2010) indica que os sensores de níveis capacitivos podem ser aplicados para a medição de nível de sólidos granulados.

- **Pesagem:**

Este tipo de medição consiste em inserir células de carga para medir a massa de todo o sistema. Um conjunto de células de carga é instalado na parte inferior da planta e o nível é conhecido através da variação da massa do sistema. Franchi (2015) fornece uma explicação através da Figura 13 em que quanto mais material estiver dentro do tanque, maior o peso total

do sistema e, conseqüentemente, maior e a sua massa total. Através de uma calibração é possível relacionar o nível do material com a massa do sistema fechado.

Figura 13: Medição de nível com célula de carga



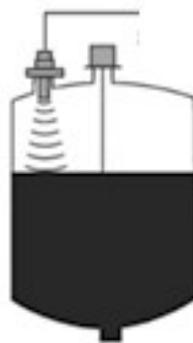
Fonte: Adaptado de Franchi (2015)

- **Ultrassom:**

Medidores de nível ultrassônicos enviam um sinal com frequência de até 200 kHz e medem o tempo que demora para o sinal ecoar no material e voltar ao sensor (BALBINOT, 2019).

Na Figura 14 é possível verificar a instalação de um sensor ultrassônico no teto do recipiente. O sensor envia um sinal, ele reflete no material e retorna ao sensor. Ao medir o tempo que demorou para o sinal sonoro retornar, através de uma calibração é possível determinar o nível do material dentro do recipiente.

Figura 14: Medidor de nível ultrassônico



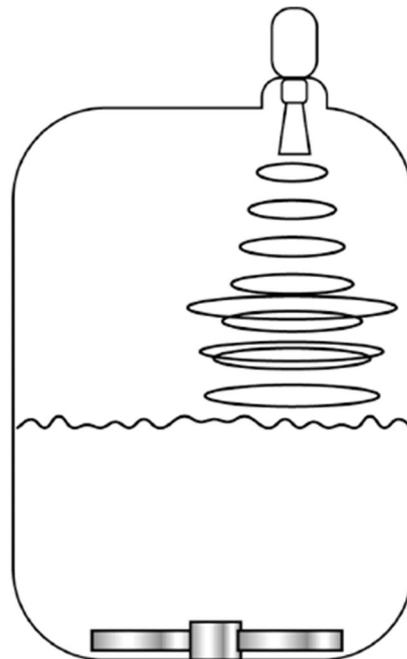
Fonte: Adaptado de Thomazini e Albuquerque (2020)

- **Radar:**

O medidor de nível do tipo radar tem o funcionamento muito parecido com o sensor ultrassônico, com a diferença em que o sinal enviado tem uma frequência entre 6 e 28 GHz (Franchi, 2015).

Este tipo de medidor usa o mesmo princípio dos radares de aviões, em que um sinal é enviado e uma parte dele reflete no material, retornando ao emissor. O tempo que leva para o sinal ir e retornar irá indicar a distância do emissor com o objeto e assim é possível determinar o nível do material dentro do tanque, conforme Figura 15 (Balbinot, 2019).

Figura 15: Medidor de nível do tipo radar



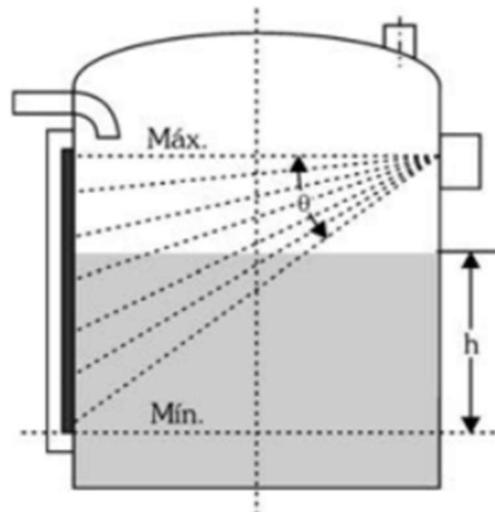
Fonte: Adaptado de Balbinot (2019)

- **Radiação:**

Este tipo de medidor de nível é composto por uma fonte de radiação (cobalto ou césio) colocada no lado externo do tanque em que se quer medir o nível. Do lado oposto do tanque é posicionado um receptor, conforme Figura 16.

Fialho (2010) explica que um feixe radioativo é enviado e captado pelo receptor. O receptor mede a intensidade com que o feixe chega e através da variação da intensidade é possível determinar o nível dentro do tanque.

Figura 16: Medidor de nível por radiação



Fonte: Adaptado de Fialho (2010)

Thomazini e Albuquerque (2020) indicam que este tipo de medidor de nível somente deve ser utilizado quando esgotar as possibilidades de utilização dos demais medidores, visto que o necessita de cuidados especiais, devido a radiação, e o custo ainda é muito alto.

- **Laser:**

Uma fonte de laser é posicionada no teto do tanque, e envia um pulso de laser que reflete no material dentro do tanque e retorna. É medido o tempo em que o pulso leva para ir e voltar e com isso pode calcular a distância e o nível do material dentro do tanque (BALBINOT, 2019).

- **Microondas:**

Tem um funcionamento muito parecido com o ultrassom. Fialho (2010) cita um emissor de pulsos eletromagnéticos que são refletidos no material dentro do tanque e voltam. Um receptor capta o sinal que retornou e calcula o tempo que demorou para o sinal ir e voltar. Desta forma é possível realizar a medição do nível dentro de um tanque com pulsos eletromagnéticos.

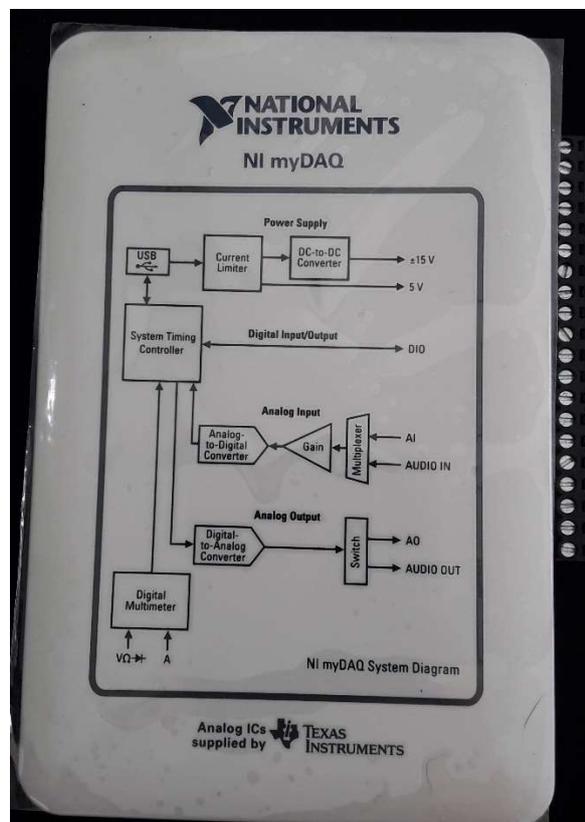
3.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS (DAQ)

Um sistema de aquisição de dados é um arranjo que permite transformar os dados analógicos adquiridos por algum sensor em sinais digitais. Dessa forma é possível interpretar e manipular esses dados de forma digital e disponibilizá-los em um display ou microcomputador (BALBINOT, 2019).

3.6.1 PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

Para receber e tratar os dados que são gerados pelos sensores é necessário utilizar um sistema de aquisição de dados (DAQ). Uma plataforma muito versátil é a myDAQ, da National Instruments, que possui entradas analógicas e digitais que são utilizadas para receber os sinais dos circuitos eletrônicos de medição e disponibilizá-los de forma eficiente e visual ao operador (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021). A plataforma NI myDAQ é mostrada na Figura 17. Ela é uma versão de estudante com acesso ao software de programação gráfica LabView.

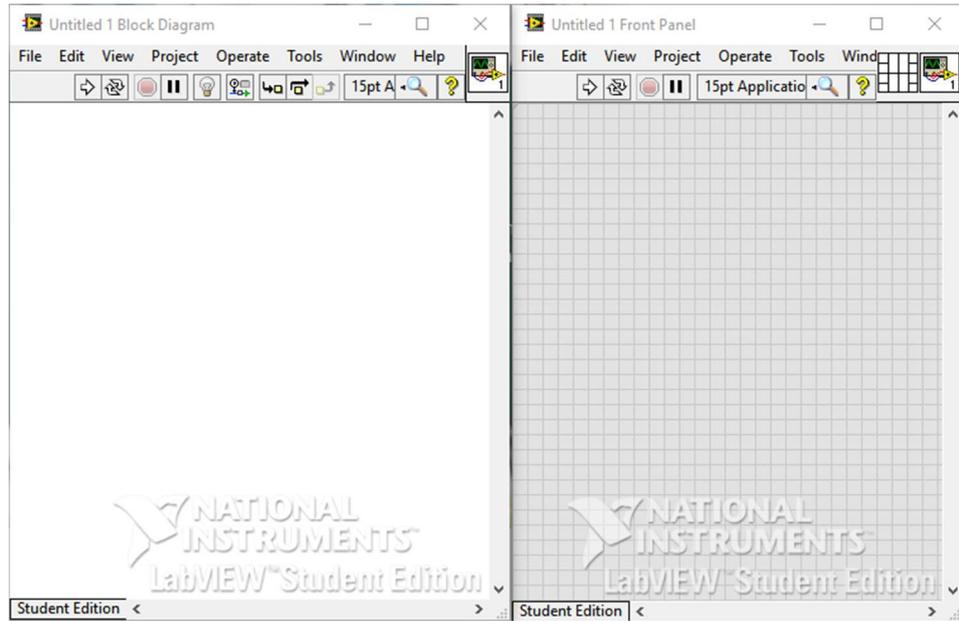
Figura 17: Plataforma myDAQ



Fonte: Elaborado pelo autor

O LabView é um software de engenharia capaz de realizar testes, medições e controle de variáveis adquiridas pelo myDAQ (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021). Ele possui duas áreas de programação. A primeira é o *Block Diagram*, onde o usuário elabora o diagrama de blocos do seu projeto e a segunda é o *Front Panel*, onde o usuário elabora a interface do programa para o operador que irá utilizá-lo. Na Figura 18 é possível ver a tela inicial de programação do LabView com as duas janelas de programação, *Block Diagram* a esquerda e *Front Panel* a direita.

Figura 18: Janelas do LabView



Fonte: Elaborado pelo autor

4. DESENVOLVIMENTO

Este trabalho foi projetado e executado em um modelo representativo de reator de um protótipo de gaseificador de biomassa que está sendo desenvolvido pelo GPCEBio - Grupo de Pesquisa em Conservação e Exploração Racional de Bioenergia. O grupo é composto por servidores e alunos de graduação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina (IFSC), campus Lages e é coordenado pelo professor Matheus Fontanelle Pereira.

Foi necessário realizar os testes em um modelo do reator pois não se poderia arriscar realizar as furações para a instalação mecânica dos elementos sensores no protótipo do gaseificador de biomassa sem que se tivesse 100 % de certeza que o sistema de medição funcionaria, pois teria o risco de danificar ou até mesmo inutilizar o reator do protótipo em um teste, o que causaria atrasos no cronograma do projeto e um investimento financeiro para corrigi-lo.

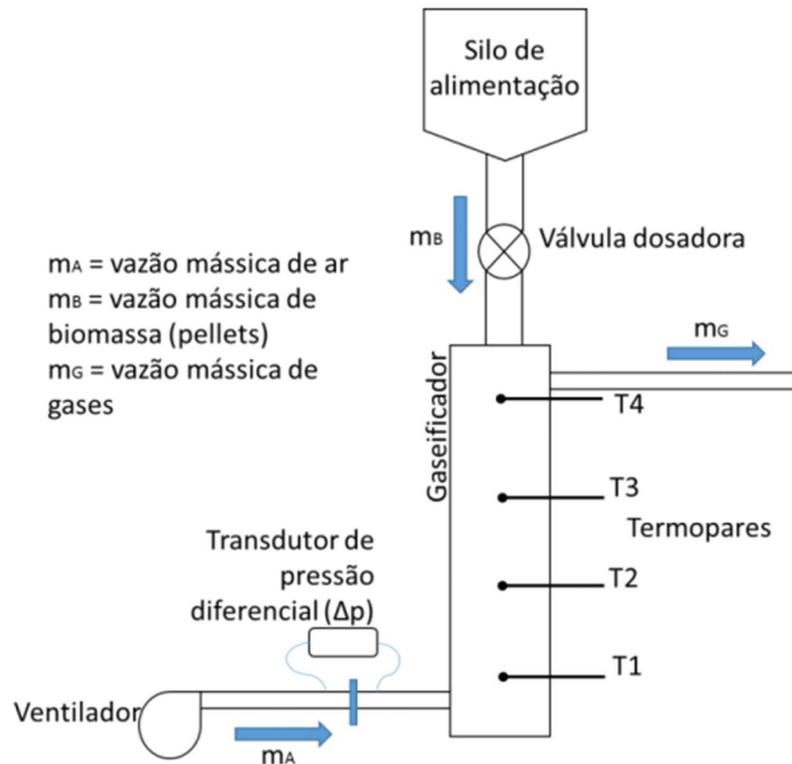
4.1 PROTÓTIPO DO GASEIFICADOR DE BIOMASSA

O gaseificador apresentado na Figura 19, de forma esquemática, é caracterizado por ser de leito fixo, do tipo contracorrente. A entrada da biomassa (combustível) é pelo topo do gaseificador através de um silo de alimentação controlado por uma válvula dosadora. O agente gaseificador utilizado neste projeto foi o ar. Para inseri-lo no reator do gaseificador foi utilizado um ventilador industrial comandado por um inversor de frequência. Controlando a válvula dosadora e o ventilador industrial, é possível controlar a entrada da biomassa e a entrada do agente gaseificador dentro do reator do gaseificador de biomassa.

O projeto do gaseificador foi realizado para ser alimentado com biomassa na forma de *pellets*. Desta forma, a válvula dosadora consegue ter um controle mais fino da quantidade de matéria-prima inserida no gaseificador. A utilização da biomassa peletizada fornece outras vantagens, como o espaço reduzido para armazenar a biomassa, redução da possibilidade de travamento da válvula dosada, homogeneidade do combustível e da umidade.

O reator do protótipo de gaseificador de biomassa é de aço carbono, no formato cilíndrico com altura de 1 metro e espessura de parede de 10 mm.

Figura 19 : Esquema do protótipo de gaseificador de biomassa



Fonte: Adaptado de Pereira et al. (2019)

4.2 SELEÇÃO DO SENSOR DE NÍVEL

Para realizar a medição do nível de biomassa dentro do reator do gaseificador de biomassa, deve-se, em primeiro lugar, definir o tipo de sensor que melhor se encaixa nas características do sistema. O gaseificador de biomassa tem algumas particularidades que devem ser levadas em conta na escolha do tipo de sensor. São elas: alta temperatura de funcionamento, material das paredes do reator, disposição dos componentes do sistema e manta de isolamento térmico do reator.

Na Figura 20 é possível observar o protótipo de gaseificador em teste, onde foi alcançada uma temperatura máxima de 900 °C. Apesar deste valor já ser elevado, este gaseificador foi projetado para trabalhar em temperaturas de até 1100 °C (PEREIRA et al, 2019).

Figura 20: Protótipo de gaseificador de biomassa em teste



Fonte: Adaptador de Pereira et al (2019)

Considerando as características do gaseificador, em um primeiro momento foram realizadas pesquisas em sites de empresas especializadas, fornecedores de equipamentos e artigos científicos para encontrar sensores comerciais que pudessem se adequar a essas características. Os principais entraves para a medição de nível desde gaseificador foram: a temperatura elevada e a parede de aço do reator.

A grande maioria dos sensores de nível existentes no mercado não atuam em temperaturas acima de 85 °C pois seus componentes seriam destruídos devido à alta temperatura de funcionamento do sistema. Desta forma, foi necessário entrar em contato com empresas especializadas em fabricação de instrumentos de medição e sensores para verificar a existência de tecnologias já existentes e comerciais para a medição na faixa de temperatura necessária.

Em um caso ideal, a medição de nível deveria ser sem contato, ou seja, o sensor seria instalado do lado de fora do reator, de forma não invasiva. Desta maneira, o sensor não sofreria as influências da temperatura e a sua instalação seria mais simples. Porém a parede de aço do

reator e sua espessura de 10 mm reduzem as opções de sensores que conseguem atuar nessas condições.

Foram encontradas duas soluções comerciais que poderiam ser utilizadas de forma menos complexa, sendo uma com instalação invasiva e a outra não.

O sensor de microondas poderia ser utilizado desde que fosse acoplado a um adaptador de porcelana para conseguir trabalhar a temperaturas de até 1000 °C. Seria necessário abrir dois orifícios na parede do reator para que o sinal do sensor adentre ao gaseificador. Essa solução foi descartada devido ao elevado preço do sensor e do adaptador de cerâmica.

A outra solução encontrada e que é não invasiva é o sensor radiométrico. Este tipo de sensor envia pulsos radioativos que atravessam a parede metálica do reator e são detectadas por um detector de pulso. Esta solução foi descartada pois tem um preço de mercado muito elevado e trabalha com compostos radioativos.

Esgotando as soluções comerciais, foram buscadas as soluções acadêmicas em gaseificadores de biomassa ou equipamentos semelhantes, ou seja, com alta temperatura e paredes metálicas. Werther (1999); Wiesendorf; Werther (2000); Huang et al. (2018) e Yan et al. (2021) apresentam a utilização do princípio capacitivo para detecção de materiais sólidos. Tasnim et al. (2018) usam o princípio capacitivo para medição do fluxo de biomassa em uma tubulação.

Na medição com capacitores, são utilizadas duas ou mais placas de material metálico, a uma determinada distância uma da outra, com um material isolante (dielétrico) entre elas (YAN et al, 2021). A mudança do material isolante entre as placas ou da quantidade de material dielétrico entre as placas muda o valor da capacitância elétrica. Ou seja, quando houver biomassa entre as placas haverá uma determinada capacitância e quando houver somente ar ou gases a capacitância elétrica será diferente. Desta forma, será possível determinar a altura da coluna de biomassa dentro do reator, considerando a aplicação em altas temperaturas.

Portanto, os sensores capacitivos apresentam potencial para serem utilizados em gaseificadores de biomassa. Para analisar o comportamento dos sensores capacitivos na detecção de biomassa, foi realizado um teste de detecção de biomassa em temperatura ambiente. Este teste ocorreu nos laboratórios de eletrotécnica e eletrônica do Instituto Federal de Santa Catarina, campus Lages.

4.3 TESTES DOS SENSORES CAPACITIVOS INDUSTRIAIS

Com a intenção de verificar se o sensor capacitivo detectaria a biomassa dentro de um tubo metálico, foi realizado um teste de bancada, em temperatura ambiente e com um modelo de reator de aço de menor tamanho. O tubo de aço carbono utilizado para o teste tem altura de 30 cm, diâmetro de 10 cm e parede com espessura de 2 mm. O tubo foi perfurado em dois pontos, com ambos os furos com diâmetro de 22 mm. Foram utilizados dois sensores capacitivos industriais modelo CM18-3008 PA, instalados no tubo de aço, conforme Figura 21.

Figura 21: Modelo de reator de aço com sensores instalados



Fonte: Elaborado pelo autor

O primeiro sensor está instalado a uma altura de 8 cm do fundo do tubo e o segundo sensor está 8 cm acima do primeiro sensor, ou seja, a 16 cm da base do tubo. Esses valores foram escolhidos a fim de evitar interferências de um sensor sobre o outro. Um corte vertical foi feito na parede do tubo a fim de verificar a altura da coluna de biomassa, visualmente, pelo lado de fora do modelo e verificar se a biomassa realmente está acumulada na frente do sensor no momento da detecção.

Os sensores CM18-3008PA tem corpo metálico, cilíndrico e são não faceados, ou seja, detectam objetos na frente e nas laterais da face do sensor. São sensores de três fios e que podem

receber tensão contínua entre 6 e 36 V entre dois fios e quando detectam um material, enviam pelo terceiro fio um sinal de tensão contínua de mesmo valor da alimentação (JNG, 2021). Na Figura 22 é possível visualizar os sensores capacitivos da linha CM, onde as placas de cor azul contêm os elementos de detecção dos sensores. O sensor central da Figura 22 foi o utilizado neste trabalho por possuir a característica de detectar objetos tanto na frente da face de medição como ao redor dela e como resposta a detecção, envia um sinal de tensão contínua e positivo.

Figura 22: Sensores capacitivos



Fonte: JNG, 2021.

Para alimentar o circuito eletrônico dos sensores, foi utilizado uma fonte de tensão contínua, modelo FA-3030, com sinal ajustado em 12 V. Os multímetros utilizados para detectar o sinal de tensão emitido pelos sensores foram do modelo ET-1400 da Minipa.

O sistema completo de medição é mostrado na Figura 23, onde se tem os dois sensores capacitivos instalados no tubo de aço, a fonte de tensão que fornece aos sensores a tensão contínua de 12 V e os multímetros realizando a medição de tensão elétrica das respostas dos sensores.

Os sensores atuam de duas formas: quando não há biomassa em frente as placas dos sensores capacitivos, o sinal de tensão da saída é aproximadamente 0 V; quando há biomassa na frente das placas dos sensores capacitivos, eles enviam um sinal de tensão de 12 V.

Os sensores CM18-3008PA possuem um resistor variável para ajustar a sensibilidade da detecção de corpos sólidos. Esses resistores foram ajustados de forma que os sensores capacitivos somente detectassem a biomassa quando ela estivesse na frente da placa de detecção. Dessa forma, quando a biomassa estiver em uma altura logo abaixo do sensor, este não irá detectá-la.

Figura 23: Sistema de medição para teste dos sensores capacitivos



Fonte: Elaborado pelo autor

No primeiro teste efetuado, conforme Figura 24, a biomassa foi inserida no tubo manualmente até atingir a altura de instalação do primeiro sensor. A altura da coluna de biomassa acumulada foi medida externamente, através da visualização da biomassa pelo corte vertical no tubo e com uma régua de acrílico de 30 cm, modelo 7130.

Figura 24: Teste dos sensores capacitivos em temperatura ambiente



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste momento, o sensor que está posicionado a 8 cm do fundo do tubo, detecta a biomassa e envia um sinal de tensão de aproximadamente 12 V para o multímetro.

Paralelamente, o sensor acionado emite uma luz vermelha, sinalizando que ele detectou a biomassa. A Figura 25 mostra a medição da resposta de tensão do sensor capacitivo inferior, lida e mostrada através do multímetro ET-1400. Também é possível visualizar a luz vermelha emitida pelo sensor (em destaque), acusando a detecção do material.

Figura 25: Resposta do sensor capacitivo



Fonte: Elaborado pelo autor

A resposta apresentada pelo sensor, neste primeiro teste, indica que a coluna de biomassa acumulada dentro do tubo é superior a 8 cm de altura e inferior a 16 cm. A medição manual externa comprovou este resultado.

Para se ter certeza que o sistema de sensoriamento capacitivo funcionava, foi realizado um segundo teste, em que a biomassa continuou sendo adicionada manualmente dentro do tubo de metal, até chegar ao nível do segundo sensor capacitivo. O sensor inferior já estava atuando, e o sensor superior foi acionado automaticamente quando a biomassa acumulada chegou a uma altura de aproximadamente 16 cm (altura de instalação do segundo sensor). Neste momento, conforme Figura 26, os dois sensores estão acionados pois estão detectando a biomassa. Desta forma, ambos os sensores capacitivos emitem um sinal de aproximadamente 12 V, que é detectado pelos multímetros, um para cada sensor. Os dois sensores também emitem uma luz vermelha indicando que estão detectando a biomassa.

Figura 26: Teste com dois sensores capacitivos



Fonte: Elaborado pelo autor

Como ambos os sensores estão acionados, para saber o real nível da biomassa dentro do tubo de aço, considera-se o sensor instalado em uma posição mais alta em relação ao fundo do tubo metálico. Para comprovar o resultado, foi utilizada a régua para medir a altura da coluna de biomassa externamente, através do corte lateral. A medição manual e a medição utilizando os sensores capacitivos obtiveram os mesmos resultados.

Também foi testada a resposta do sensor capacitivo durante a inserção da biomassa no tubo, a fim de verificar se o sensor detectaria ou não a biomassa que estava caindo dentro do tubo devido a gravidade. Como era esperado, ambos os sensores não comutaram suas saídas de tensão durante a entrada da biomassa. Somente quando a biomassa estava parada na frente do sensor, foi modificado o sinal de tensão de saída.

Mesmo que os sensores detectassem a biomassa enquanto ela está sendo conduzida ao interior do tubo de aço, seria possível ajustar a sensibilidade dos sensores para que eles não detectassem a biomassa em movimento.

Desta forma, foi possível verificar que os sensores capacitivos conseguem detectar a presença da biomassa e podem realizar a medição do nível de biomassa dentro de um tubo

metálico e em temperatura ambiente. Para que seja aplicado no gaseificador de biomassa, foi necessária a adaptação dos sensores para a medição em temperatura mais elevadas.

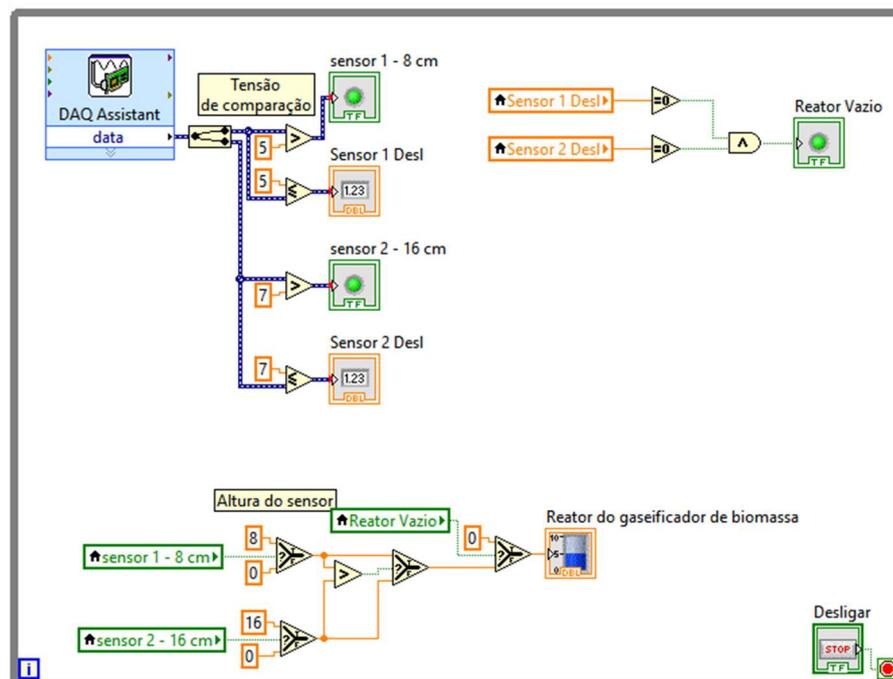
Utilizando como base os estudos e os testes de bancada, foi definido que a solução mais viável para a medição de nível de biomassa acumulada dentro do protótipo de gaseificador de biomassa é a construção de um sensor capacitivo de forma invasiva e com materiais que suportem as temperaturas de funcionamento do sistema.

4.4 SOFTWARE DE MEDIÇÃO PARA O TESTE DOS SENSORES

Como o gaseificador de biomassa é um equipamento voltado ao uso industrial, todo o seu sistema deve funcionar automaticamente, ou seja, os sensores devem detectar a biomassa dentro do reator do gaseificador de biomassa e devem informar o sistema de aquisição de dados que houve a detecção. Uma interface gráfica deve disponibilizar ao operador do sistema o nível de biomassa dentro do reator. Para isso, foi elaborado um código no software NI LabVIEW que recebe os dados enviados pelos sensores e mostram ao operador a situação dentro do reator em tempo real.

Na primeira etapa, o programa foi elaborado para atuar com os dois sensores capacitivos que foram utilizados na seção anterior. Para isso foi criado um diagrama de blocos, que pode ser visto na Figura 27.

Figura 27: Diagrama de blocos



Fonte: Elaborado pelo autor

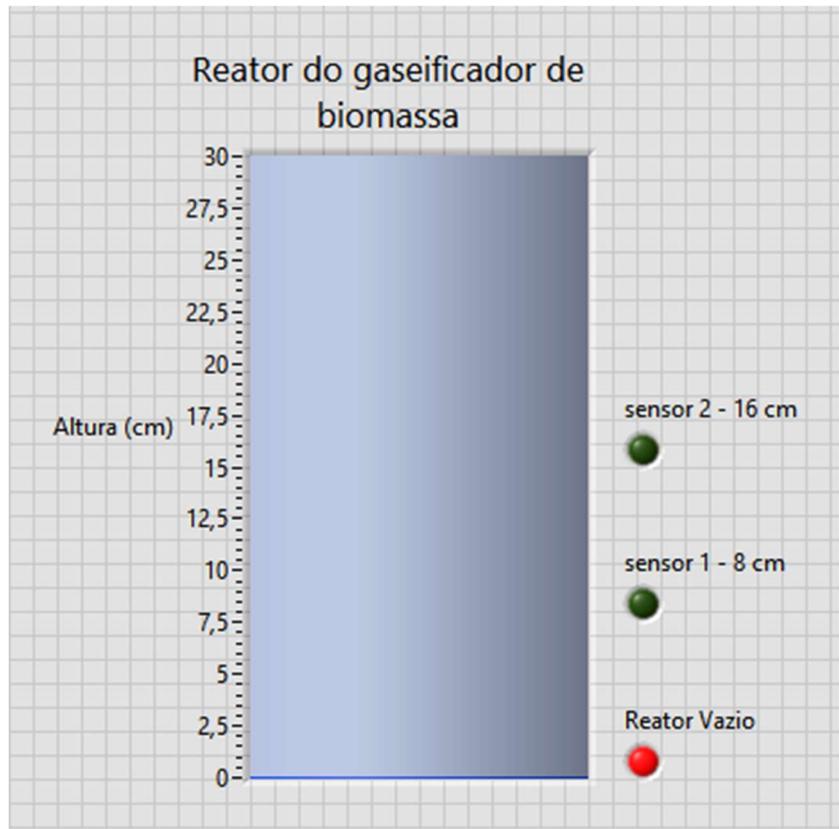
Este diagrama tem como sinal de entrada as tensões de saída dos sensores capacitivos comerciais CM18-3008PA e cada sensor foi alimentado com uma tensão contínua de valor diferente. Desta forma, a tensão de saída de cada sensor também será diferente e pode-se saber qual dos dois sensores está atuando. Para o sensor indicador de biomassa na altura de 8 cm foi utilizada uma tensão de alimentação de 6 volts, enquanto para o sensor indicador de biomassa na altura de 16 cm foi utilizada uma tensão de alimentação de 8 volts. Esses valores diferentes de tensões foram estabelecidos através de divisores de tensão acoplados na saída de tensão contínua da placa de aquisição de dados NI myDAQ.

O código mostrado na Figura 27 detecta, separadamente, a tensão de saída dos sensores capacitivos e compara esses valores com um valor pré-determinado no software. No caso do sensor indicador de biomassa a 8 cm de altura, é realizada a comparação do valor de saída do sensor com o número 5, que indicaria um limiar de tensão de 5 V. Se a tensão de saída do sensor for maior que 5 V, este sensor capacitivo está detectando a biomassa. Para o sensor indicador de biomassa a 16 cm, o procedimento é o mesmo, mas como a tensão de alimentação é de 8 V, a comparação é feita com um valor representativo de 7 V. Se a tensão de saída desse sensor for maior que 7 V, este sensor capacitivo está detectando a biomassa na altura de 16 cm.

O diagrama de blocos também foi programado para indicar se o reator está vazio, ou seja, sem a presença de biomassa dentro do reator. Isso irá ocorrer quando a resposta de todos os sensores for menor que o valor de comparação para cada sensor.

O diagrama de bloco é o circuito responsável por realizar todo o tratamento dos sinais, mas para exibir os resultados para um operador usando um computador é necessário criar uma interface de usuário. Para isso foi elaborado um painel frontal que fornece um modelo gráfico do reator do gaseificador de biomassa. A Figura 28 traz parte da interface que o operador do sistema terá acesso, onde ele vê um modelo do reator e alguns indicadores luminosos que mostram qual o sensor está atuando em tempo real. Para sinalizar que não há biomassa dentro do reator, foi adicionado um indicador de reator vazio, que fica acionado na cor vermelha quando não há detecção de biomassa pelos demais sensores e fica desligado quando há a detecção de biomassa por um ou mais sensores.

Figura 28: Painel frontal



Fonte: Elaborado pelo autor

Afim de testar o sistema de exibição dos resultados, os sensores capacitivos foram instalados no modelo de reator de gaseificador de biomassa e conectados ao sistema de aquisição de dados. A biomassa foi inserida manualmente até a altura de 8 cm e, como pode ser visualizado na Figura 29, o sistema indicou a presença de biomassa neste nível pois o sensor que está nesta posição está atuando. A altura do retângulo na cor azul indica a altura da coluna de biomassa dentro do modelo de reator do gaseificador de biomassa.

Figura 29: Painel frontal indicando a presença de biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor

Com isto foi possível confirmar que o sistema de aquisição de dados, juntamente com o código de programação criado podem realizar a medição e a indicação do nível de biomassa com a utilização de sensores capacitivos.

A realização dos ensaios de bancada com os sensores capacitivos, a programação do software e o teste do sistema de exibição dos resultados foram as etapas que antecederam as fases de projeto e construção do sistema de medição.

4.5 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO NO MODELO DE REATOR DE GASEIFICADOR DE BIOMASSA

A temperatura dentro do protótipo do reator do gaseificador de biomassa utilizado pode atingir valores de até 1100°C (PEREIRA et al, 2019). Algumas partes do sistema de medição devem ser projetadas a fim de suportar essas temperaturas elevadas. Também deve-se discutir a melhor forma de instalar os sensores dentro do reator e projetar e montar o circuito eletrônico utilizado juntamente com o sistema de aquisição de dados.

4.5.1 PROJETO E CONSTRUÇÃO DO ELEMENTO SENSOR CAPACITIVO

O sensor capacitivo deve ser projetado e construído com materiais que suportem a temperatura máxima do sistema e consigam fornecer uma variação de capacitância que possa ser detectada por um circuito eletrônico.

As placas dos sensores capacitivos devem ser construídas com material condutor de eletricidade, a fim de que o princípio capacitivo aconteça (FRANCHI, 2015). Paralelamente, essas placas devem suportar a temperatura de funcionamento do gaseificador. Desta forma, o material escolhido para ser utilizado para as placas capacitivas foi o aço carbono 1010 que possui baixo teor de carbono e ponto de fusão acima de 1400°C (CALLISTER JR, 2021).

Outra variável importante é a forma geométrica das placas dos capacitores, pois elas influenciam na capacitância do sensor (WIESENDORF, V.; WERTHER, 2000). Para determinar a melhor forma das placas do capacitor, foi realizado um teste com elementos sensores construídos de duas formas diferentes:

- placas retangulares retas (denominada de placa A),
- placas retangulares em curva (denominada de placa B), onde a curvatura da placa é igual a curvatura interna do tubo de aço.

Ambas as placas possuem comprimento de 6 cm com largura de 2 cm e foram fixadas através do processo de soldagem a uma barra rosqueada com comprimento de 10 cm. Isto foi necessário para realizar a fixação das placas dentro do tubo do modelo do reator sem ter contato elétrico entre a placa e o tubo de aço do reator. A fixação ocorreu através do uso de porcas dos dois lados, com arruela e lã de vidro para isolação elétrica e térmica.

As placas foram instaladas dentro de um modelo do reator do gaseificador a fim de medir sua capacitância sem biomassa e com biomassa dentro do tubo. Desta forma, as duas placas estão nas mesmas condições e podem ter seus valores de capacitâncias comparados entre si. Para realizar a medida de capacitância foi utilizado um medidor LCR POL-42 da Politerm ajustado em uma frequência de 1 kHz para determinar o valor da capacitância entre as placas e o tubo de aço do modelo do gaseificador de biomassa.

Na Figura 30 é possível verificar a instalação das placas B no tubo do modelo do gaseificador para realizar o teste. O mesmo foi realizado com as placas A.

Figura 30: Teste das placas B no modelo de reator



Fonte: Elaborado pelo autor

Após realizar a medição da capacitância das placas A e B em relação ao tubo de metal, e em temperatura ambiente, foi constatado que o valor da capacitância não variou consideravelmente com as mudanças das formas das placas. Porém constatou-se que a placa A, sem curvatura, estava bloqueando a passagem da biomassa, devido ao menor espaçamento entre as pontas da placa e a parede do tubo de aço.

Devido a isso, ficou estabelecido que a melhor forma da placa do capacitor seria a placa B, ou seja, uma placa paralela com a mesma curvatura do tubo do gaseificador. Desta forma, a distância entre qualquer ponto da placa e a parede do tubo é sempre a mesma.

A fim de se reduzir a transferência do calor do processo térmico que ocorre dentro do tubo do reator do gaseificador de biomassa para o circuito eletrônico, foi fixado, na outra extremidade da barra rosqueada uma vareta de aço com 35 cm de comprimento. O elemento sensor capacitivo completo pode ser visto na Figura 31, onde se tem a placa do elemento sensor em destaque.

Figura 31: Elemento sensor capacitivo



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5.2 DISPOSIÇÃO DOS ELEMENTOS SENSORES

Com a forma geométrica dos elementos sensores determinada, foi necessário encontrar a melhor disposição das placas dentro do tubo do gaseificador. Segundo Petruzella (2014), um capacitor é composto de duas placas separadas por um material isolante. Desta forma, foi possível experimentar dois arranjos para o gaseificador, que podem ser vistos na Figura 32.

Ambos os arranjos utilizam placas com comprimento de 6 cm e altura de 2 cm, totalizando uma área de 12 cm². As dimensões das placas influenciam no valor da capacitância, por isso, para compará-las, é necessário que as placas sejam iguais.

O arranjo “A” da Figura 32 utilizou a parede do tubo metálico como uma placa do capacitor, enquanto a outra placa é o elemento sensor. Desta forma, o sensor capacitivo irá variar sua capacitância tendo biomassa na frente e atrás da placa.

O arranjo “B” da Figura 32 utilizou duas placas, uma de frente para outra e ambas isoladas eletricamente do tubo metálico através da utilização de lã de vidro. Assim, somente quando houver biomassa entre as duas placas, a capacitância irá variar, desconsiderando a influência do tubo metálico.

Figura 32: Possíveis arranjos para instalação dos elementos sensores



Fonte: Elaborado pelo autor

A fim de determinar o melhor arranjo possível para a instalação dos elementos sensores, foram realizadas as medições das capacitâncias elétricas em ambos os arranjos, com e sem a presença de biomassa.

Foi utilizado o medidor LCR POL-42 conectado nas placas para realizar a medição da capacitância elétrica. Foram realizadas três repetições a fim de obter um valor médio. O mesmo procedimento foi realizado com biomassa entre os elementos sensores capacitivos e os resultados podem ser visualizados na Tabela 2:

Tabela 2: Capacitância para os arranjos A e B

Arranjo	Capacitância sem presença de biomassa (pF)	Capacitância com presença de biomassa (pF)	Variação (%)
A	28	31,1	11,78%
B	0,8	1,1	37,5 %

Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, o arranjo A obteve uma variação de 11,78 % enquanto o arranjo B teve um aumento da capacitância na ordem de 37,5 %. Este resultados indicam uma predisposição para escolha do arranjo B para o gaseificador de biomassa. Mas outros fatores devem ser levados em consideração, tais como: maior bloqueio da área interna do tubo do reator; valor da capacitância inicial muito baixo; dificuldades de medição devido a interferências externas.

Como a capacitância inicial (sem biomassa) do arranjo B é muito pequena, pois é medida somente entre as placas dos elementos sensores e sem considerar as paredes do tubo metálico, o circuito eletrônico utilizado para realizar a medição deve ter uma sensibilidade muito bem ajustada a fim de medir fielmente o que está acontecendo no sistema. Caso isso não ocorra, interferências externas podem provocar falsas indicações de biomassa dentro do sistema. Até mesmo a presença de cabos dos instrumentos de medição podem mudar o valor medido quando este é muito pequeno.

Com o arranjo A este problema pode ser amenizado, visto que a capacitância inicial é bem superior que a do arranjo B devido a utilização do tubo de aço como uma das placas condutores do capacitor formado. Desta forma, interferências externas não tendem a provocar problemas de falsa indicação de biomassa. O arranjo A também fornece uma menor obstrução da área interna do reator do gaseificador, interferindo menos no processo de gaseificação.

Levando em consideração os dados acima citados, é possível afirmar que disposição mais adequada para os elementos sensores foi o arranjo A da Figura 32.

4.5.3 PROJETO DO CIRCUITO ELETRÔNICO DE MEDIÇÃO DE VARIAÇÃO DE CAPACITÂNCIA

O sistema de aquisição de dados pode realizar o tratamento dos sinais provenientes dos sensores. Porém, para captar esses sinais, eles devem estar ajustados dentro das faixas de valores que a placa de aquisição aceita. O NI myDAQ tem entradas analógicas e digitais e um multímetro digital incorporado que detecta tensão contínua e alternada (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021). Para adequar os valores das saídas dos elementos sensores as faixas de entrada da NI myDAQ, foi projetado e montado um circuito eletrônico que detecta a variação de capacitância do sistema e transforma essa variação em variação de tensão alternada.

Para projetar e montar o circuito eletrônico que detecta a capacitância dos sensores capacitivos é necessário saber com quais valores de capacitância se está trabalhando. Para isso, foram utilizados os valores de capacitância dos elementos sensores encontrados na Tabela 2 para o arranjo A, ou seja, a capacitância medida sem biomassa é de 28 pF e com a biomassa acumulada na frente da placa é de 31,1 pF.

Segundo et al. (2011) propõem um circuito eletrônico chamado de ponte AC, onde as variações de capacitância são detectadas através da variação das reatâncias elétricas. O circuito utiliza elementos capacitivos e resistivos e necessita de uma alimentação em tensão alternada, visto que a reatância capacitiva só ocorre em circuitos com alimentação em sinais alternados.

Horowitz e Hill (2017) indicam algumas variações desse tipo de circuito, que derivam da ponte de *Wheatstone* onde pode-se utilizar capacitores, indutores e resistores. Após análise dos diagramas e considerando a variação de capacitância elétrica promovida pelo acúmulo de biomassa em frente as placas dos elementos sensores, o circuito eletrônico que melhor se aplica a este projeto pode ser visto na Figura 33 e foi adaptado de Segundo et al. (2011), Horowitz e Hill (2017) e Alexander e Sadiku (2013).

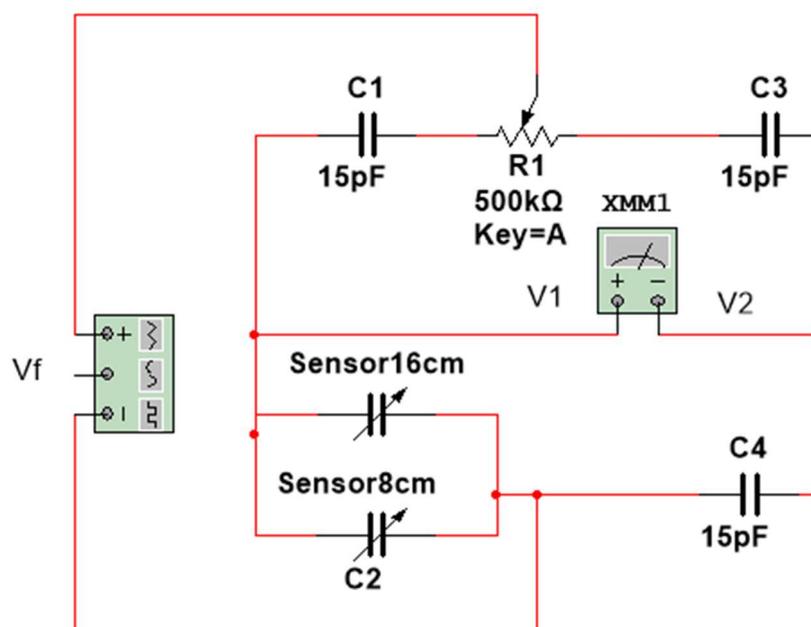
Este circuito é composto por uma fonte de alimentação em tensão alternada, com 10 volts de tensão de pico e frequência de 1 kHz. A fonte de alimentação utilizada foi um gerador de função arbitrária AFG1022 da Tektronix.

Há três capacitores com valor fixo de 15 pF. Esse valor, para os capacitores, foi escolhido pois é um valor comercial próximo à capacitância de 28 pF de cada elemento sensor sem a presença de biomassa.

Um resistor variável (potenciômetro) com valor máximo de 500 k Ω foi colocado no circuito para ajustar o valor inicial de tensão de saída do circuito, quando este não estiver detectando biomassa.

O sistema de aquisição de dados NI myDAQ, ajustado para medir tensão alternada, foi fixado entre dois pontos do circuito para realizar a medição da tensão elétrica de saída.

Figura 33: Esquema do circuito eletrônico



Fonte: Adaptado de Segundo et al. (2011), Horowitz e Hill (2017) e Alexander e Sadiku (2013).

O funcionamento do circuito da Figura 33 se baseia na variação da capacitância dos elementos sensores quando houver biomassa entre suas placas e o tubo de aço. Cada sensor tem sua própria capacitância e como eles estão interligados em paralelo, a capacitância equivalente irá variar sempre que algum dos elementos sensores detectar a biomassa.

A capacitância total teórica, sem a presença de biomassa foi calculada conforme Equação 2.

$$C_{t1} = C(\text{sensor } 8\text{cm}) + C(\text{sensor } 16\text{ cm}) \quad (2)$$

$$C_{t1} = 28\text{ pF} + 28\text{ pF}$$

$$C_{t1} = 56\text{ pF}$$

A capacitância total teórica, quando os dois sensores estiverem detectando a biomassa será de:

$$C_{t2} = C(\text{sensor } 8\text{cm}) + C(\text{sensor } 16\text{ cm})$$

$$C_{t2} = 31,1\text{ pF} + 31,1\text{ pF}$$

$$C_{t2} = 62,2\text{ pF}$$

Antes de colocar o sistema de medição em funcionamento, quando não houver biomassa, a tensão de saída do circuito será ajustada manualmente através do potenciômetro para um determinado valor. Com o circuito em pleno funcionamento e a biomassa sendo adicionada no sistema, chegará a hora em que a biomassa estará acumulada em frente a placa de um ou mais elementos sensores capacitivos. Quando isso acontecer, a capacitância equivalente irá variar dentro da faixa teórica de 56 pF a 62,2 pF.

O aumento da capacitância faz com que ocorra um desbalanceamento das reatâncias capacitivas do sistema, modificando a impedância total e a tensão de saída do circuito.

Segundo Horowitz e Hill (2017), a reatância capacitiva é dada pela equação 3:

$$X_C = \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (3)$$

Unidade: ohm (Ω).

Onde “ ω ” é a frequência angular, que tem valor fixo e dependente da frequência da fonte de alimentação (1 kHz) e “C” é a capacitância elétrica variável.

As reatâncias elétricas para cada capacitância elétrica do sistema foram calculadas através da equação 3, considerando a frequência de 1 kHz e são mostradas na Tabela 3:

Tabela 3: Valor das reatâncias elétricas

Capacitância (pF)	Reatância (MΩ)
15	10,6
28	5,68
31,1	5,11
56	2,84
59,1	2,69
62,2	2,55

Fonte: Elaborado pelo autor

A capacitância de 15 pF é o valor de capacitância dos três capacitores utilizados no circuito eletrônico e cada um deles tem uma reatância elétrica de 10,6 MΩ. O valor de 28 pF é a capacitância elétrica encontrada em cada elemento sensor fabricado. Quando um elemento sensor estiver com biomassa peletizada em frente a sua placa, sua capacitância elétrica aumenta de 28 pF para 31,1 pF, gerando uma variação na ordem de 500 kΩ na reatância elétrica capacitiva. Ao colocar os dois elementos sensores em paralelo e no caso em que nenhum deles está detectando biomassa, é obtido um valor total de capacitância elétrica igual a 56 pF. Na situação em que um dos elementos sensores está com biomassa em frente a sua placa e o outro não, a capacitância teórica do sistema é de 59,1 pF. O último caso acontece quando os dois elementos capacitores está com biomassa em frente as suas placas, o que gera uma capacitância elétrica total de 62,2 pF e uma reatância elétrica capacitiva de aproximadamente 2,5 MΩ.

Segundo Horowitz e Hill (2017), a impedância total tem uma parte real e uma parte imaginária e é dada pela equação 4:

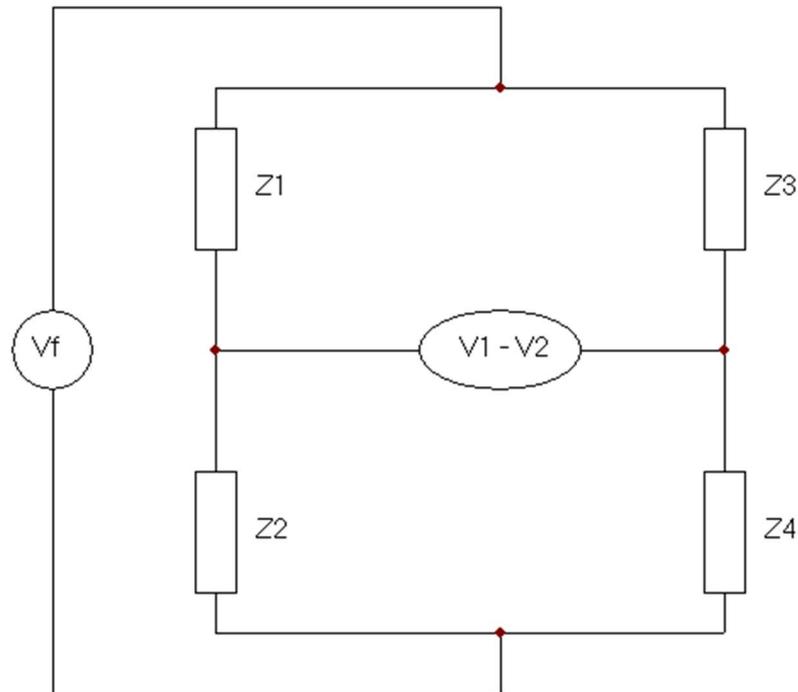
$$Z = R - jX_C \quad (4)$$

Unidade: ohm (Ω).

Onde “R” é a resistência elétrica e X_C é a reatância elétrica.

Podemos representar os resistores e capacitores do circuito através de suas impedâncias. A Figura 34 apresenta as impedâncias do sistema, considerando que Z1 e Z2 possuem resistência elétrica e reatância elétrica, devido ao potenciômetro e aos capacitores, respectivamente. Z3 e Z3 podem ser consideradas cargas completamente capacitivas por não terem resistores conectados a elas.

Figura 34: Representação das impedâncias do circuito eletrônico



Fonte: Elaborado pelo autor

Alexander e Sadiku (2013) determinam que a diferença de tensão ($V_1 - V_2$) que o multímetro ou o sistema de aquisição de dados medem para o circuito da Figura 33 pode ser calculada utilizando as seguintes equações:

$$V_1 = \left(\frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} \right) * V_f \quad (5)$$

$$V_2 = \left(\frac{Z_4}{Z_3 + Z_4} \right) * V_f \quad (6)$$

Unidade: volt (V)

Onde Z_n são as impedâncias elétricas totais de cada elemento do circuito e V_f é a tensão eficaz da fonte de tensão alternada. As equações (5) e (6) podem ser visualizadas atra

A variação de impedância elétrica Z_2 gerada pela variação das capacitâncias dos elementos sensores, produz uma mudança na tensão V_1 , o que gera uma mudança do valor da diferença de potencial entre V_1 e V_2 na saída do circuito. Essa tensão de saída pode ser mostrada por um multímetro mas também é captada pelo sistema de aquisição de dados que faz o tratamento do sinal e posterior exibição no painel frontal.

Na Figura 35 é possível visualizar o circuito eletrônico montado em uma placa de circuito impresso.

Figura 35: Circuito eletrônico de detecção



Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

O software de aquisição de dados deve realizar a medição da tensão no circuito eletrônico e fornecer ao operador do sistema a quantidade de biomassa dentro do reator. Este software foi projetado considerando um modelo de reator com 30 cm de altura, com dois sensores instalados a 8 cm do fundo do reator e outro a 16 cm do fundo do reator.

Ao realizar a calibração do sistema, foi considerado que os elementos sensores somente indicariam a presença de biomassa quando toda a frente da placa do elemento sensor estiver preenchida por biomassa. Como as placas tem 2 cm de altura e a barra rosqueada está fixada em seu centro, é indicado que a altura da coluna de biomassa, quando o sensor indicar a sua presença, é 1 cm maior que a altura de instalação. Portanto o sensor instalado a 8 cm acima da base do modelo de reator indica a presença de biomassa a partir de 9 cm de altura da coluna de biomassa, enquanto o sensor instalado na altura de 16 cm indica uma altura da coluna de biomassa com no mínimo 17 cm.

O software é composto de duas partes: diagrama de blocos, mostrado na Figura 36, e que o operador do sistema não terá acesso e painel frontal (tela) , mostrado na

Figura 37, em que o operador visualizará a situação do gaseificador de biomassa em tempo real.

O diagrama da Figura 36 realiza a medição do sinal de tensão do circuito eletrônico através do bloco *NI ELVISmx Digital Multimeter*. Este sinal é mostrado no gráfico da

Figura 37 e também é utilizado para o processamento, a fim de mostrar ao operador qual a altura da coluna de biomassa dentro do modelo de gaseificador de biomassa.

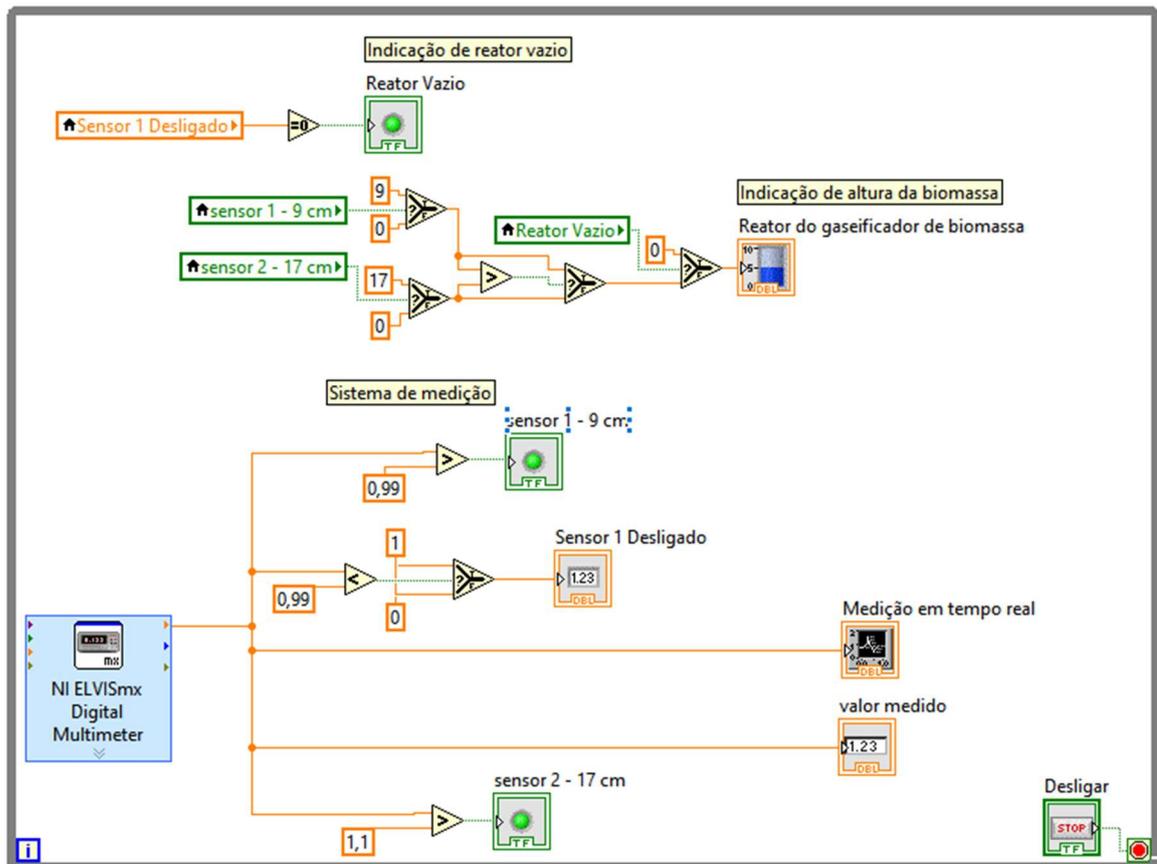
O sinal adquirido pelo bloco *NI ELVISmx Digital Multimeter* é lançado em três comparadores: comparador para indicação de sensor 1 ligado, comparador para indicação de sensor 1 desligado e comparador para indicação de sensor 2 ligado.

Os valores dos comparadores mostrados na Figura 36 foram os utilizados no teste de medição em temperatura ambiente, mas eles devem ser reajustados para o teste em temperatura elevada.

Para o diagrama da Figura 36, quando o sinal detectado for menor que 0,99 V, considera-se que o reator está vazio. Quando o sinal for maior que 0,99 V mas menor que 1,1 V, considera-se que o sensor 1 está detectando biomassa e a biomassa está acumulada em uma altura igual ou maior que 9 cm. Quando o sinal for maior que 1,1 V, representa que o sensor 2 também está detectando biomassa e a coluna de biomassa está com pelo menos 17 cm de altura dentro do reator.

Note que sempre que o sensor 2 estiver acionado, o sensor 1 também estará. Por isso para detectar reator vazio, basta que o sensor 1 não esteja detectando a presença de biomassa.

Figura 36: Diagrama de programação



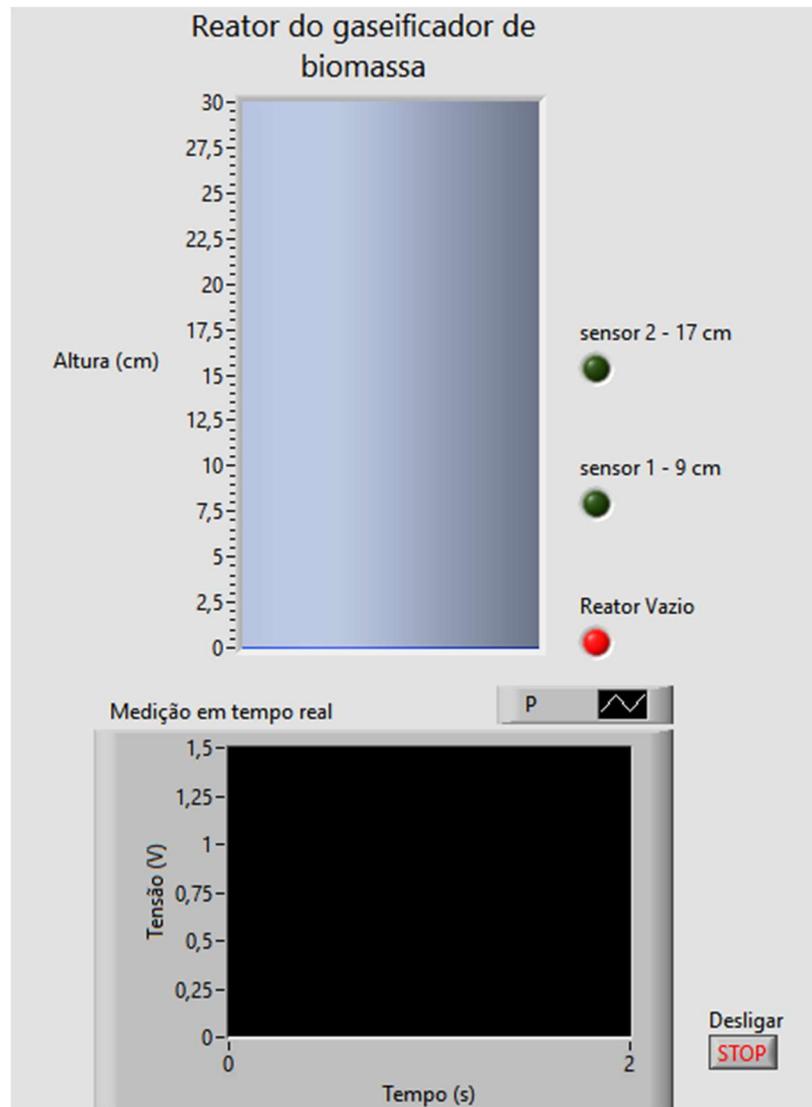
Fonte: Elaborado pelo autor

Quando o sensor 1 estiver desligado, um indicador luminoso na cor vermelha indicará ao operador que o reator está vazio. Quando o sensor 1 ou o sensor 2 estiverem ligados, um indicador luminoso na cor verde acenderá no painel frontal, indicando a presença de biomassa dentro do reator.

Caso um dos sensores acuse a presença de biomassa, ela será representada visualmente na tela apresentada na Figura 37. Uma coluna de cor azul, com a mesma altura da instalação do sensor que está detectando biomassa, aparecerá na tela, indicando o valor estimado da altura da coluna de biomassa dentro do reator do modelo de gaseificador.

O sistema realiza uma detecção por segundo e apresenta também um botão de desligar no canto inferior direito.

Figura 37: Tela do software



Fonte: Elaborado pelo autor

Este software é facilmente adaptável caso seja necessário a instalação de mais elementos sensores no reator do gaseificador de biomassa e pode ser instalado em qualquer computador pois é um arquivo executável.

4.7 TESTES DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

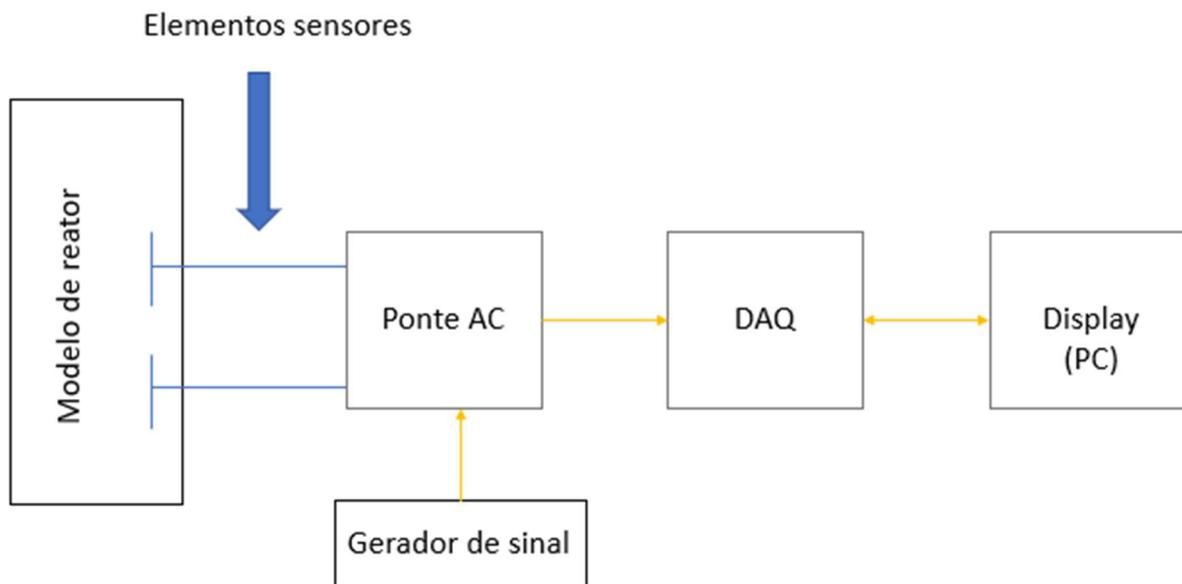
A fim de verificar o funcionamento do sistema de medição de biomassa, foram realizados dois testes:

- Teste de funcionamento em temperatura ambiente (23 °C);
- Teste de funcionamento em temperatura elevada.

4.7.1 TESTE EM TEMPERATURA AMBIENTE

Com a intenção de verificar o funcionamento de todos os componentes do sistema, foi realizado uma medição preliminar. O esquemático do sistema de medição de nível para este teste é visto na Figura 38.

Figura 38: Esquemático do sistema de medição de nível



Fonte: Elaborado pelo autor

Neste teste, todo o sistema de medição foi montado em uma bancada, conforme Figura 39. Nesta figura é possível observar, em destaque, o modelo construído para representar o reator do gaseificador, a fonte de sinal AFG1022, o circuito eletrônico, o NI myDAQ e o computador com o software em execução.

Conforme a biomassa foi sendo adicionada dentro do tubo do modelo de reator, o valor da capacitância foi medido em tempo real, com intervalo de um segundo, e convertido para um valor de tensão elétrica através do circuito eletrônico. O gráfico elaborado no software LabVIEW mostra o valor desta tensão em tempo real e a coluna que representa o reator do gaseificador está ativa.

Figura 39: Teste do sistema completo em temperatura ambiente (23 °C)



Fonte: Elaborado pelo autor

Em um primeiro momento, foi realizada a calibração do sistema. Como o software usa comparadores de tensão para saber a altura da coluna de biomassa dentro do reator, criou-se a necessidade de determinar os valores dos comparadores. Para isso, o sistema foi inicializado, sem a presença de biomassa dentro do tubo do modelo de reator e foi medida a tensão elétrica para saber qual o seu valor, visto que este valor indica que o reator está vazio.

Após, foi inserida a biomassa até ela cobrir totalmente a frente do sensor inferior, ou seja, do sensor instalado na altura de 8 cm, com o ponto mais alto da placa na altura de 9 cm. Quando isto ocorreu, foi gravado o valor da tensão medida pelo sistema.

Continuou-se a adicionar biomassa dentro do tubo até que ela cobriu totalmente a frente do sensor instalado na altura de 16 cm. Como a biomassa cobriu toda a frente do elemento sensor, consideramos que a altura da coluna de biomassa dentro do modelo do reator é de 17 cm. Foi realizada a medição da tensão para este ponto.

Todo esse processo foi repetido cinco vezes, a fim de criar uma média. Com isso foram estabelecidos os seguintes valores de comparação, que são mostrados na Tabela 4:

Tabela 4: Valores de comparação para teste em temperatura ambiente (23 °C)

Situação	Valor (V)
Reator vazio	< 0,99
Sensor 1 ativado	$\geq 0,99$
Sensor 2 ativado	> 1,1

Fonte: Elaborado pelo autor

Segundo os dados da Tabela 4, quando o valor de tensão medido pelo NI myDAQ foi menor que 0,99 V, o sistema entende que a biomassa ainda não acumulou a ponto de chegar no primeiro sensor. Consideramos isso como reator vazio.

Quando a tensão medida chegar ou ultrapassar o valor de 0,99 V, o sistema entende que a biomassa está cobrindo totalmente a frente do sensor inferior, ou seja, há a detecção de biomassa na altura de 9 cm.

Quando a tensão medida chegar ou ultrapassar o valor de 1,1 V, o sistema entende que a biomassa está cobrindo totalmente a frente do sensor superior, ou seja, há a detecção de biomassa na altura de 17 cm.

Uma interferência estava afetando os testes em temperatura ambiente. O problema foi sanado ao ser realizado o aterramento da bancada em que estavam os equipamentos. Os valores de tensão elétrica da Tabela 4 podem ser modificados através do ajuste no potenciômetro e com isso devem ser atualizados no software.

4.7.2 TESTES EM TEMPERATURA ELEVADA

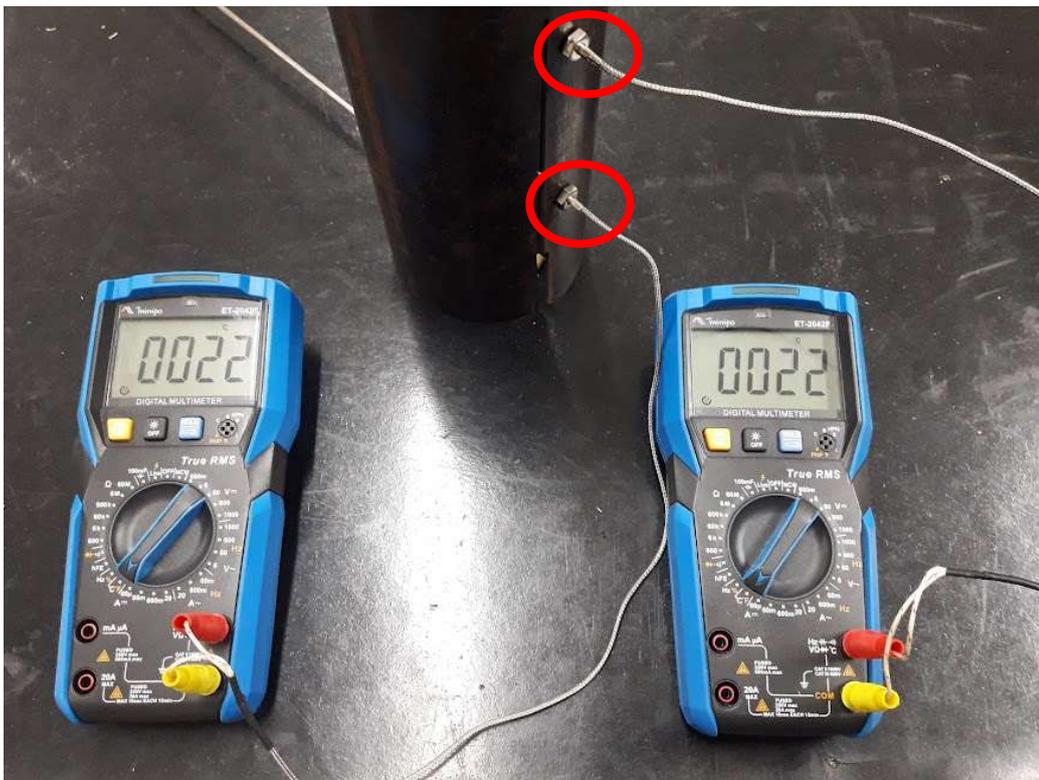
Após a construção dos elementos sensores capacitivos e os testes em temperatura ambiente, foi necessário testar o sistema em alta temperatura para verificar o funcionamento dos elementos sensores capacitivos em um ambiente com temperatura mais elevada. Este teste também analisou o comportamento dos materiais metálicos e de isolamento.

Foi utilizado o modelo de reator dos testes anteriores para este teste. Esse modelo apresenta 30 cm de altura e teve dois sensores capacitivos instalados, um a 8 cm acima do fundo do modelo e outro 8 cm acima do primeiro sensor.

Para simular a alta temperatura, foi realizado um braseiro com a queima de carvão vegetal em uma forja. A forja possui um motor elétrico que insere ar atmosférico no fogo, aumentando a temperatura do sistema.

Foi realizada a medição da temperatura dentro do tubo através da instalação de dois sensores de temperatura do tipo K, cada um fixado em frente a placa de um elemento sensor, ou seja, na altura de 8 e 16 cm, conforme detalhes na Figura 40.

Figura 40: Sensores de temperatura instalados no modelo de reator



Fonte: Elaborado pelo autor

Outro sensor de temperatura do tipo K foi instalado em uma extremidade de um dos elementos sensores, a fim de verificar qual temperatura está alcançando neste ponto. Isso foi necessário para monitor a temperatura do ponto de contato com o circuito eletrônico. Os sensores de temperatura foram conectados a multímetros digitais que realizam a demonstração do valor em sua tela. Os multímetros utilizados para esta atividade foram os modelos ET-2042F e ET-3367C que possuem a capacidade de realizar medições de temperatura de até 230°C e 1000 °C, respectivamente (MINIPA, 2019; MINIPA, 2021).

Para verificar se os sensores de temperatura estavam calibrados, eles foram posicionados dentro de um forno SSFm – 6,7 L que foi configurado para aumentar sua

temperatura até 150 °C. Foram realizadas as leituras das respostas dos sensores de temperaturas e comparadas com a temperatura indicada pelo forno. Foi constatado que eles estavam em conformidade.

A Figura 41 apresenta o sistema de teste dos elementos sensores capacitivos em alta temperatura. O sistema é composto por um braseiro, três medidores de temperatura, um medidor de capacitância elétrica e o modelo de reator com os elementos sensores instalados em paralelo.

Figura 41: Teste dos elementos sensores capacitivos em alta temperatura



Fonte: Elaborado pelo autor

O modelo de reator foi posicionado acima da saída de ar da forja, que fica localizado no centro da plataforma. Foi criado o braseiro com carvão vegetal e pellets de pinus ao lado do modelo de reator e as brasas foram colocadas dentro do modelo de reator. O motor elétrico foi ligado, injetando ar no fogo, até o sensor de temperatura inferior indicar uma temperatura de 600 °C. Após isso a chama foi abafada para que a temperatura diminuísse gradativamente com o passar do tempo. A capacitância elétrica da associação dos elementos sensores foi medida

entre as temperaturas de 100 a 500 °C, com intervalos de 50 °C. Para a medida da capacitância elétrica foi utilizado o medidor LCR POL-42.

Em um primeiro momento, foi medida a capacitância dos elementos sensores sem a presença de biomassa, somente em função da temperatura. Após isso, foi realizada a medição da capacitância elétrica com a biomassa presente em frente a placa do elemento sensor inferior que está posicionado em uma altura de 8 cm em relação a base do modelo de reator. Esta etapa pode ser observada na Figura 42.

Figura 42: Biomassa posicionada em frente a placa inferior



Fonte: Elaborado pelo autor

Em seguida, foi realizada a medição da capacitância com a biomassa em frente as duas placas dos elementos sensores capacitivos. Esta etapa pode ser visualizada na Figura 43, onde é possível verificar a presença da biomassa dentro do modelo de reator através do corte lateral do tubo.

Figura 43: Biomassa posicionada em frente as duas placas dos elementos sensores

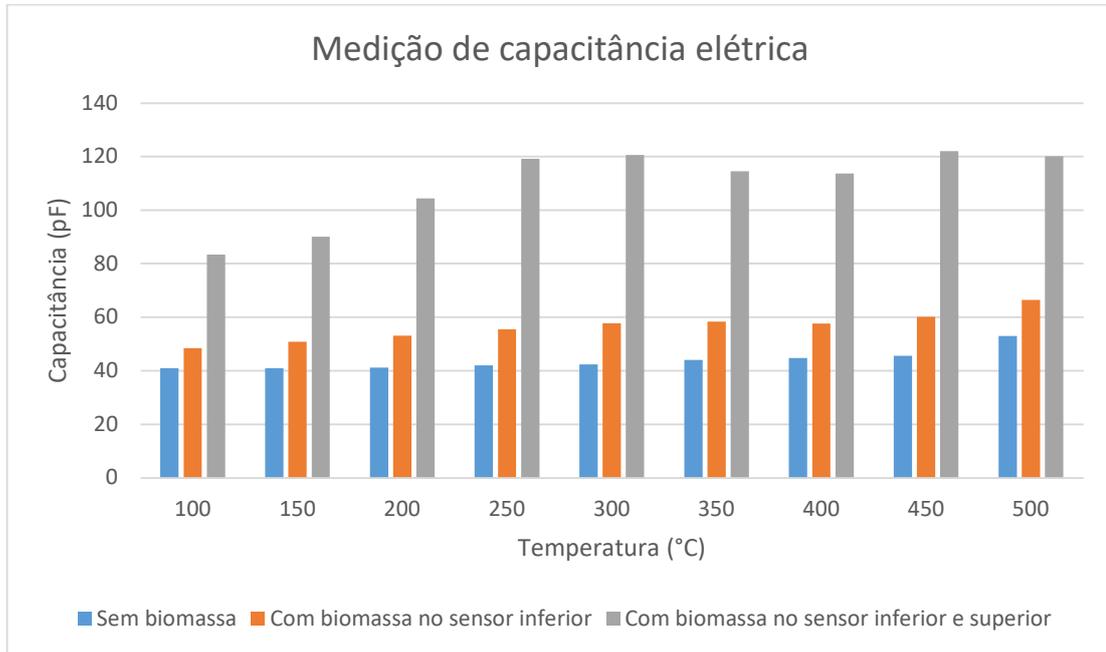


Fonte: Elaborado pelo autor

Foram realizadas dez medições de capacitância, sem a presença de biomassa dentro do modelo do reator, nove medições de capacitância com a presença de biomassa acumulada em frente a placa do sensor inferior e nove medições com a presença de biomassa acumulada em frente as duas placas de elementos sensores.

A Figura 44 apresenta os resultados das medições de capacitância. É possível verificar que a capacitância com a presença de biomassa em frente de uma ou de duas placas de elementos capacitivos, é sempre maior que a capacitância sem presença de biomassa e na mesma temperatura. Isso mostra que, para cada valor de temperatura do sistema, a capacitância aumentará quando houver biomassa na frente das placas dos elementos sensores capacitivos. Esse aumento da capacitância é causado pela mudança do valor da constante dielétrica do capacitor, visto que sem biomassa o material dielétrico é o ar e com a presença de biomassa, o material dielétrico é a biomassa.

Figura 44: Medição de capacitância em temperaturas elevadas



Fonte: Elaborado pelo autor

Portanto, é possível afirmar que os elementos sensores capacitivos construídos para altas temperaturas podem detectar a biomassa em temperaturas de até 500 °C e possivelmente podem indicar a presença de biomassa em temperaturas maiores, como necessita o protótipo de gaseificador de biomassa.

4.7.2.1 EXTRAPOLAÇÃO PARA TEMPERATURAS DE ATÉ 1100 °C

A fim de prever as medidas de capacitância para temperaturas de funcionamento do sistema no protótipo de gaseificador de biomassa de até 1100 °C, foram realizadas três regressões lineares, uma para cada caso. A primeira regressão foi realizada para o caso em que nenhum sensor está detectando biomassa, a segunda regressão foi realizada para o caso em que o sensor inferior está detectando biomassa e a terceira regressão foi realizada para o caso em que os dois sensores estão detectando biomassa. Cada regressão linear retornou uma equação linear que relaciona a capacitância elétrica em função da temperatura, onde a capacitância é representada pelo variável “y” e a temperatura é representada pela variável “x”. Segundo Neto (2002) para determinar a validade da regressão, deve ser calculado o coeficiente de determinação (R^2), o coeficiente de correlação linear de Pearson e realizada a análise de variância (ANOVA). Todos os cálculos foram efetuados através da função “Análise de dados” do Excel 2019.

O primeiro passo foi realizar a regressão linear entre a temperatura e a capacitância, sem a presença de biomassa nos elementos sensores. Utilizando os dados da Figura 44, foi montada a Tabela 5.

Tabela 5: Tabela de dados para regressão linear

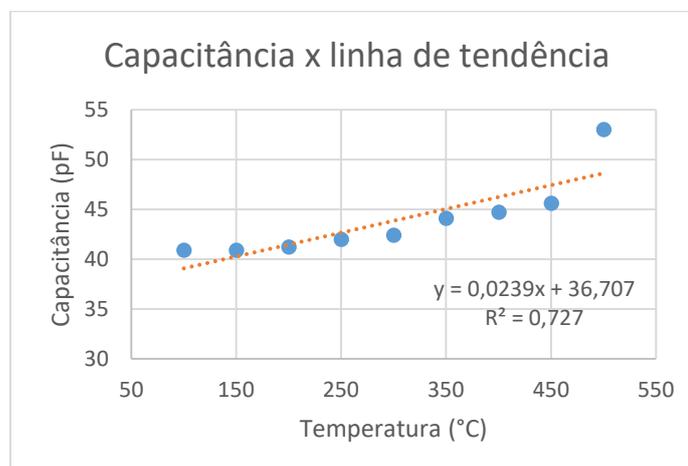
Temperatura (°C)	Capacitância (pF)
100	40,9
150	40,9
200	41,2
250	42
300	42,4
350	44,1
400	44,7
450	45,6
500	53

Fonte: Elaborado pelo autor

Os dados da tabela acima foram plotados no gráfico apresentado na Figura 45, onde os pontos em azul são os valores de capacitância elétrica medidos no teste de alta temperatura e a linha tracejada na cor laranja é a linha de tendência calculada pela equação (6), criada através do processo de regressão linear.

$$y = 0,0239x + 36,707 \quad (6)$$

Figura 45: Regressão linear para capacitância sem a presença de biomassa



Fonte: Elaborado pelo autor

O coeficiente de determinação (R^2) para essa regressão linear ficou em 0,727, ou seja, 72,7 % dos dados que forem extrapolados pela equação (6) são significativos e dependentes da temperatura.

O coeficiente de correlação de Pearson foi calculado para determinar se a relação é direta ou indireta entre a temperatura e a capacitância elétrica. Foi obtido uma correlação forte e direta de 0,8526. Isso significa que se a temperatura aumentar, a capacitância também aumentará.

Por fim, foi elaborada a análise de variância, que estabelecerá a validade da regressão linear. Para isso foram elaboradas e testadas duas hipóteses:

- H_0 : não existe regressão linear entre temperatura e capacitância elétrica quando não houver detecção de biomassa pelos elementos sensores.
- H_1 : existe regressão linear entre temperatura e capacitância elétrica quando não houver detecção de biomassa pelos elementos sensores.

Tabela 6: Análise de variância quando não há detecção de biomassa

ANOVA	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	85,44267	85,44267	18,64552	0,003488528
Resíduo	7	32,07733	4,582476		
Total	8	117,52			

Fonte: Elaborado pelo autor

A Tabela 6 traz os resultados da análise de variância para o caso em que não há detecção de biomassa pelos elementos sensores, onde o F calculado tem o valor de 18,64. Segundo Neto (2002), se o F calculado for maior que o F tabelado retirado da distribuição F de Snedecor a 5 % , então se rejeita H_0 e assumimos que a hipótese H_1 está correta, ou seja, existe relação linear entre a temperatura e a capacitância elétrica neste sistema de medição quando não houver a detecção de biomassa.

O valor de F tabelado, para este caso, segundo Neto (2002) é encontrado utilizando os graus de liberdade de 1 e 7 e isso estabelece o valor de 5,59 para o F tabelado, ou seja, é menor que o valor do F calculado (18,64). Com isso se pode confirmar estatisticamente que a regressão linear é válida e se pode extrapolar valores para temperaturas maiores.

A regressão linear também foi realizada e testada para os casos em que havia biomassa em frente da placa do sensor inferior e também com biomassa em frente dos dois sensores. As equações com valores de R^2 para esses casos são mostradas a seguir:

$$\begin{aligned} \text{Regressão para o sensor inferior} & & y = 0,03733x + 45,27778 & (7) \\ \text{detectando biomassa} & & R^2 = 0,91345 & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Regressão para os sensores inferior e} & & y = 0,08547x + 84,13778 & (8) \\ \text{superior detectando biomassa} & & R^2 = 0,67994 & \end{aligned}$$

A análise de variância para o caso onde o elemento sensor inferior está detectando biomassa é mostrada na Tabela 7, onde o F calculado é de 73,87 e é maior que o F tabelado de 5,59, portando esta regressão é estatisticamente válida. A correlação linear de Pearson para este caso é de 0,95, o que indica uma correlação direta e muito forte.

Tabela 7: Análise de variância para o caso em que o sensor inferior está detectando biomassa

ANOVA	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	209,0667	209,0667	73,87929	5,75E-05
Resíduo	7	19,80889	2,829841		
Total	8	228,8756			

Fonte: Elaborado pelo autor

A análise de variância para o caso onde os dois elementos sensores estão detectando a presença de biomassa é mostrada na Tabela 8, onde o F calculado é de 14,87 e portando é superior ao F tabelado de 5,59. Desta forma esta regressão linear também é considerada estatisticamente válida. A correlação linear de Pearson para este caso é de 0,82. O que indica uma correlação direta e forte.

Tabela 8: Análise de variância para o caso em que os dois elementos sensores estão detectando biomassa

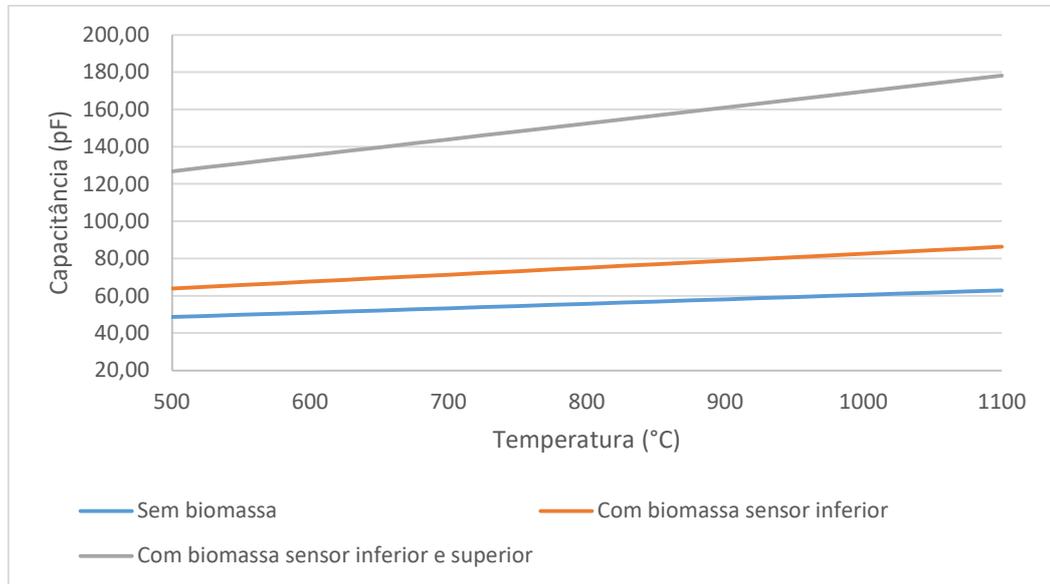
ANOVA	<i>gl</i>	<i>SQ</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>F de significação</i>
Regressão	1	1095,683	1095,683	14,87103	0,006241
Resíduo	7	515,7529	73,67898		
Total	8	1611,436			

Fonte: Elaborado pelo autor

Na Figura 46 é possível verificar a extrapolação de dados para temperaturas entre 500 e 1100 °C. Essa extrapolação indica a possibilidade de utilização dos elementos sensores para

realizar as medições de capacitância até na temperatura máxima que o protótipo de gaseificador de biomassa trabalha.

Figura 46: Extrapolação da capacitância para temperaturas entre 500 e 1100 °C



Fonte: Elaborado pelo autor

Pode-se observar que em nenhum momento há o cruzamento das retas que representam o valor de capacitância elétrica em função da temperatura e isso mostra que é possível detectar a biomassa devido a diferença do valor da capacitância elétrica causada pela presença da biomassa, mesmo com a variação de temperatura.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando que o gaseificador de biomassa é um equipamento que necessita ter um controle da quantidade de biomassa dentro de seu reator, a fim de manter sua eficiência ao máximo, o objetivo deste trabalho foi projetar um sistema de medição que possa ser aplicado em um protótipo de gaseificador de biomassa para monitorar a quantidade de biomassa acumulada no interior do reator.

Com relação às dificuldades para o desenvolvimento do trabalho, os testes em temperatura elevada foram a etapa mais complicada. Realizar as medições em um ambiente aberto, com temperaturas de até 500 °C, e com diversos equipamentos conectados apresentou grandes obstáculos.

O primeiro passo do trabalho foi determinar qual tipo de sensor melhor se encaixaria para realizar a medição, algumas alternativas comerciais foram encontradas para medir a altura da coluna de biomassa. Os sensores do tipo radiométrico e de microondas poderiam ser utilizados na medição, mas apresentam um custo financeiro muito elevado, muito maior que o custo do próprio gaseificador de biomassa. Werther (1999); Wiesendorf; Werther (2000); Huang et al. (2018) e Yan et al. (2021), determinam que o princípio capacitivo poderia ser utilizado para medição de elementos sólidos.

Para comprovar que sensores que funcionam através do princípio capacitivo podem detectar a biomassa, foi elaborado um teste em temperatura ambiente com dois sensores capacitivos industriais, os quais foram instalados em aberturas nas laterais de um tubo de aço e a biomassa peletizada foi inserida pela abertura superior do tubo. Este teste mostrou que os sensores capacitivos podem detectar elementos sólidos dentro de um tubo de aço, desde que os sensores sejam instalados de forma invasiva. Com isso, ficou provado que os sensores capacitivos detectam a biomassa peletizada que é utilizada em gaseificadores de biomassa industriais.

Para que o elemento sensor capacitivo possa ser utilizado dentro de um reator de um protótipo de gaseificador de biomassa, ele deve suportar as altas temperaturas do sistema. Para isso foram construídos elementos sensores com placas de aço e haste de aço. A curvatura da placa do elemento sensor foi testada e foi constatado que as placas retangulares com uma curvatura igual a curvatura interna do reator são a melhor opção para o gaseificador de biomassa.

A fim de detectar a variação de capacitância quando houver biomassa em frente as placas dos elementos sensores, foi projetado e construído um circuito eletrônico que transforma

a variação de capacitância em variação de tensão elétrica. Após análise de alguns circuitos, foi utilizado um circuito chamado ponte AC, que tem como função modificar a sua tensão de saída quando houver a variação de capacitância no sistema. Como somente a capacitância elétrica dos elementos sensores ligados em paralelo podem variar, quando houver biomassa em frente as suas placas, suas reatâncias elétricas e conseqüentemente suas impedâncias variam também. Com isso, somente a tensão V1 muda, mantendo V2 sempre constante. Um sistema de aquisição de dados, atuando como medidor de tensão elétrica foi escolhido para realizar a medição da diferença de potencial entre V1 e V2.

O sistema de aquisição de dados NI MyDAQ foi utilizado para realizar a medição de tensão na ponte AC e também é o dispositivo que foi programado para mostrar ao operador do gaseificador de biomassa a quantidade de material existente dentro do tubo de reator. Ele realiza a leitura da diferença de potencial, faz o tratamentos do sinal e apresenta esses dados de duas maneiras: em um gráfico que mostra a leitura de tensão elétrica, com intervalos de um segundo, e um modelo gráfico do interior do reator do gaseificador que indica a quantidade de biomassa existente dentro do reator do modelo de gaseificador de biomassa.

O sistema de medição projetado e construído para testar os elementos sensores é composto de um gerador de sinal AFG1022, que fornece um sinal senoidal de 10 Vp com frequência de 1 kHz, um circuito eletrônico de detecção de variação de capacitância e um sistema de aquisição de dados.

Todo o sistema foi testado em duas condições: temperatura ambiente (~ 23 °C) e altas temperaturas. O teste em temperatura ambiente serviu para demonstrar o funcionamento do sistema completo. Este teste demonstrou que o sistema de medição baseado em variação de capacitância pode ser utilizado para medição de materiais particulados dentro de um tubo de aço em temperatura ambiente. O teste em altas temperaturas serviu para verificar o comportamento e integridade dos componentes do sistema que ficam dentro do reator. Neste teste foi comprovado que o material utilizado na construção dos elementos sensores e na isolação elétrica suportaram a temperatura máxima de teste. A lã de vidro manteve suas propriedades isolantes, isolando eletricamente os elementos sensores do tubo metálico onde eles estavam instalados.

Não foi possível instalar todo o sistema de medição no modelo de reator para teste em altas temperaturas. Isso ocorreu pois o teste ocorreu em um modelo de reator, que tinha aberturas em uma lateral, para visualização externa da quantidade de biomassa, e na parte superior e inferior. Com isso as chamas do fogo escapavam por essas aberturas e poderiam danificar todos os equipamentos utilizados. Dessa forma, optou-se por realizar somente as

medições de capacitância elétrica com o medidor LCR. Como o circuito eletrônico de detecção já estava funcionando em temperatura ambiente e a temperatura monitorada no ponto de contato do circuito com os elementos sensores não passou de 25 °C, é possível assumir que o circuito eletrônico funcionaria também em temperaturas elevadas.

A regressão linear aplicada para extrapolar os dados medidos até a temperatura máxima de funcionamento do protótipo de gaseificador de biomassa indica que o sistema de medição tem condições de funcionar em temperaturas mais elevadas, o que é um requisito para aplicação desse sistema no gaseificador de biomassa. No protótipo de gaseificador de biomassa não haverá problemas na instalação do sistema de medição completo, visto que as temperaturas elevadas ficam restritas as partes internas do reator, que não possui aberturas.

As medidas de capacitância elétrica mostram que a capacitância varia em função da temperatura, mas varia em uma amplitude bem maior quando há presença de biomassa em frente a placa de algum dos elementos sensores. Portanto, como há variação de capacitância, haverá variação de tensão elétrica no sistema e com isso é possível indicar visualmente a um operador do sistema a quantidade de biomassa dentro do reator do gaseificador.

A instalação dos elementos sensores devem ser realizadas de forma invasiva, devido as paredes metálicas do reator, e os sensores devem ser isolados eletricamente e mecanicamente das paredes do reator com a utilização de lã de vidro. A fixação dos elementos sensores devem ser realizadas com porcas e arruelas. Desta forma será necessário realizar perfurações na lateral do reator do protótipo de gaseificador de biomassa, uma para cada elemento sensor.

Concluindo, é possível afirmar que o sensor capacitivo é o mais indicado para realizar a medição do nível de biomassa acumulada dentro do reator do protótipo de gaseificador de biomassa, comprovando a hipótese de pesquisa.

6 ESTUDOS FUTUROS

Uma das etapas com maiores dificuldades do trabalho foi a medição de capacitância elétrica no teste com temperaturas elevadas. Em função da falta de equipamentos adequados e da necessidade de realizar os testes em um modelo do protótipo de gaseificador, recomenda-se para estudos futuros a utilização de um sistema com controle fino de temperatura para realizar os testes em todas as temperaturas de funcionamento do protótipo de gaseificador e a realização dos testes com o sistema completo no próprio reator do protótipo de gaseificador de biomassa.

Foi utilizado um gerador de sinal para realizar a alimentação elétrica do circuito eletrônico e o sinal de saída do circuito Ponte AC é em sinal de tensão alternado. Sugere-se para uma etapa futura, a utilização de um circuito de alimentação projetado exclusivamente para o circuito eletrônico e que seja realizada a conversão do sinal alternado de saída para um sinal contínuo.

Para a aquisição de sinais, foi utilizada uma plataforma NI myDAQ. Sugere-se que seja realizado um projeto em um sistema supervisório industrial para ser aplicado no protótipo de gaseificador de biomassa.

Como o reator do protótipo tem um metro de altura, recomenda-se que seja estudada a possibilidade de utilização de até oito sensores para monitoramento da altura da coluna de biomassa, todos conectados em paralelo. O primeiro sensor posicionado na altura de 10 cm acima da base do reator, o segundo a 20 cm acima da base do reator e assim sucessivamente até alcançar a altura máxima de 80 cm. Caso seja necessário, mais sensores podem ser instalados na parede do reator.

O protótipo de gaseificador de biomassa apresenta dois sistemas de alimentação: alimentação de biomassa e alimentação de ar atmosférico. Sugere-se que seja estudado a possibilidade de automação desse sistema, em que o sistema de monitoramento de biomassa possa controlar os motores que controlam a entrada de biomassa e de ar. Dessa forma pode-se ter um gaseificador de biomassa com funcionamento quase que independente do operador.

Sugere-se a verificação da possibilidade de este sistema de medição ser utilizado em outros tipos de gaseificadores de biomassa, em particular os gaseificadores que possuem leito fixo.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHMAD, A. A.; ZAWAWI, N. A.; KASIM, F. H.; INAYAT, A.; KHASRI, A. **Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 53, p. 1333–1347, 2016.

ALEXANDER, C.K.; SADIKU, M.N.O. **Fundamentos de Circuitos Elétricos com Aplicações**. 5ª edição. Porto Alegre: AMGH, 2013.

ALVES, J. L. L. **Instrumentação, Controle e Automação de Processos**. 2ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

BALBINOT, A. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas - Vol. 1**. Grupo GEN, 2019. ISBN 9788521635864.

BIOECO PELLETT. **Pellet**. Cambé. 2022. Disponível em: <<https://www.bioecopellet.com.br/>>. Acesso em: 09 de maio de 2022.

BRAND, Martha Andreia. **Energia de biomassa florestal**. Rio de Janeiro: Interciência, 2010. 114 p. ISBN 9788571932449 (broch).

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 2. ed. Brasília, 2002. 243 p. Disponível em: <https://www.atneel.documents/656835/14876406/2005_AtlasEnergiaEletricaBrasil2ed/06b7ec52-e2de-48e7-f8be-1a39c785fc8bgov.br/>. Acesso em 14 Fev 2021.

BRIONES-HIDROVO, A.; COPA, J.; TARELHO, L. A. C.; et al. **Environmental and energy performance of residual forest biomass for electricity generation: Gasification vs. combustion**. Journal of Cleaner Production, v. 289, 2021.

CALLISTER JR., William D. **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. Tradução: Sérgio Murilo Stamile Soares, Luiz Claudio de Queiroz Faria; revisão técnica: Wagner Anacleto Pinheiro. - 10. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 2021.

EPE (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA). **Balço Energético Nacional - Relatório Síntese 2021 - Ano Base 2020**, 2021. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>. Acesso em: 22 de Abril de 2021.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Papel da Biomassa na Expansão da Geração de Energia Elétrica**. , p. 22, 2018. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br>>. Acesso em: 01 Fev 2021.

FIALHO, A. B. **Instrumentação Industrial - Conceitos, Aplicações e Análises**. Editora Saraiva, 2010. ISBN 9788536505190.

FRANCHI, C. M. **Instrumentação de Processos Industriais - Princípios e Aplicações**. São Paulo: Editora Saraiva, 2015. 9788536519753.

HOROWITZ, P.; HILL, W. **A Arte da Eletrônica: circuitos eletrônicos e microeletrônica**. Tradução: José Lucimar do Nascimento; Revisão Técnica: Antonio Petence Jr. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2017.

HUANG, K.; MENG, S.; GUO, Q.; et al. **High-temperature electrical capacitance tomography for gas-solid fluidised beds**. Measurement Science and Technology, v. 29, n. 10, 2018. IOP Publishing.

JNG. **Catálogo - 2016/2017 – controle e medição - Sensor Capacitivo Linha CM**. 2017. Disponível em:<http://www.jng.com.br/upload/download/%7B038BE52B-CE48-40C6-933E-81726CA82CAB%7D_132%20-%20Catalogo%202016%20Sensores-%20BR.pdf> Acesso em 26 Jun 2021.

KIRUBAKARAN, V.; SIVARAMAKRISHNAN, V.; NALINI, R.; et al. **A review on gasification of biomass**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 13, n. 1, p. 179–186, 2009.

LORA, E. E. S.; ANDRADE, R. V.; ARADAS, M. E. C. **Geração Elétrica Em Pequena Escala a Partir Da Gaseificação De Biomassa**. Proceedings of the 5th Encontro de Energia no Meio Rural, p. 1–10, 2004.

LORA, E.; VIEIRA, R.; MARTINEZ, J.; et al. **Gaseificação e pirólise para conversão da biomassa em eletricidade e biocombustíveis**. Biocombustíveis - Volume 1. January, p. 1200, 2012.

MINIPA do Brasil. Manual de Instruções ET-2042F. 2019. Disponível em:<<https://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-2042F-1102-BR.pdf>>. Acesso em 05 de maio de 2022.

MINIPA do Brasil. Manual de Instruções ET-3367C. 2021. Disponível em:<<https://www.minipa.com.br/images/Manual/ET-3367C-1114-BR.PDF>>. Acesso em 05 de maio de 2022.

NATIONAL INSTRUMENTS. **O que é o MyDAQ?**. 2021. Disponível em:<<https://www.ni.com/pt-br/shop/engineering-education/portable-student-devices/mydaq/what-is-mydaq.html>>. Acesso em: 17 de junho de 2021.

NETO, P. L. O. C. **Estatística**. 2ªed. São Paulo: Blucher, 2002.

PEKSA-BLANCHARD, M.; DOLZAN, P.; GRASSI, A.; et al. **Global wood pellets markets and industry: policy drivers, market status and raw material potential**. IEA Bioenergy Task 40, n. November, p. 120, 2007.

PEREIRA, M. F.; ARALDI, A.; MADRUGA, G. G.; SILVA, M. F. S. **Protótipo De Um Microgerador À Biomassa**. n 49, Relatório Técnico. p. 1–17, 2019.

PETRUZELLA, F. D. **Eletrotécnica II**. Tradução: Rafael Silva Alípio; Revisão técnica: Antonio Pertence Jr. Porto Alegre: Amgh, 2014. (Tekne).

PORTAL DA CONSTRUÇÃO. **Melhor multímetro digital e analógico**. 2020. Disponível em: <<https://portaldaconstrucao.com/melhor-multimetro-digital-e-analogico/>>. Acesso em 12/09/2021.

QUÉNO, L. R. M.; DE SOUZA, Á. N.; DA COSTA, A. F.; DO VALE, A. T.; JOAQUIM, M. S. **Technical aspects of wood pellet production**. *Ciencia Florestal*, v. 29, n. 3, p. 1478–1489, 2019.

ROSILLO-CALLE, Frank; BAJAY, Sergio V.; ROTHMAN, Harry (org.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Tradução de José Dilcio Rocha, Maria Paula G. D. Rocha. Campinas, SP: Ed. da UNICAMP, 2005. 447 p. ISBN 9788586806856.

RUIZ, J. A.; JUÁREZ, M. C.; MORALES, M. P.; MUÑOZ, P.; MENDÍVIL, M. A. **Biomass gasification for electricity generation: Review of current technology barriers**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 18, p. 174–183, 2013.

SÁNCHEZ, Caio Glauco (org.). **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Campinas, SP: Átomo, 2010. 430 p. ISBN 9788576701262.

SANSANIWAL, S. K.; PAL, K.; ROSEN, M. A.; TYAGI, S. K. **Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 72, n. January, p. 363–384, 2017.

SEGUNDO, A. K. R et al. **Development of capacitive sensor for measuring soil water content**. *Engenharia Agrícola*, v. 31, n. 2, p. 260–268, 2011. Disponível em : <https://www.scielo.br/j/eagri/a/k7yJZyTJ8FQchSggzrD8dXy/?lang=en>. Acesso em 25 de fevereiro de 2022.

TASNIM, R.; KHAN, S.; ARSHAD, A.; HUSSEIN, M. R. **Non-contact capacitive technique for biomass flow sensing**. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, v. 11, n. 2, p. 531–541, 2018.

THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P. U. B. **Sensores Industriais - Fundamentos e Aplicações**. 9ª edição. São Paulo. Editora Érica, 2020. 9788536520261.

WERTHER, J. **Measurement techniques in fluidized beds**. *Powder Technology*, v. 102, n. 1, p. 15–36, 1999.

WIESENDORF, V.; WERTHER, J. **Capacitance probes for solids volume concentration and velocity measurements in industrial fluidized bed reactors**. *Powder Technology*, v. 110, n. 1–2, p. 143–157, 2000.

YAN, Y.; HU, Y.; WANG, L.; et al. **Electrostatic sensors – Their principles and applications. Measurement**: *Journal of the International Measurement Confederation*, v. 169, n. September 2020, p. 108506, 2021. Elsevier Ltd. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108506>>.