

ADEQUAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO DE UM LEITO FLUIDIZADO EM ESCALA LABORATORIAL PARA APLICAÇÕES DE BIOMASSA.

Lívia F. Siqueira¹ (IC), Hugo Perazzini¹ (PQ)

¹Instituto de Recursos Naturais – Universidade Federal de Itajubá Itajubá

Palavras-chave: Bioenergia. Fluidização. Resíduos Sólidos. Secagem.

Introdução

Estudos recentes têm destacado as potencialidades de resíduos agroindustriais como biomassa para bioenergia, fornecendo uma alternativa para a solução do problema ambiental e possibilidades de gerar um subproduto de atrativo valor agregado. Contudo, é necessária a secagem prévia dos resíduos para aumentar a eficiência energética do processo de conversão termoquímica e minimizar a emissão de poluentes para que, deste modo, seja possível contribuir com a viabilidade da produção de bioenergia.

A secagem é definida como um processo de aplicação de calor, com condições controladas, para remover por evaporação grande parte da água presente em um material, ocorrendo simultaneamente transferência de calor e de massa [1]. Dentre as tecnologias de secagem disponíveis no mercado, os secadores de leito fluidizado têm se destacado, visto as possibilidades de um processamento eficiente, cuja operação abrange diferentes tipos de biomassa.

Para o monitoramento e controle adequado das grandezas que envolvem o processo de secagem, como a temperatura e a umidade das fases sólida e fluida e parâmetros fluidodinâmicos, é necessária a instrumentação do equipamento. Os instrumentos são usados para monitorar de forma contínua ou discreta o comportamento de variáveis de controle que, de alguma forma, venham a ser de interesse [2].

O propósito da presente pesquisa é adequar e instrumentar um leito fluidizado de escala laboratorial, viabilizando a aquisição futura de dados de estudos de secagem de biomassa, os quais são de suma importância para estudos de modelagem e simulação visando a otimização do processo. Uma avaliação adequada da eficiência da secagem por leito fluidizado requer a determinação de vários parâmetros experimentais, tais como a velocidade superficial do ar, a queda de pressão no leito, a distribuição de temperatura e a umidade relativa do ar na saída do secador. No entanto, para uma maior precisão na obtenção dos resultados experimentais, é importante realizar uma instrumentação do leito e desenvolver um sistema de aquisição de dados, uma vez que a determinação simultânea de todos os parâmetros experimentais é muito difícil e pode levar a erros significativos de medida. Neste trabalho, foi realizada a instrumentação e o desenvolvimento de um sistema de aquisição de dados de pressão diferencial, umidade relativa do ar e temperatura em um secador de leito fluidizado que se encontra instalado no Laboratório de Sistemas Particulados, IRN, UNIFEI.

Metodologia

Inicialmente, foi realizada uma análise de quais grandezas precisavam ser mensuradas para os experimentos de secagem de biomassa, seus respectivos sensores, faixa de validade das medidas experimentais e a resolução que os mesmos deveriam ter, visando uma aquisição qualitativa dos dados. Em seguida, foi realizada uma pesquisa de mercado, no qual foi feita a compra dos instrumentos de medida de acordo com as especificações previamente estipuladas.

Com base na pesquisa de mercado, escolheu-se o sensor SPS-F2K0 para a medição do diferencial de pressão na placa de orifício e também um sensor semelhante a ser instalado no leito fluidizado para que, a partir do diferencial de pressão (ΔP), pudesse ser calculada a velocidade superficial do ar a partir da Equação (1), a qual foi obtida a partir de trabalhos anteriores de calibração da placa de orifício [3].

$$V = 0,1436 \times \sqrt{1,722 \times \Delta P} \quad (1)$$

Como o diferencial de pressão na placa de orifício era maior que o diferencial medido no leito, foi necessária fazer uma adequação na escala dos sensores. Para fazer a leitura dos sensores, foi feita uma rotina de programação utilizando o micro controlador Arduino® Mega 2560 (Figura 1) com sua respectiva interface.

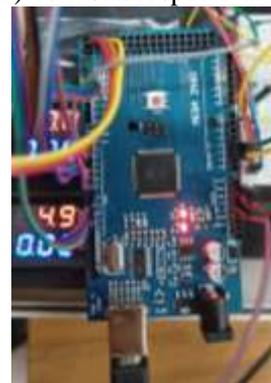


Figura 1 - Arduino® Mega 2560 acoplado ao sistema.
Fonte: (AUTORES, 2023).

A fim de comparar as leituras feitas pelos sensores e fazer a sua calibração, foi utilizado dois manômetros de coluna d'água tipo U como referência, um com inclinação de 30° alocado junto ao sensor do leito fluidizado e o outro de 33° de inclinação junto à placa de orifício. A diferença de pressão medida pelos manômetros foi calculada a partir da altura da coluna d'água utilizando a Equação (2).

$$\Delta P = \rho g L \left[\sin \theta + \left(\frac{d}{D} \right)^2 \right] \quad (2)$$

Em que ρ é a densidade da água (1000 kg/m³), g é a aceleração da gravidade (9,8 m/s²), L é a altura da coluna

d'água (m), θ é o ângulo de inclinação da coluna d'água, d o diâmetro da mangueira do manômetro (0,5 m) e D o diâmetro do recipiente do manômetro que contém a água (11,5 m).

A comparação das leituras dos sensores com o manômetro utilizando a coluna d'água foi feita separadamente, ou seja, primeiro fez-se a comparação com o sensor alocado na placa de orifício e posteriormente com o sensor instalado no leito. Considerando o valor medido pelo manômetro o de referência e os dos sensores o valor real observado, foi possível analisar a correlação dos dados a partir do Coeficiente de Determinação (R^2), quanto mais próximo da unidade, a equação de calibração gerada por um editor de planilhas poderia ser usada como a equação de calibração de cada um dos sensores. A faixa de pressão analisada no leito fluidizado foi de 0 a 150Pa e na placa de orifício foi de 0 a 1200Pa. A Figura 2 apresenta o modelo do sensor SPS-F2K0 utilizado para medição do diferencial de pressão no sistema.



Figura 2 - Sensor de pressão instalado próximo à placa de orifício.
Fonte: (AUTORES, 2023).

A próxima etapa foi a seleção do sensor de umidade relativa do ar a ser instalado na saída do leito. Como a umidade é uma grandeza de grande relevância para a análise do processo de secagem, isto é, a partir destes dados é possível estimar a umidade da biomassa por balanços de massa, escolheram-se dois sensores de umidade com resoluções distintas, ambos também mediam a temperatura no local em que foram instalados. O sensor HTU2X (Figura 3) possui uma resolução maior que o sensor AHT10 (Figura 4). Para analisar o comportamento da umidade relativa do ar em função do tempo, utilizaram-se partículas úmidas de alumina (Al_2O_3), as quais foram dispostas no leito fluidizado com uma corrente de ar a 70°C. Foram realizados dois experimentos de secagem com as mesmas condições de operação, cada uma realizada com um dos dois tipos de sensores de umidade mencionados e também utilizando duas rotinas distintas desenvolvidas na interface do micro controlador Arduino®. Os dados coletados foram analisados e selecionou-se o sensor mais adequado para o sistema.



Figura 3 - Sensor de umidade relativa do ar e temperatura HTU2X.
Fonte: (AUTORES, 2023).



Figura 4 - Sensor de umidade relativa do ar e temperatura AHT10.
Fonte: (AUTORES, 2023).

Para a medição das temperaturas ao longo da coluna do leito fluidizado, foram utilizados quatro Termopares tipo T que, por intermédio do módulo MAX6675 conectado em cada um deles, faziam a comunicação com o micro controlador. Os termopares e o módulo utilizados estão apresentados nas Figuras 5 e 6, respectivamente.



Figura 5 - Termopares tipo T utilizados.
Fonte: (AUTORES, 2023).



Figura 6 - Módulo MAX6675 conectado a um dos termopares.
Fonte: (AUTORES, 2023).

Utilizando um Banho Ultratermostático e variando a temperatura da água a cada 5°C de 15 até 85°C, fez-se as leituras dos quatro termopares simultaneamente utilizando uma programação feita no Arduino®. As leituras de cada termopar foram comparadas à temperatura de referência do banho no momento das medições. A partir da análise da correlação dos dados (como também realizado para os medidores de pressão diferencial), encontrou-se a equação de calibração dos termopares.

Com todos os sensores calibrados, desenvolveu-se um programa que englobasse todas as programações utilizadas anteriormente de forma individual para cada um dos sensores, possibilitando a visualização simultânea e em tempo real de todas as grandezas medidas e calculadas em uma planilha automatizada no Excel®.

Resultados e discussão

Para o sensor de pressão instalado na placa de orifício obteve-se os dados apresentados na Figura 7, sendo a Pressão Medida a lida pelos sensores e a Pressão

Teórica aquela calculada a partir da Equação (2), utilizando a altura da coluna d'água lida no manômetro. Obteve-se um valor de 0,9952, o qual é próximo à unidade. Infere-se que os dados possuem uma alta correlação e, assim, é viável utilizar a equação da reta (Equação (3)) como a de correção das leituras feitas pelo sensor, aproximando-as da pressão teórica. Dessa forma, a equação da reta foi adicionada ao programa feito no Arduino® para que as leituras feitas já fossem apresentadas com o valor corrigido, trazendo maior confiabilidade aos dados aquisitados.

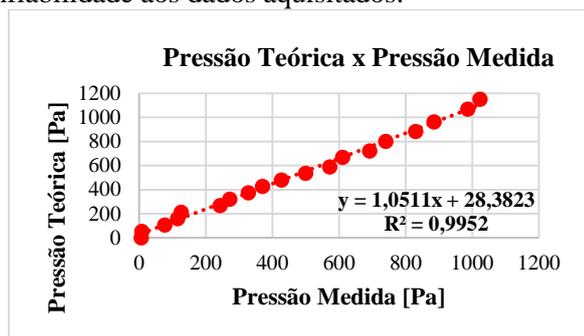


Figura 7 - Pressão teórica e medida pelo sensor na placa de orifício.
Fonte: (AUTORES, 2023).

A Equação (3) apresenta a equação para correção dos dados lidos pelo sensor de pressão instalado na placa de orifício, em que y é o valor de pressão diferencial corrigido e x é o diferencial medido pelo sensor.

$$y = 1,0511x + 28,3823 \quad (3)$$

Já para o sensor de pressão diferencial localizado no leito foram obtidos os dados apresentados na Figura 8, sendo a Pressão Medida a lida pelos sensores e Pressão Teórica a calculada a partir da Equação (2) e dos dados de altura da coluna d'água do manômetro. Obteve-se um R^2 de 0,9979 que também se aproxima à unidade, tornando viável a utilização da equação da reta (Equação (4)) para a correção das leituras de diferencial de pressão no leito feitas pelo sensor, aproximando-as da pressão teórica. A Equação (4) de correção foi incorporada ao programa computacional para que as leituras fossem apresentadas já corrigidas.

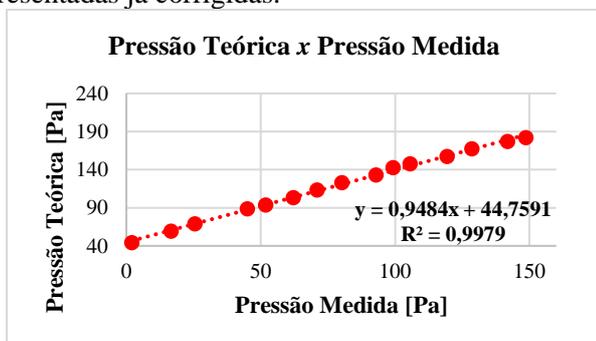


Figura 8 - Pressão teórica e medida pelo sensor no leito fluidizado.
Fonte: (AUTORES, 2023).

A Equação (4) apresenta a equação para correção dos dados lidos pelo sensor de pressão localizado no leito fluidizado, em que y é o valor de pressão diferencial corrigido e x é o diferencial medido pelo sensor.

$$y = 0,9484x + 44,7591 \quad (4)$$

A partir da secagem de partículas de alumina úmidas foram coletados dados de umidade relativa e temperatura do ar na saída do leito pelos sensores HTU 2X e AHT10, apresentados nas Figuras 9 e 10, respectivamente.

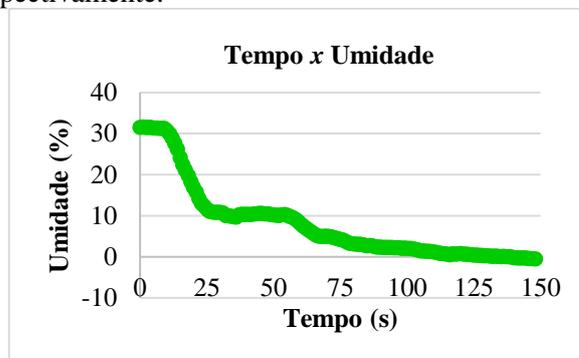


Figura 9 - Umidade relativa do ar em função do tempo obtidas pelo sensor HTU2X.

Fonte: (AUTORES, 2023).

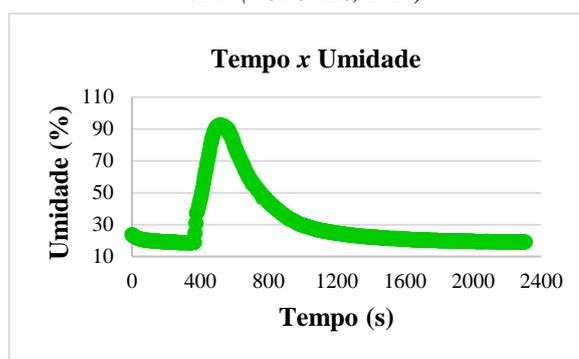


Figura 10 - Umidade relativa do ar em função tempo obtidas pelo sensor AHT10.

Fonte: (AUTORES, 2023).

Durante a secagem de um material úmido, espera-se que ao adicioná-lo no leito, ocorra um aumento da umidade na saída do mesmo e, com o passar do tempo, essa umidade diminui até atingir a umidade inicial, que é a umidade do ar antes da secagem, indicando que o material foi seco. Isso ocorre devido à transferência de umidade proveniente do sólido para o ar na forma de vapor. No início da secagem, a umidade relativa do ar aumenta significativamente e, à medida que o sólido é seco, a umidade relativa do ar diminui. Analisando o comportamento do sensor HTU2X (Figura 9), os valores de umidade não foram coerentes com o que é esperado da secagem, como comentado, apresentando, inclusive, valores menores que zero. Já para o sensor AHT10 (Figura 10), as medições de umidade feitas pelo mesmo possui o comportamento esperado, apresentando valores altos de umidade logo após a inserção do material e uma queda gradual até que o valor da umidade inicial fosse atingido novamente. Isso mostra, que é possível estudar a transferência de calor e massa existentes no processo de secagem, uma vez que o comportamento do dado de umidade em função do tempo está adequado ao princípio do processo de secagem.

O sensor AHT10 possui uma resolução menor que o HTU2X, tendo uma sensibilidade menor à variação

de umidade, contudo, os dados obtidos não possuem fundamentação física. Dessa forma, o sensor selecionado para a medição de umidade e temperatura no topo da coluna do leito fluidizado foi o AHT10.

A partir das temperaturas empregadas como referência no Banho Ultratermostático e da média das temperaturas medidas por cada um dos quatro termopares, foi possível desenvolver o gráfico de dispersão apresentado na Figura 11. Nele é possível perceber a boa linearidade dos dados de cada um dos termopares e analisar os Coeficientes de Determinação (R^2) apresentados na Tabela (1), juntamente com suas respectivas equações.

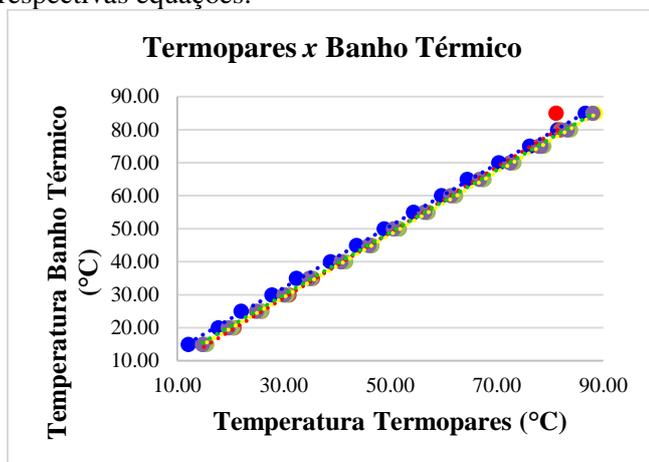


Figura 11 - Temperatura do banho térmico e dos termopares calibrados.

Fonte: (AUTORES, 2023).

Tabela 1: Termopares e seus respectivos R^2 e Equação.

Termopar	R^2	Equação
1	0,9997	$y = 0,9370x + 4,0016$
2	0,9948	$y = 0,9905x - 0,6991$
3	0,9997	$y = 0,9476x + 0,8212$
4	0,9998	$y = 0,9465x + 1,5428$

Fonte: (AUTORES, 2023).

Como todos os Coeficientes são próximos à unidade, comprovando a alta correlação entre os dados, foi possível fazer a correção das leituras de cada um dos sensores a partir das suas respectivas equações. Assim, essas equações foram implementadas na programação juntamente àquela feita para os outros sensores do sistema instrumentado no presente trabalho.

Tendo-se todos os sensores com suas respectivas equações de calibração, foi possível desenvolver um programa que apresenta as leituras de todos os sensores em tempo real a cada 5 segundos. A Figura 12 demonstra parte de uma planilha no Excel®, interface onde os dados lidos pelo micro controlador são apresentados e podem ser monitorados em tempo real.

P.dif-Placa de orifício [Pa]	P.dif-Leito [Pa]	V. fluido [m/s]	Umidade [%]	Temp. 1 [°C]
1103.66	47.08	6.26	23.7	70.76
1103.66	45.22	6.26	23.3	70.76
1103.66	46.15	6.26	22.8	70.29
1103.66	45.22	6.26	22.4	70.29
1103.66	47.08	6.26	22.1	70.29
1103.66	47.08	6.26	21.9	70.06
1103.66	47.08	6.26	21.6	69.59
1103.66	46.15	6.26	21.3	69.12
1103.66	47.08	6.26	21.2	68.89
1103.66	46.15	6.26	21	69.59
1103.66	46.15	6.26	20.8	69.59

Figura 12 - Exemplificação da parte de uma coleta de dados feita com a instrumentação desenvolvida.

Fonte: (AUTORES, 2023).

Conclusões

A partir da seleção dos sensores e suas respectivas calibrações, foi possível fazer o monitoramento em tempo real do diferencial de pressão em diferentes pontos do sistema, da velocidade superficial do fluido, da variação da temperatura ao longo da coluna do leito fluidizado, assim como da umidade do ar na sua saída. Dessa forma, o estudo das grandezas que envolvem o processo de secagem de biomassa foi viabilizado, permitindo que a coleta de dados e o controle das grandezas sejam feitos mais facilmente e com maior precisão. Além disso, a calibração de todos os sensores garante que os dados obtidos do processo de secagem sejam confiáveis e reflitam o real valor das grandezas. Com a instrumentação realizada na presente pesquisa, o leito fluidizado se encontra adequado para as pesquisas futuras de secagem de biomassa e outros estudos de interesse que serão realizadas pelo grupo de pesquisa Núcleo de Estudos em Sistemas Particulados.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI o apoio prestado para o desenvolvimento do presente trabalho.

Referências

- [1] LUIZ, M. R. Estudo Teórico e Experimental de Secagem de Tomate (*Lycopersicon esculentum*). Trabalho de conclusão de curso (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal da Paraíba, UFPB, João Pessoa, 2012.
- [2] FIALHO, Arivelto Bustamante. Instrumentação Industrial: conceitos, aplicações e análises. 7. ed. São Paulo: Érica/Saraiva, 2010. 280 p.
- [3] Oficina Piloto de Engenharia Química. Relatório Final de Projeto de Extensão. PROEX, UNIFEI, 2017.