

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**PEDRO AUGUSTO BOLLER**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR DE BANCADA EM CICLO FECHADO  
COM CONTROLE DE TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM**

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2021**

**PEDRO AUGUSTO BOLLER**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR DE BANCADA EM CICLO FECHADO  
COM CONTROLE DE TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentada como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).  
Orientador: Prof. Dr. Guilherme Bertoldo.  
Coorientadores: Prof. Dr. Camila Nicola Boeri Di Domenico; Prof. Dr. Vilmar Steffen.

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2021**

**PEDRO AUGUSTO BOLLER**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SECADOR DE BANCADA EM CICLO FECHADO  
COM CONTROLE DE TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química da Universidade  
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 24/agosto/2021

---

Guilherme Bertoldo  
Doutor em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Camila Nicola Boeri Di Domenico  
Doutora em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Vilmar Steffen  
Doutor em Engenharia Química  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

“A folha de aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

**FRANCISCO BELTRÃO**

**2021**

## **AGRADECIMENTOS**

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus, por ter permitido que eu tivesse saúde e determinação para não desanimar durante o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de deixar registrado o meu reconhecimento aos meus pais Anete Maria Riboli Boller e Pedro Boller por todo o suporte e incentivo para a realização deste trabalho, e também pela compreensão nos momentos de minha ausência.

Também gostaria de agradecer a minha namorada Suelen Lopes, por todo o amor, paciência e incentivo.

Agradeço muito ao meu orientador Guilherme Bertoldo por me guiar nessa trajetória, por todos os conselhos, ajuda e persistência.

Agradeço aos meus coorientadores Camila Nicola Boeri Di Domenico e Vilmar Steffen por todo apoio na montagem da estrutura do secador, e na execução dos testes de secagem.

Agradeço a todos os colegas com quem convivi durante os anos de curso, pelo companheirismo e troca de experiências que me permitiram crescer muito.

Agradeço a UTFPR por todo conhecimento essencial no meu processo de formação profissional.

Por fim, também gostaria de agradecer a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para a realização deste trabalho.

## RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a construção de um secador de bancada automatizado com controle de temperatura do ar de secagem. A parte estrutural do secador foi construída utilizando chapas de aço inox e peças feitas em impressora 3D, e a parte elétrica foi produzida usando o Arduino, sensores de temperatura e umidade, célula de carga, relés de estado sólido e um secador de cabelo que foi modificado. Para controlar o secador elaborou-se um código na linguagem C++ do Arduino que simula um controlador PID. Para que o usuário final consiga utilizar o secador de forma melhorada, foi feita uma interface gráfica na linguagem Python, que consegue plotar os gráficos dos sensores de temperatura, umidade e da massa da célula de carga em tempo real, além de possibilitar o controle total do secador, com opções de ligar e desligar o controle, mudar os parâmetros do PID durante o processo de secagem, gerar dados da secagem com base no número de pontos informados, e diversas outras funções. No final da construção, foram feitos alguns ensaios de secagem utilizando grãos de milho com o objetivo de testar a eficiência do secador. Apesar de alguns pequenos problemas, os resultados se mostraram muito promissores, visto que o secador conseguiu executar todas as funções programadas e reduziu de forma considerável a umidade dos grãos. Os principais problemas encontrados foram na parte da eletrônica do secador, mais especificamente na célula de carga, pois o valor medido oscila com a variação da temperatura.

**Palavras-chave:** arduino; secagem de grãos; controle de temperatura; controle pid.

## ABSTRACT

This work aimed to build an automated bench dryer with air temperature drying control. The structural part of the dryer was built using stainless steel sheets and parts made in a 3D printer, and the electrical part was made using Arduino, temperature and humidity sensors, load cell, solid state relays and a hair dryer that was modified. To control the dryer, a code was written in Arduino's C++ language that simulates a PID controller. In order for the end user to be able to control the dryer in an improved way, a graphical interface was made in Python language, which can plot the graphs of the temperature, humidity and load cell mass sensors in real time, in addition to allowing full control of the dryer, with options to turn the control on and off, change the PID parameters during the drying process, generate drying data based on the number of points entered, and several other functions. At the end of construction, some drying tests were carried out using corn grains in order to test the dryer's efficiency. Despite some minor problems, the results were very promising, since the dryer was able to perform all programmed functions and considerably reduced grain moisture. The main problems found were in the part of the dryer's electronics, more specifically in the load cell, as the measured value fluctuates with temperature variation.

**Keywords:** arduino; grain drying; temperature control; pid control.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Taxa de secagem típica sob condições constantes. ....	15
Figura 2 - Exemplo de malha de controle de um trocador de calor.....	17
Figura 3 - Esboço do protótipo do secador.....	20
Figura 4 - Circuito do secador .....	24
Figura 5 - Estrutura do secador.....	30
Figura 6 - Imagem do Arduino nano acoplado na placa tipo ilha. ....	31
Figura 7 - Configuração dos relés .....	32
Figura 8 - Popup para escolha da porta serial.....	33
Figura 9 - Interface do secador .....	34
Figura 10 – Umidade Instantânea em função do tempo (experimento 1) .....	37
Figura 11 - Umidade relativa em função do tempo (experimento 1) .....	38
Figura 12 - Temperatura de secagem em relação ao tempo (experimento 1) .....	39
Figura 13 – Umidade Instantânea em função do tempo (experimento 2) .....	40
Figura 14 - Temperatura de secagem em relação ao tempo (experimento 2) .....	41
Figura 15 - Temperatura de secagem em relação ao tempo (experimento 2) .....	41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conexão dos fios do secador .....	31
Tabela 2 - Umidade inicial das amostras.....	36
Tabela 3 - Umidade final dos experimentos .....	37



## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>SECAGEM.....</b>	<b>13</b>
<b>2.2</b>	<b>CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE SECAGEM DO MILHO .....</b>	<b>15</b>
<b>2.3</b>	<b>MÉTODO DE CONTROLE .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4</b>	<b>ESTUDO SOBRE PROCESSOS DE SECAGEM .....</b>	<b>19</b>
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO SECADOR DE BANCADA.....</b>	<b>20</b>
3.1.1	Projeto do secador com CAD.....	20
3.1.2	Projeto eletroeletrônico .....	21
3.1.2.1	Sensores e atuadores .....	21
3.1.2.2	Microcontrolador .....	23
3.1.2.3	Diagrama do circuito .....	24
3.1.3	Projeto da interface gráfica .....	25
3.1.4	Materiais da estrutura .....	26
3.1.5	Verificação dos componentes .....	26
<b>3.2</b>	<b>VALIDAÇÃO DO SECADOR ATRAVÉS DA SECAGEM DE MILHO .....</b>	<b>27</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>29</b>
<b>4.1</b>	<b>MONTAGEM DO SECADOR .....</b>	<b>29</b>
<b>4.2</b>	<b>VERIFICAÇÃO DOS COMPONENTES .....</b>	<b>32</b>
<b>4.3</b>	<b>INTERFACE GRÁFICA.....</b>	<b>33</b>
<b>4.4</b>	<b>EXPERIMENTOS DE SECAGEM DO MILHO .....</b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>42</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A secagem é um processo de transferência de calor e de massa, que envolve a remoção de um líquido (normalmente a água) de um sólido ou semissólido. Devido a sua grande importância e facilidade de execução, a secagem é considerada uma das operações unitárias mais importantes na engenharia. Os processos de secagem são muito utilizados em diversos setores da indústria como, por exemplo: agricultura, química, biotecnologia, farmácia, alimentos, entre outros (COSTA, 2007).

De acordo com Mujundar (2014), o processo de secagem pode ser definido como a ocorrência de dois processos de transferência diferentes. O primeiro é a transferência da energia em forma de calor da vizinhança do sólido a ser secado, para evaporar a umidade na superfície. O segundo é transferência da massa de água existente no interior do sólido para a camada externa, e a repetição do primeiro processo. A velocidade da secagem é governada pela taxa com que estes dois processos de transferência ocorrem.

Sabe-se que o processo de transferência de energia pode ocorrer de três formas: por condução, radiação e convecção, assim como pela combinação dos três efeitos, em alguns casos. No caso da secagem, apenas pode ocorrer transferência de energia na forma de radiação e convecção, e o modo da transferência depende de diversos fatores, como o objetivo da secagem, o tipo do produto a ser secado ou se o processo é natural ou artificial.

A secagem natural consiste em expor o sólido por longos períodos à radiação solar, sob condições climáticas de temperaturas muito altas. É um método muito barato, mas devido ao grande tempo utilizado na secagem e dependência de clima favorável, é um método pouco utilizado na maior parte dos casos. A secagem artificial consiste no emprego de técnicas que aumentam a velocidade da secagem, com o uso de secadores. As principais vantagens dos secadores artificiais são a alta qualidade de secagem, praticidade e maior capacidade de secagem (EMBRAPA, 2012).

Uma técnica muito utilizada na secagem artificial de grãos para simulações e análises, é a secagem convectiva em camada fina, que pode ser definida como secagem a altas temperaturas com uma amostra de grãos de espessura que não

ultrapasse um grão. Algumas vantagens deste método são que pela amostra ser pequena, as variações da umidade relativa do ar e temperatura em decorrência da secagem são desprezíveis, deixando o processo de secagem mais simples (BORGES, 2016).

Caso o grão tenha uma umidade inicial elevada, é necessária uma baixa temperatura de secagem, entre 40°C a 60°C. De acordo com Silva (2008b), isso é necessário para que se tenha uma migração da umidade no interior do grão para a camada exterior. Caso essa medida não seja adotada, é possível ocorrer endurecimento superficial do grão, o que dificulta a evaporação da umidade em seu interior. Para garantir esta condição ideal desse processo, é possível utilizar controladores para manter a temperatura de secagem no valor desejado.

Um problema atual para a coleta de amostra de dados de secagem, é o erro decorrente das subseqüentes medidas que são necessárias para medir as taxas de secagem e ver sua eficiência. Esse erro normalmente ocorre devido à interrupção da secagem para medir a massa, pois pode ocorrer perda da amostra durante a pesagem (MONTE, MARTINS, *et al.*, 2008). Estes erros podem ser reduzidos ou até mesmo eliminados com a utilização de técnicas de controle de processos.

No mundo moderno, o emprego de controladores e microcontroladores está cada vez mais frequente. Atualmente, estabilidade, precisão e segurança são muito necessários em qualquer sistema e projeto da engenharia. Muitos controladores industriais usam esquemas de controle PID. O controle PID é um sistema muito interessante quando se deseja fazer o controle de variáveis contínuas, como por exemplo a temperatura. Ele permite que o sistema opere de forma estável nas condições desejadas, mesmo quando existem perturbações ou vibrações no meio. Sabe-se que o controle PID provou ser de grande utilidade, garantindo um controle satisfatório na área de sistemas de controle de processos (OGATA, 2010). Esta estratégia de controle pode ser implementada por meio de hardwares livres, como o Arduino (STEVAN, ADAMASHUK, 2015).

Segundo OLIVEIRA, C.L. V. ZANETTI (2020), o Arduino além de ser uma plataforma bastante amigável a novos usuários, também é muito famosa e utilizada por pessoas interessadas na área de automação e controle. Por este motivo, o Arduino

hoje em dia possui diversas bibliotecas de funções, algumas criadas por empresas e outras por usuários, para as mais diversas finalidades. Algumas destas bibliotecas têm como função a integração do Arduino com outras linguagens de programação, como a linguagem Python por exemplo.

O Python, por sua vez, é uma linguagem de programação bastante utilizada atualmente, por diversos fatores, como por exemplo a sua portabilidade, facilidade de aprender, robustez e grande aplicabilidade, principalmente em projetos de automação ou banco de dados.

Pensando nesses atrativos, o propósito deste trabalho foi criar um secador de bancada com controle automatizado da temperatura do ar de secagem de grãos, através do uso de um microcontrolador Arduino e de técnicas de controle PID, e também usando uma interface gráfica programada em Python para executar o controle. O dispositivo construído também foi testado para a validação do seu funcionamento, com a utilização de grãos de milho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo está estruturado da seguinte forma: primeiramente são abordados os princípios da secagem, em seguida são abordados os princípios do controle de processos, e por fim é feita uma análise dos trabalhos sobre o tema feitos até aqui.

### 2.1 Secagem

Sabe-se que cada produto possui suas próprias características e parâmetros necessários para a secagem, como pode ser visto nos trabalhos de Silva (2008b) e Costa (2007).

A compreensão do processo de secagem é de fundamental importância para o entendimento de como montar um secador eficiente (SILVA, 2008b). Tem-se o conhecimento de que a umidade relativa e a temperatura são parâmetros de vital importância para este processo, como será visto a seguir.

A secagem de produtos tem por definição a operação de remoção da umidade presente dentro e nas vizinhanças do sólido em questão na forma de uma fase gasosa insaturada por meio de um mecanismo de aumento de sua pressão de vapor, que pode ser alcançado pelo aumento da temperatura por exemplo. (BARBOSA, 2015).

A umidade pode ser classificada como ligada ou não ligada. Quando a umidade é ligada, ela está presente como solução dentro do sólido, ou mesmo presa na sua microestrutura, por isso é considerada uma umidade difícil de ser retirada. A umidade não ligada é a umidade em excesso, presente na superfície do sólido e dentro de seus poros (MCCABE, SMITH, *et al.*, 1993)

Sólidos úmidos podem ser classificados em três categorias (MUJUMDAR, 2014) :

**Meio capilar poroso não higroscópico:** Sólidos porosos sem capacidade de absorver água como por exemplo areia, minérios quebrados e cerâmica.

**Meio capilar poroso higroscópico:** Sólidos porosos com capacidade de absorver água, como por exemplo argila, madeira e grãos.

**Meio coloidal não poroso:** São sólidos não porosos com pouca capacidade de perder umidade interna, por isso são classificados como fisicamente ligados, como por exemplo alguns alimentos ou cola.

A umidade não ligada pode ser retirada de duas maneiras: vaporização ou evaporação.

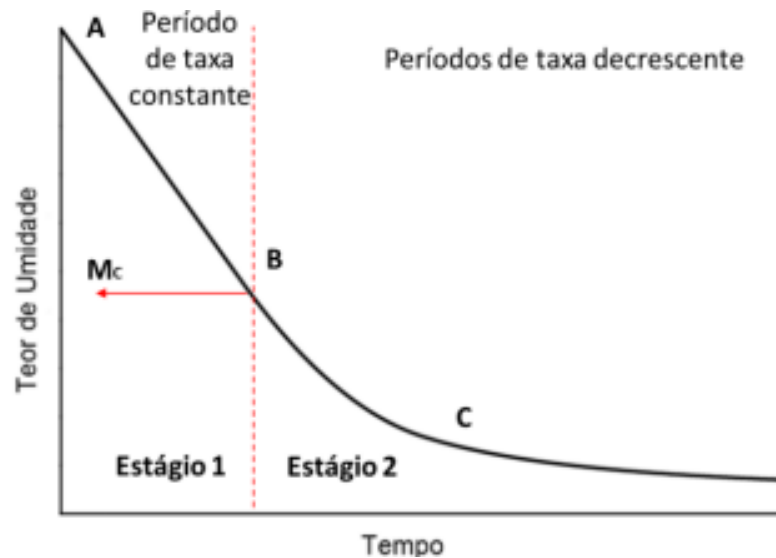
A evaporação ocorre quando o sólido é secado na temperatura de ponto de bolha do líquido presente no seu interior. McCabe et al. (1993) afirmam em seu livro que a secagem por evaporação é muito comum na indústria. Porém, na secagem de alguns produtos, como os alimentícios, essa secagem pode promover danos irreversíveis em sua estrutura (SILVA, 2008a).

A vaporização ocorre quando utilizamos ar quente, levando a umidade da superfície do sólido através da convecção.

Se o produto é higroscópico, a sua taxa de secagem é diferente dependendo da quantidade de umidade presente em seu interior. Durante o primeiro estágio da secagem(A), o produto possui muita umidade livre, fazendo com que a taxa de secagem seja constante, governada pela convecção do ar. Perto do final deste primeiro estágio, a quantidade de líquido na superfície começa a ficar muito escassa, fazendo com que o processo de difusão comece a ocorrer a partir do interior do sólido, tomando o lugar da convecção no controle da velocidade da secagem, nesse segundo estágio com taxa decrescente(B). Caso a secagem ocorra por tempo suficiente, pode chegar no último estágio(C), em que a umidade fica tão baixa que começa a aparecer manchas secas na superfície do sólido (MUJUMDAR, 2014).

As informações comentadas acima podem ser visualizadas na figura 1 abaixo:

**Figura 1 - Taxa de secagem típica sob condições constantes.**



**Fonte:** GOMEZ, MAGALHÃES, *et al.* (2020).

A secagem também depende da pressão de vapor do líquido presente no sólido e do ar utilizado na secagem. Se a pressão de vapor do sólido for maior que a do ar, a secagem ocorre normalmente. Se for menor, o sólido vai começar a umedecer, e se as duas pressões estiverem iguais, o sistema entra em equilíbrio higroscópico (SILVA, 2008b).

## **2.2 Características do processo de secagem do milho**

O monitoramento e controle da umidade relativa do produto em questão é muito importante para que o processo de secagem ocorra de forma satisfatória. De acordo com a EMBRAPA (2021) o milho geralmente é colhido com umidade relativa igual a 25%, e essa umidade precisa ser reduzida até pelo menos 13% para que seja possível conservar o produto por um período superior a um ano.

A temperatura de secagem também é muito importante, e deve ser definida de acordo com o destino do grão de milho depois de seco. Caso o destino dos grãos seja virar semente para plantio, a temperatura de secagem não pode ultrapassar 44°C, para não comprometer a germinação do grão. Caso o destino seja alimentação humana ou moagem, a temperatura de secagem não pode ultrapassar os 55°C, e

caso seja fabricação de ração animal, a temperatura de secagem dos grãos não pode ser superior a 82°C (EMBRAPA,2021).

Outro parâmetro muito importante para a secagem de qualquer grão é a umidade de equilíbrio. Esse parâmetro ajuda a definir até qual valor de umidade a secagem pode chegar, considerando a umidade relativa e a temperatura do ambiente. O valor de umidade de equilíbrio varia muito dependendo das condições do ambiente, porém para o milho o valor de umidade de equilíbrio desejado fica em torno de 13% (LUÍS CÉSAR, 2017).

### 2.3 Método de controle

O controle de processos tem como objetivo a manutenção de variáveis importantes para o andamento de algum processo industrial. O controle sempre foi algo desejado e utilizado pela humanidade, tendo registros de aplicações desde o antigo Egito, em 1500 A.C. Com a revolução industrial e o grande crescimento do uso de máquinas a vapor, foi necessário a utilização de estratégias de controle avançadas, aliados à modelagem matemática para se conseguir uma boa eficiência e estabilidade nas máquinas. Foi a partir dessa época que o tipo de controle automático por realimentação ficou bastante popular. Em 1868 o físico inglês James C. Maxwell utilizou equações diferenciais para explicar a instabilidade em malhas de controle, estabelecendo a teoria de sistemas de controle. Nas últimas décadas, com o avanço da computação e a necessidade de controlar processos mais específicos e complexos, foram desenvolvidos métodos de controle cada vez mais avançados, e hoje em dia é possível controlar praticamente qualquer coisa (VILLAÇA, SILVEIRA, 2013).

Em controle de processos, é definido que um sistema básico de controle precisa ter três elementos básicos. São eles (SMITH, CORRIPIO, 2006):

**Transmissor-sensor:** É o elemento primário de controle, que faz a medição da variável controlada e envia para o controlador.

**Controlador:** É o cérebro da malha de controle, e tem como função receber o valor medido no sensor e compará-lo com o *setpoint*, que é o valor desejado. Com

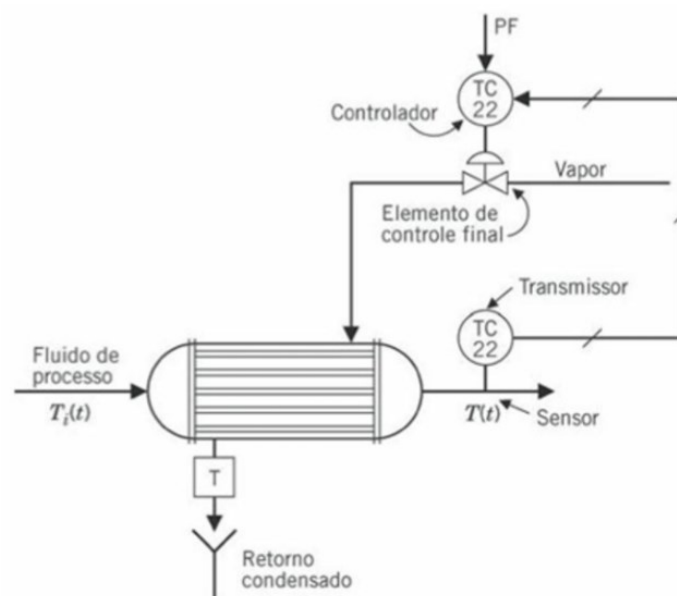


essa comparação é gerado um erro, que ao ser manipulado, gera um impulso que será enviado para o elemento final de controle.

**Elemento final de controle:** É o componente com a função de realizar a ação de controle, como por exemplo abrir uma válvula ou ligar um resistor, com base no sinal enviado pelo controlador.

Na Figura 2 é possível entender como estes elementos aparecem em um processo real.

**Figura 2 - Exemplo de malha de controle de um trocador de calor**



**Fonte: SMITH, CORRIPIO (2006)**

No exemplo apresentado na Figura 2, a temperatura do fluido de processo é verificada constantemente pelo sensor, que envia esta informação para o controlador, a fim de comparar com o valor definido no *setpoint*. O elemento final de controle é a válvula de vapor, que vai abrir mais caso a temperatura esteja abaixo da definida, ou fechar caso contrário.

Existem duas estratégias básicas de controle: O controle de realimentação e o controle por alimentação.

O primeiro tipo de controle tem por objetivo a manutenção do *setpoint*, ficando inativo até que haja uma perturbação no sistema que altere o valor da variável desejada. A vantagem dessa estratégia é que qualquer perturbação que alterar o valor

da variável será controlada. A desvantagem é a perda da produtividade, pois o sistema sempre será afetado pelas perturbações. O segundo tipo de controle tenta prever as variações antes que elas ocorram, utilizando sensores específicos no processo para medir as possíveis perturbações. A vantagem desta estratégia é que se for feito de forma adequada, o processo sempre vai ficar no *setpoint*, pois todas as suas possíveis variações serão corrigidas antes mesmo de acontecerem. A desvantagem é que para que esse sistema funcione, é preciso um bom conhecimento do processo em si, para se pensar em todas as perturbações que podem ocorrer(OGATA, 2010, SMITH, CORRIPIO, 2006).

Dentre os métodos de controle disponíveis atualmente, um deles tem bastante destaque na literatura e nos trabalhos relacionados a controle: O controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo).

O controle PID já é muito conhecido, e está em uso no mundo desde 1936, e ainda predomina em boa parte das indústrias atuais, por ser um tipo de controle de fácil aplicação na maioria dos processos, confiável e robusto (FRANCHI, 2011, VILLAÇA, SILVEIRA, 2013).

O controlador PID é a junção de três estratégias de controle: Proporcional, Integral e Derivativa. A ação proporcional utiliza o valor da diferença entre o setpoint e a variável medida no sensor para gerar uma resposta à altura deste erro no elemento final de controle com o objetivo de zerar esta diferença, que nem sempre é alcançado, gerando assim um erro residual. A ação integral tem como objetivo zerar o erro residual obtido da estratégia de ação proporcional. A ação derivativa tem como objetivo prever o que irá acontecer, analisando a curva do erro, para assim subtrair o ganho das outras duas ações para se ter um controle mais fiel, e com menos oscilações no ponto fixo. Depois de implementado, o controlador PID pode ser sintonizado, para que cada uma das três ações (Proporcional, Integral e Derivativa) tenha sua devida contribuição na tomada de decisão do controlador (SMITH, CORRIPIO, 2006).

## 2.4 Estudo Sobre Processos de Secagem

O processo de secagem é um dos mais antigos que se tem conhecimento, por isso, não faltam exemplos de estruturas de secadores diferentes. A seguir, são descritos alguns trabalhos desenvolvidos nas áreas da secagem e controle de temperatura.

Monte et al. (2008) apresentou em seu artigo a construção de um protótipo de secador automatizado para a secagem de grãos em camada fina, com o objetivo de reduzir a possibilidade de erros de medição. Em seu trabalho, foram utilizados dispositivos eletrônicos endereçáveis da série 1-Wire, tecnologia desenvolvida pela empresa Dallas, sistemas de controle PID e célula de carga para a medição da variação da umidade.

Boeri (2012) realizou uma tese com o objetivo de analisar a cinética de secagem de bacalhau em um secador convectivo, que foi construído pela autora. Nesse trabalho, foi utilizado o método de controle difuso (fuzzy), junto com malhas neurais para a otimização do processo. Os resultados foram muito satisfatórios, pois os valores reais da secagem se aproximaram muito com os obtidos por simulação.

Kieslich et al., (2012) realizou um projeto de IC com o objetivo desenvolver um dispositivo capaz de controlar a temperatura de forma automática de um secador de grãos de soja, utilizando o microcontrolador Arduino. De acordo com a conclusão do autor, os resultados do trabalho foram muito bons, com o erro do controlador não passando dos 0,2 graus celsius.

Winik et al., (2014) desenvolveu um protótipo para ser utilizado no controle de temperatura de secagem de grãos. Foi utilizado um microcontrolador montado pelo autor e um conjunto de resistências elétricas.

Cruz, (2016) realizou um estudo matemático para modelar a secagem de sementes de *Crambe*, utilizando um secador de leito fixo de bancada construído pelo autor. Foi utilizado o método de controle PID, junto com os métodos de sintonização de Ziegler & Nichols e Cohen & Coon. Os resultados foram satisfatórios, com a temperatura controlada mantendo-se próxima a temperatura do *setpoint*.

### 3 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este capítulo está dividido em duas partes, da seguinte forma: a primeira sessão trata do desenvolvimento do secador, e a segunda trata do teste do secador utilizando grãos de milho.

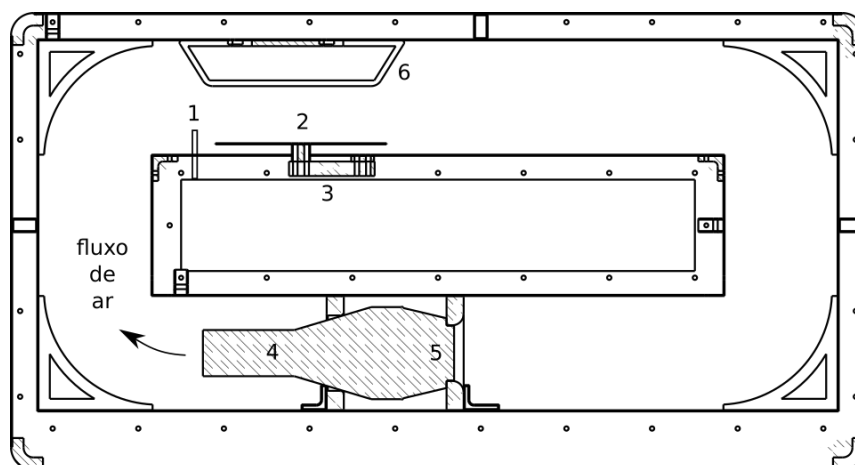
#### 3.1 Desenvolvimento do secador de bancada

Esta seção trata da construção do secador, comentando os processos metodológicos para a construção da estrutura, da parte eletroeletrônica e também da criação da interface gráfica.

##### 3.1.1 Projeto do secador com CAD

Na Figura 5 é apresentado um esboço do secador que foi construído. O projeto foi desenvolvido em CAD, com a utilização do software onShape. A legenda está mostrada abaixo.

**Figura 3 - Esboço do protótipo do secador**



**Fonte: Guilherme Bertoldo (2021)<sup>1</sup>**

---

<sup>1</sup> O desenho do secador e das peças feitas em CAD foram elaboradas pelo meu orientador, Guilherme Bertoldo.

Em 1 está localizado os sensores de temperatura e de umidade. Em 2 está localizada a balança que realiza a medida da massa das amostras através da célula de carga (3). O secador de cabelo será controlado a partir de dois relés: Um deles terá o controle PID a partir do PWM (Pulse With Modulation), que é o controle do resistor (4) e o outro relé será um controle simples de liga-desliga, para o controle do fluxo de ar do ventilador (5). No ponto 6 está localizado uma estrutura feita para direcionar e estabilizar o fluxo de ar do secador.

### 3.1.2 Projeto eletroeletrônico

Nesta seção são descritos os sensores e atuadores utilizados na montagem do secador, explica-se o funcionamento do microcontrolador e sua programação, e por último apresenta-se o circuito elétrico do secador com os sensores.

#### 3.1.2.1 Sensores e atuadores

##### **Sensor de temperatura**

O sensor utilizado foi o DS18B20, que é um dos sensores mais utilizados em ambientes úmidos. Ele possui uma ótima precisão e possui um intervalo de temperaturas entre  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , dentro das necessidades de medição da secagem. De acordo com a fabricante Maxim Integrated, o sensor tem capacidade de medir temperaturas de  $-55$  a  $125^{\circ}\text{C}$ , possui precisão de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , é a prova d'água e tem sistema de comunicação de um fio. Também já conta com bibliotecas prontas para se trabalhar com o Arduino. Comparando com outros tipos de sensores, os digitais como o DS18B20 também possuem um dos melhores tempos de resposta, o que é muito útil dado a grande variação da temperatura que ocorre na secagem.

##### **Sensor de umidade**

O sensor HDC1080 é um sensor de umidade que também pode medir a temperatura. De acordo com a fabricante Texas Instruments, se trata de um sensor de alta precisão (de  $0,2^{\circ}\text{C}$  e 2% UR) que consegue medir temperaturas de  $-40$  a

125°C. O funcionamento ocorre através de uma comunicação serial de dois fios, chamado de I2C. Também conta com bibliotecas prontas no Arduino, o que também facilita o seu uso.

### **Relés de estado sólido**

Os relés em geral são componentes eletrônicos com a finalidade de abrir ou fechar o chaveamento de acordo com a necessidade e configuração aplicadas. Os relés mais utilizados são os eletromecânicos, que são chamados de relés convencionais, os relés fotoelétricos, que são muito utilizados em redes de iluminação pública, e os relés de estado sólido, que são muito utilizados em sistemas de controle, em especial os de controle de temperatura, e possuem muitas vantagens em relação aos relés convencionais, como maior durabilidade, menor necessidade de potência, geram menos ruídos sonoros e eletromecânicos e tem uma velocidade de comutação muito maior. A principal diferença deles em relação aos relés eletromecânicos é sua composição. Não possuem partes mecânicas ou qualquer outro tipo de peça móvel, pois seus contatos são substituídos por um dispositivo semicondutor (Braga, 2012).

No presente projeto foram utilizados dois relés de estado sólido, um com capacidade de corrente de até 40 A, que foi utilizado no controle liga-desliga do ventilador do secador, e um de 25 A, que foi utilizado no controle PWM do resistor do secador.

### **Célula de carga**

A célula de carga é um componente eletrônico que tem a capacidade de traduzir a força aplicada em uma de suas extremidades em um sinal elétrico, que pode ser medido e relacionado a quantidade de massa responsável pela aplicação de tal força. Em outras palavras, a célula de carga é uma excelente balança quando calibrada da forma correta, com a capacidade de medir a massa com precisões muito boas, de 0,02 ou 0,03% de sua capacidade nominal. A célula de carga que será utilizada no projeto tem capacidade máxima de 1 kg. Para o uso com o Arduino, a célula de carga precisa ser utilizada com um outro componente eletrônico, o HX711, que tem como objetivo amplificar o sinal da célula de carga para ser lida pelo Arduino.

### 3.1.2.2 Microcontrolador

Os microcontroladores da marca Arduino são muito famosos atualmente, e estão cada vez mais sendo utilizados por instituições de ensino e também por estudiosos e curiosos da área de automação, controle e eletrônica. Alguns dos fatores da sua popularidade é o seu baixo custo, grande comunidade de usuários (que pode ser traduzida como uma grande quantidade de projetos disponíveis online para aprender), e grande variedade de projetos.

Existem diversos controladores da marca Arduino, como por exemplo o Arduino UNO, que é o mais famoso, ou o Arduino Mega, que é o maior da marca. Não existe exatamente um modelo melhor que o outro, cada um deles possui suas vantagens e desvantagens. Para o propósito deste trabalho, o microcontrolador Arduino utilizado foi o Nano, pois pelo seu tamanho reduzido tem-se uma maior facilidade de manipulação e instalação dos componentes no secador. Na figura 3 abaixo é possível visualizar uma foto deste microcontrolador:

**Figura 3: Foto de uma placa Arduino Nano**



**Fonte: Eletrogate (2021)**

Independente do modelo, o Arduino é composto por diversos pinos com numerações, que podem ser identificados como entradas ou saídas através da programação da placa, que pode ser feita em um computador e enviada ao Arduino por um cabo USB.

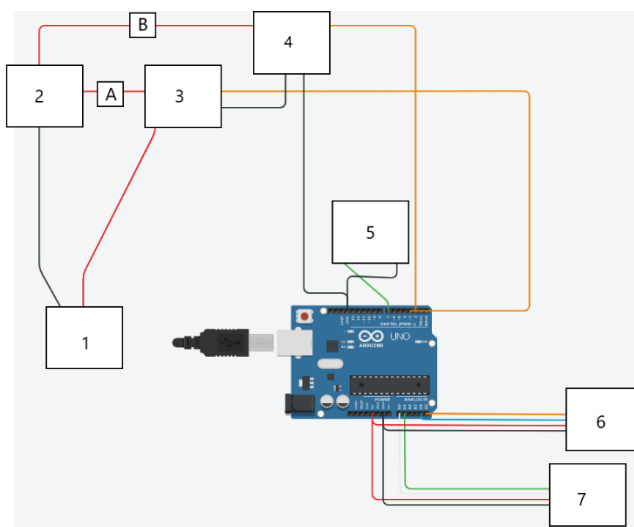
Para o propósito deste projeto, o microcontrolador Arduino tem o objetivo de medir os valores dos sensores, gravar essas informações em variáveis e também receber dados vindos do computador. Para fazer isso, o Arduino ficará conectado a um computador através da porta serial USB. Essas informações serão recebidas pela interface gráfica feita em Python, que também vai enviar informações das ações do usuário na interface. Este processo será explicado melhor nas próximas seções.

O Arduino também possui uma função muito interessante em algumas das suas portas, que é o controle PWM. Este tipo de controle tem a característica de modular a onda da corrente que sai do Arduino, variando entre o status de ligado e desligado várias vezes por segundo, para assim variar o valor da corrente. Este sinal pode ir de 0(100% do tempo desligado) a 255 (100% do tempo ligado). Utilizando essa função com um relé de estado sólido é possível ajustar a potência dissipada no resistor.

### 3.1.2.3 Diagrama do circuito

Na figura 4 abaixo é possível ver como foram ligados os fios do circuito do secador. As caixas representam sensores e atuadores, e estão legendados abaixo. As ligações dos sensores com o Arduino podem ser vistas mais abaixo, na seção de resultados.

**Figura 4 - Circuito do secador**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**



Em 1 fica a fonte de energia (tomada), em 2 se encontra o secador, que possui o fio A responsável pelo resistor, e o fio B responsável pelo motor (ventilador) do secador. Em 3 fica o relé responsável pelo resistor, em 4 fica o relé responsável pelo ventilador, em 5 fica o sensor de temperatura (DS18B20), em 6 o sensor de umidade (HDC1080) e em 7 a célula de carga.

### 3.1.3 Projeto da interface gráfica

Uma das etapas do projeto é a criação da interface gráfica que vai interagir com o Arduino a fim de controlar o secador. Essa interface vai ficar disponível para o usuário final, para que a interação pessoa-máquina fique mais simples. A interface também terá uma função de exibir gráficos e também exportar dados decorrentes da secagem feita.

A interface gráfica foi programada em Python, utilizando a IDE PyCharm versão 3.7 e 3.8. A linguagem Python permite a inclusão de bibliotecas criadas por outros usuários ao seu código, poupando bastante tempo em algumas atividades e proporcionando uma maior gama de possibilidades para a criação do programa.

Para a criação da janela do programa, foi utilizado a biblioteca PySimpleGUI Criada por MIKE (2007), que permite a criação de uma janela através de linhas de elementos, utilizando listas. Para a criação dos gráficos, foram utilizadas as bibliotecas do Matplotlib, criado por Hunter (2007) e outras derivadas desta. Para a interação do Python com Arduino, foi utilizado a biblioteca Pyserial criada por Liechti (2001).

É interessante notar que todo o cálculo e controle foi na verdade feito pelo Arduino, que foi programado utilizando um script de PID criado por Ivan Seidel, um *Problem Solver* formado na Universidade Federal do ABC. Este script foi modificado por mim para incluir os sensores e para enviar e receber informações pela porta serial.

A biblioteca pyserial tem a capacidade de ler e enviar informações do Arduino através de uma porta USB serial, quando o Arduino está conectado ao computador. Utilizando essas funções, é possível programar o Arduino para imprimir através desta porta uma linha de valores importantes sobre os sensores naquele segundo, para que

essa linha seja lida pela interface gráfica, interpretado, decodificado e assim possa ser usado para as funcionalidades do programa.

#### 3.1.4 Materiais da estrutura

Para a construção da estrutura do secador, foram utilizados os seguintes materiais:

- Placas de aço inox
- Peças fabricadas em impressora 3D
- Parafusos, arruelas e porcas
- Arduino Nano
- Placa de circuito do tipo ilha
- Sensor de temperatura DS18B20
- Sensor de umidade HDC1080
- Célula de carga de capacidade 1 kg
- Relés de estado sólido: de 40 A e 25 A
- Secador de cabelo modificado
- Coolers
- Fios, fitas e solda
- Ferramentas

#### 3.1.5 Verificação dos componentes

Antes da montagem do secador, foi necessário verificar se cada um dos sensores adquiridos fornece valores corretos dentro da tolerância especificada pelo fabricante. Para fazer essa verificação, foi utilizado o Arduino Nano com cada um dos sensores, e o valor medido será comparado com instrumentos calibrados. Os testes foram feitos da seguinte forma:

**Temperatura:** Foi utilizado o sensor DS18B20 em um circuito com o Arduino, para medir a temperatura do ar ambiente, e o valor encontrado foi comparado com o

de um termo-higrômetro construído pela UTFPR a partir de um sensor de umidade HDC1080, com precisão de 2%.

**Umidade:** Foi utilizado o sensor HDC1080 em um circuito com o Arduino, para medir a umidade relativa do ar ambiente, e o valor encontrado foi comparado com o do mesmo termo-higrômetro comentado no item anterior.

**Massa:** Foi utilizada uma célula de carga com um amplificador HX711 em um circuito com o Arduino para a medição de massa de alguns itens, e o valor encontrado foi comparado ao de uma balança analítica.

### 3.2 Validação do secador através da secagem de milho

Para testar o funcionamento e eficiência do secador, foram propostos alguns experimentos de secagem utilizando grãos de milho. O milho em questão foi obtido na BRF (Brasil Foods) da cidade de Francisco Beltrão, com uma amostra total de 6 kg em 4 pacotes de 1,5 kg cada. O milho estava com sua umidade inicial de colheita, pois ainda não havia sido secado ou escolhido.

Os experimentos foram executados da seguinte forma: serão realizados dois ensaios para cada experimento de temperatura, totalizando 8 ensaios realizados nas temperaturas de 60°C, 70°C, 80°C e 90°C. Cada ensaio será feito com uma massa de grãos de aproximadamente 100 gramas, por um período de 2 horas. Os passos a seguir foram repetidos para cada um dos experimentos:

Para a determinação da umidade inicial do produto, foram separadas amostras de grãos entre 15 a 20 gramas, sendo esse processo feito em triplicata para cada experimento. As 3 amostras de massa de cada ensaio serão colocadas dentro de uma estufa, por um período de 24 horas a uma temperatura de 105°C

O teor de umidade inicial foi obtido por meio da seguinte equação:

$$Xb_s = \frac{(m_0 - m_f)}{m_f} 100 \quad (1)$$

Sendo que  $Xb_s$  é o teor de umidade inicial em base seca,  $m_0$  é a massa inicial da amostra e  $m_f$  é a massa final, obtido após a secagem na estufa por 24 horas.

Após esse processo, serão medidos aproximadamente 100 gramas de grãos originados do mesmo saco da amostra colocada na estufa para fazer o processo de secagem, por um período de 2 horas.

Após o término do processo de secagem no secador desenvolvido, a massa da amostra é determinada e colocada em uma estufa pelo período de 24 horas.

O objetivo desta metodologia de secagem será obter a umidade inicial e final da amostra, para no fim obter a umidade instantânea.

O teor de umidade final foi obtido de forma semelhante ao da equação anterior, porém a massa final nesse caso é a massa da amostra depois de tirada do secador.

Para obter o valor da umidade instantânea de cada amostra, foi utilizada a seguinte equação:

$$X = \frac{(X_f - X_0)(m - m_0)}{m_f - m_0} + X_0 \quad (2)$$

Sendo  $X_f$  o teor de umidade final,  $X_0$  o teor de umidade inicial,  $m$  é a massa instantânea da amostra,  $m_0$  é a massa inicial e  $m_f$  é a massa final.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

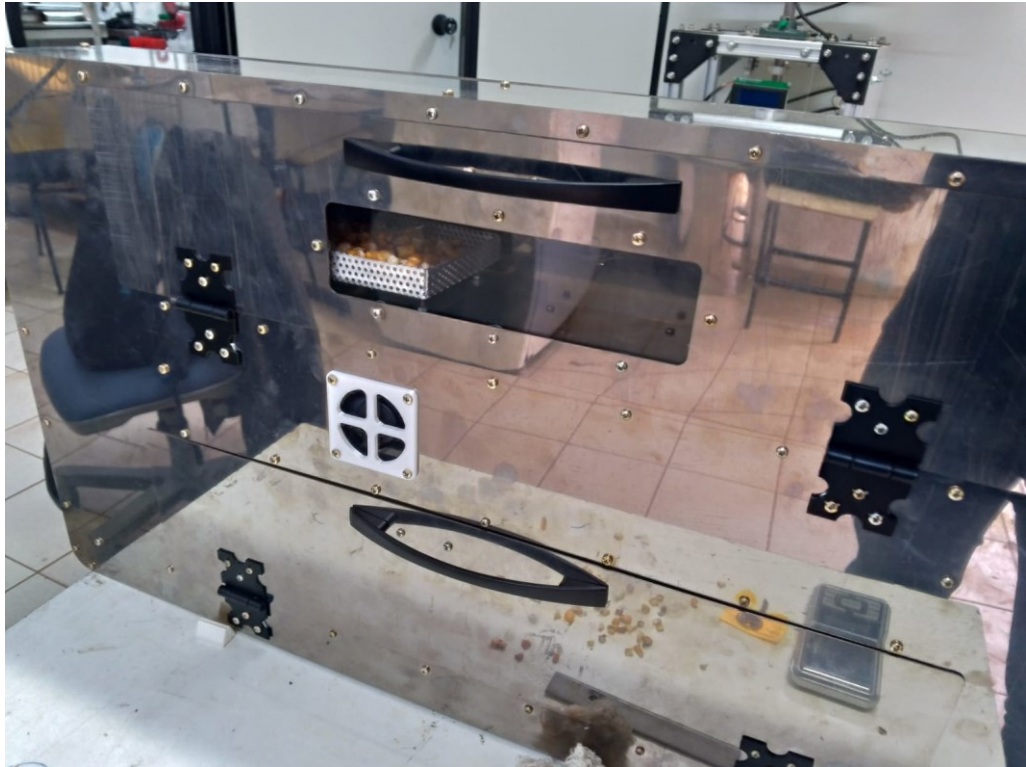
Este capítulo está dividido em quatro partes: a primeira tem como objetivo descrever os resultados da montagem do secador; a segunda descreve os resultados da comparação dos sensores utilizados com equipamentos calibrados; a terceira parte mostra o resultado da interface gráfica feita em python e por último são apresentados os resultados do ensaio de secagem de grãos.

### **4.1 Montagem do secador**

O processo de construção da estrutura do secador ocorreu em basicamente duas partes: a construção da estrutura de metal e a instalação da parte elétrica.

Inicialmente, as placas foram limpas e lixadas para evitar acidentes, pois ainda continham rebarbas decorrentes do corte a laser. Após esse processo, se deu início a montagem das placas, utilizando os parafusos, em conjuntos com as peças de suporte feitas na impressora 3D. Este processo foi executado com muito cuidado para que a montagem não ficasse frouxa ou apertada demais. Quando concluída a montagem e alinhamento de cada uma das partes da estrutura, passou-se trava química para selar os parafusos nas porcas. Também foram instalados e ajustados os suportes do secador de cabelo, e posteriormente a instalação do mesmo.

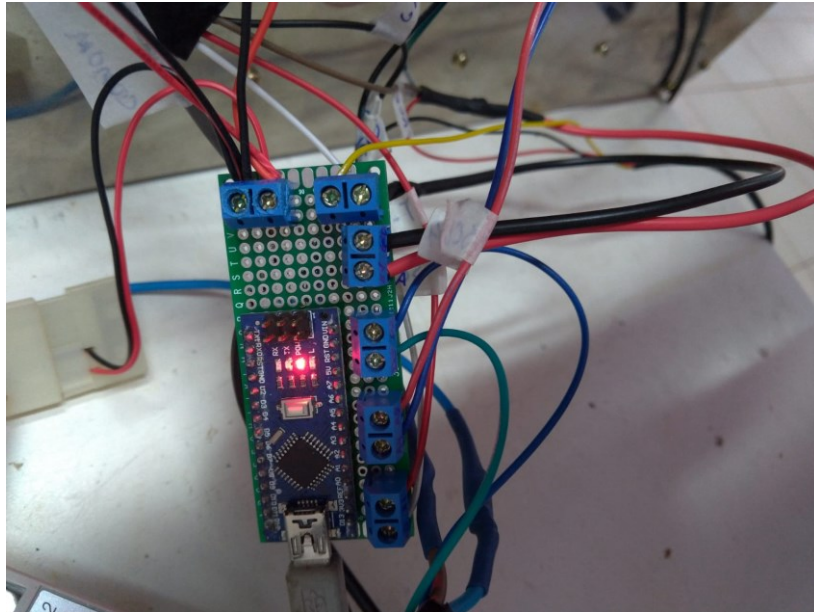
**Figura 5 - Estrutura do secador**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Após o processo de montagem da estrutura, se deu início a montagem do circuito elétrico. Utilizou-se o Arduino Nano em conjunto com uma placa de circuito do tipo ilha, para que a montagem dos componentes na placa fosse mais fácil e permanente. Antes do processo de montagem do circuito, todos os fios dos sensores e atuadores foram identificados e nomeados, para facilitar o trabalho.

**Figura 6 - Imagem do Arduino nano acoplado na placa tipo ilha.**



**Fonte: Autoria própria (2021)**

Na Tabela 1 abaixo são listadas as ligações dos sensores e do Arduino:

**Tabela 1 - Conexão dos fios do secador**

Porta do Arduino	Nome do fio	Componente conectado
A0	SCK	Célula de carga
A1	DT	Célula de carga
A4	SDA	HDC1080
A5	SCL	HDC1080
D3	Positivo	Relé de estado sólido (25 A)
D2	Positivo	Relé de estado sólido (40 A)
5V	VCC	Célula de carga, HDC1080, DS18B20
GND	GND	Célula de carga, HDC1080, DS18B20, Relés de estado sólido
D7	Fio de dados	DS18B20

**Fonte: Autoria Própria (2021).**

O relé de estado sólido de 40 A foi utilizado como um controlador liga-desliga, com o objetivo de controlar o ventilador do secador de cabelo. O relé de estado sólido de 25 A foi utilizado como o controlador PWM que tem como objetivo variar o valor da corrente no resistor do secador de cabelo. O circuito foi montado de forma que o resistor do secador só possa ser ligado caso o ventilador também esteja ligado, como medida de prevenção de acidentes (vide a Figura 7).

**Figura 7 - Configuração dos relés**



**Fonte: Aatoria Própria (2021)**

## **4.2 Verificação dos componentes**

Para o sensor de temperatura e umidade, colocou-se o sensor do termo-higrômetro próximo do sensor de temperatura e umidade do secador, e esperou-se que todos os sensores se estabilizassem. Após cerca de 5 minutos, foi feita a leitura de ambos os sensores. O termo-higrômetro registrou umidade de 60,35% UR e temperatura de 21,53°C. Os sensores do secador registraram umidade de 60,08% UR e temperatura de 21,60°C. Considerando a margem de erro dada pelos fabricantes, a temperatura tem margem de erro de 0,5°C e a umidade tem margem de erro de 2%,



então ambos estão dentro dos valores previstos. Os testes foram feitos no dia 11/08/2021 no horário aproximado de 15:00.

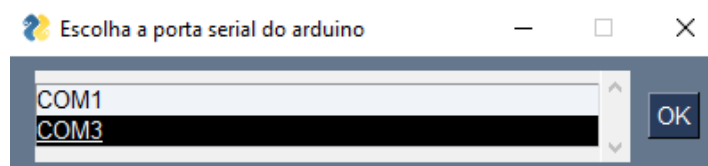
Para a célula de carga, determinou-se a massa de alguns objetos em uma balança semianalítica e também na célula de carga. Um dos objetos foi um celular, que na balança semianalítica registrou massa igual a 201,78 gramas, e a massa do celular pesado na célula de carga foi de 202 gramas. Os valores de massa inicial e final dos experimentos de secagem também foram medidos em uma balança semianalítica, porém obtiveram uma maior diferença de leitura por conta da temperatura, pois a medição da célula de carga varia em função da temperatura do ambiente. Utilizando como exemplo, no primeiro experimento na temperatura de 80°C, a medição inicial da balança analítica mostrou um valor de 100,21 gramas, enquanto que a célula de carga mostrou um valor de 99,38 gramas.

### 4.3 Interface gráfica

Este tópico tem o objetivo de explicar os funcionamentos da interface gráfica construída.

Inicialmente, antes de abrir a interface, é aberto um *popup* que pede para o usuário selecionar qual a porta do computador o Arduino está conectado (vide a Fig. 8). Esta função é necessária pois cada computador e sistema operacional possui uma configuração de porta serial diferente, por isso é necessário que o programa analise as portas disponíveis e deixe o usuário selecionar a correta.

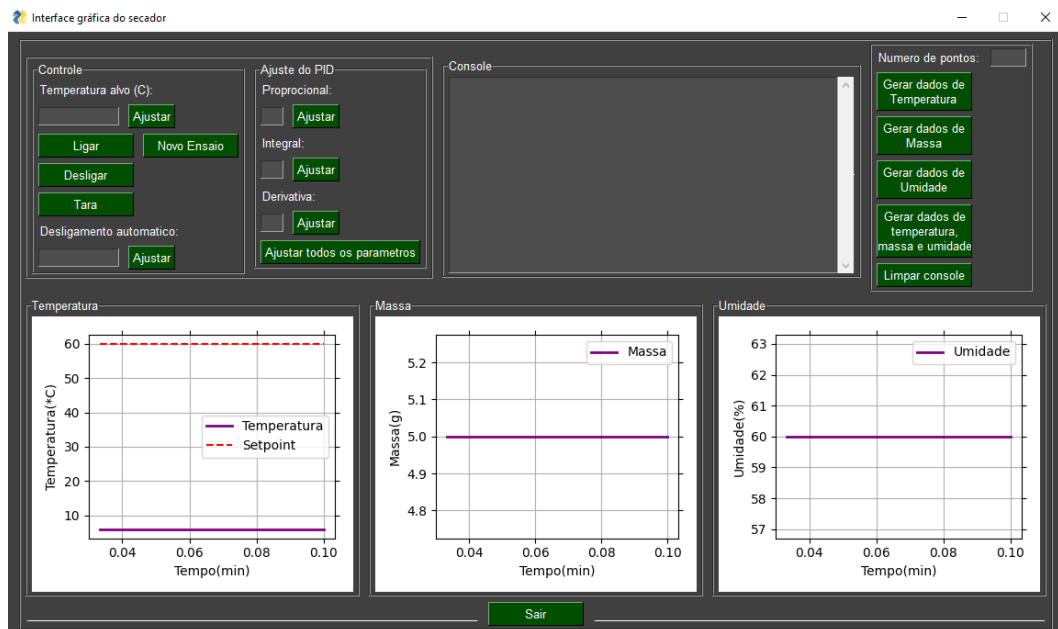
**Figura 8 - Popup para escolha da porta serial**



Fonte: Autoria Própria (2021)

Após o usuário selecionar a porta correta e dar ok, a janela da interface gráfica vai abrir (vide a Fig. 9). Inicialmente, com exceção do valor da temperatura do setpoint, nenhuma outra configuração está determinada por padrão, cabendo ao usuário fazer toda a configuração da secagem que ele deseja. A janela possui 5 áreas diferentes, e cada uma delas junto com seu conteúdo será explicado em seguida.

**Figura 9 - Interface do secador**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**

A primeira área é a de controle, onde estão localizados os principais componentes da interface, aqui tem-se os botões de ligar e desligar o controle do PID do secador; Um botão de tara que tem a função de reiniciar a medida de massa para um novo valor de 0 gramas e, também, apagar os dados dos gráficos gerados até o momento (para que seja mais fácil analisar os dados no final do processo); Uma função de desligamento automático para que o programa termine o processo de secagem desligando o controle e, gerando os dados de secagem exatamente no tempo informado (em minutos); E uma função em que é possível começar um novo ensaio de secagem sem precisar fechar o programa e abrir novamente (essa função zera todos os valores dos gráficos e dados armazenados, mas, mantêm o valor das configurações).

A segunda área é a de ajuste do PID, que tem como objetivo o ajuste dos parâmetros  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$  do controlador. Inicialmente estes valores vão estar configurados como zero, cabendo ao usuário final a mudança destes parâmetros para fim de análise de sua interferência no processo de estabilização da temperatura no *setpoint*.

A terceira área é a do console de comunicação, que tem como objetivo informar ao usuário sobre eventuais erros que podem acontecer e também mostrar as modificações que o usuário fez nas configurações iniciais. Este console também tem a função de mostrar os dados de secagem, quando o usuário interage com a próxima área, que será explicado em seguida.

A quarta área é a de dados, e tem como função dar ao usuário um meio para obter os dados da secagem feita. Existem 4 opções de gerar dados, sendo que a primeira gera apenas os de temperatura, o segundo apenas os de massa, o terceiro apenas as de umidade e o quarto gera todos os dados. Estes dados são gerados no console de comunicação e também são exportados para um documento de texto, que é criado no momento que um destes botões é apertado. O usuário deve ter bastante cuidado, pois caso já exista um documento com o mesmo nome (devido à um processo anterior de secagem) o mesmo será completamente apagado para que os valores novos sejam escritos. Logo no início desta área, existe uma opção de escolha do número de pontos a serem mostrados no console de comunicação e exportados para o documento de texto. Por fim existe um botão para limpar os dados escritos no console de comunicação.

A quinta e última área é a de plotagem dos gráficos, que são gerados em tempo real conforme os sensores medem as variações de suas respectivas medidas. Estes gráficos variam a cada segundo, porém o valor de tempo mostrado está em minutos, para maior conveniência na leitura. O número de dados plotados em cada gráfico não ultrapassa 100 pontos, que são escolhidos em um intervalo com base no valor total de pontos disponíveis, para que o programa não fique lento com o passar do tempo.

#### 4.4 Experimentos de secagem do milho

Nesta parte do trabalho estão descritos os resultados dos experimentos feitos de secagem de milho, com o objetivo de testar a eficiência do secador. Os experimentos descritos foram realizados do dia 9 a 12 de agosto de 2021, sendo que em cada dia foram feitos dois ensaios de secagem na mesma temperatura. No dia 9 foi feito a secagem a 90°C, no dia 10 a de 80°C, no dia 11 a de 70°C e no dia 12 a de 60°C.

Sabe-se que para se ter um controle mais rápido e eficiente é necessário sintonizar os parâmetros do PID. Porém, para a execução dos testes de secagem feitos não houve necessidade, pois mesmo com parâmetros arbitrários, o controle do secador conseguiu ajustar a temperatura de secagem ao setpoint com uma precisão muito boa, com o erro ficando abaixo dos 0,5°C quando estabilizado. O maior erro fica no início no processo, quando pode chegar até a 10°C de diferença entre o setpoint e o valor medido, porém o processo de secagem só acontece quando o valor da temperatura é estabilizado. Os valores para os parâmetros  $k_p$ ,  $k_i$  e  $k_d$  do controlador PID foram 4, 0,2 e 2 respectivamente.

Na Tabela 2 abaixo são apresentados os dados dos experimentos de determinação da umidade inicial, que foram feitas em triplicata em cada dia de secagem. Foi feito a média aritmética dos dados coletados.

**Tabela 2 - Umidade inicial das amostras**

<b>Dia</b>	<b>Temperatura(°C)</b>	<b>Umidade Inicial (%) (Base Seca)</b>
09/08	90	37,15 ± 0,01
10/08	80	38,22 ± 0,01
11/08	70	39,06 ± 0,01
12/08	60	39,93 ± 0,01

**Fonte: Autoria Própria (2021).**

Na Tabela 3 abaixo encontram-se os valores da umidade final das amostras, obtidas medindo-se a massa das amostras após um período de duas horas de

secagem. Todos os experimentos foram feitos com amostras com aproximadamente 100 gramas.

**Tabela 3 - Umidade final dos experimentos**

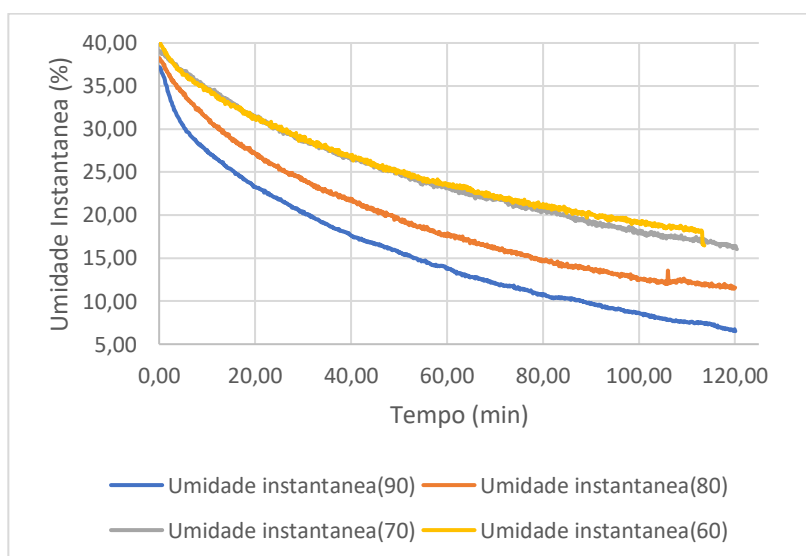
<b>Dia</b>	<b>Temperatura(°C)</b>	<b>Experimento</b>	<b>Umidade final (%) (Base Seca)</b>
09/08	90	1	6,51
09/08	90	2	7,46
10/08	80	1	11,58
10/08	80	2	9,91
11/08	70	1	16,30
11/08	70	2	11,93
12/08	60	1	16,47
12/08	60	2	18,98

**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Com os valores de umidade inicial e final, é possível calcular os valores da umidade instantânea das amostras em cada instante de tempo medido. Para fazer este cálculo, utiliza-se a Eq. (2). O número de valores plotados foi aproximadamente 1000 de cada variável (temperatura, umidade e massa).

Na Figura 10 abaixo é possível ver o gráfico da umidade instantânea de todas as temperaturas analisadas em função do tempo para o experimento 1:

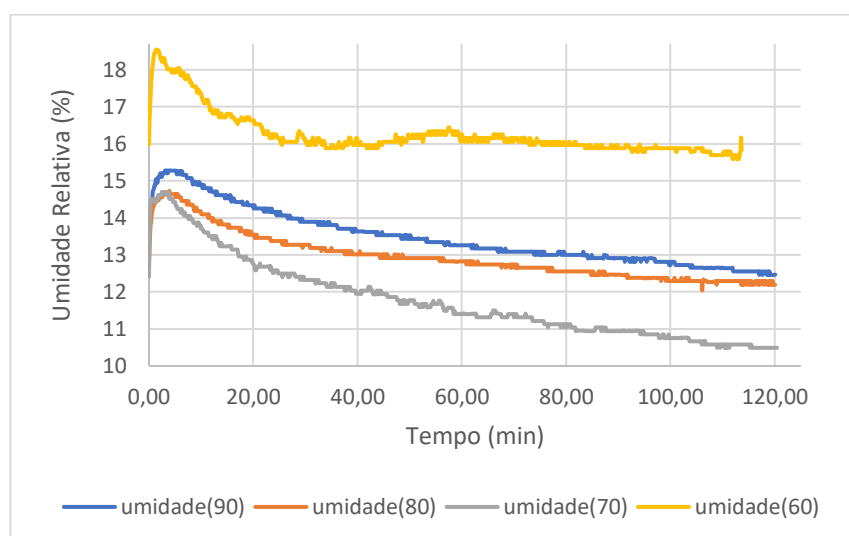
**Figura 10 – Umidade Instantânea em função do tempo (experimento 1)**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Ao analisar o a Fig. 10, pode-se observar que os ensaios correspondentes às temperaturas de 90°C e 80°C tiveram um comportamento esperado, com o valor da umidade instantânea sendo menor do ensaio de 90°C. Os ensaios de 70°C e 60°C ficaram um pouco fora do padrão esperado, porém não é possível chegar em nenhuma conclusão apenas com este gráfico, pois diversas variáveis podem influenciar neste resultado, além de que o tempo de secagem foi bastante curto.

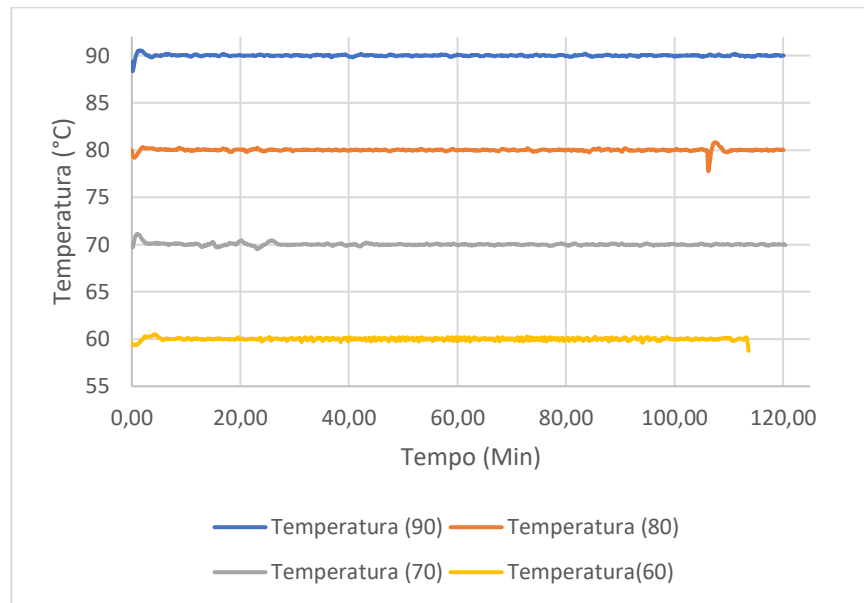
**Figura 11 - Umidade relativa do ar em função do tempo (experimento 1)**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Ao analisar a Fig. 11 é interessante notar que o ensaio que teve a menor umidade relativa do ar ambiente foi o experimento de 70°C, e não o de 90°C, que normalmente seria o esperado. Uma explicação para este comportamento é que como a secagem ocorreu em ciclo fechado, a umidade que foi evaporada em decorrência da secagem foi parar no ar, fazendo com que a umidade relativa subisse um pouco nas temperaturas em que essa evaporação foi maior (90°C e 80°C), principalmente no início do processo. A secagem de 70°C foi quente o suficiente para reduzir bastante a umidade do ar, mas fria o suficiente para que a quantidade de umidade retirada dos grãos fosse menor a ponto de não impactar tanto na medida de umidade.

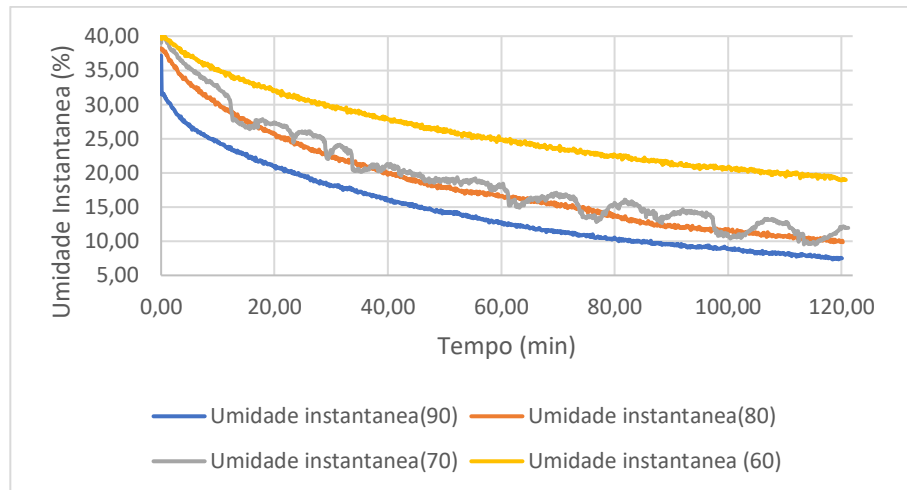
**Figura 12 - Temperatura de secagem em relação ao tempo (experimento 1)**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**

A partir da Fig. 12 pode-se concluir que o controle PID aplicado foi muito eficaz na manutenção da temperatura de setpoint, mesmo com os parâmetros não otimizados. Os pontos onde a temperatura variou foram causados pela abertura da tampa do secador que causou um distúrbio no ar de secagem. No gráfico não é possível ver o efeito de ajuste da temperatura anterior ao período de secagem mostrado pois estes dados foram descartados no momento do acionamento da tara na massa de grãos.

**Figura 13 – Umidade Instantânea em função do tempo (experimento 2)**

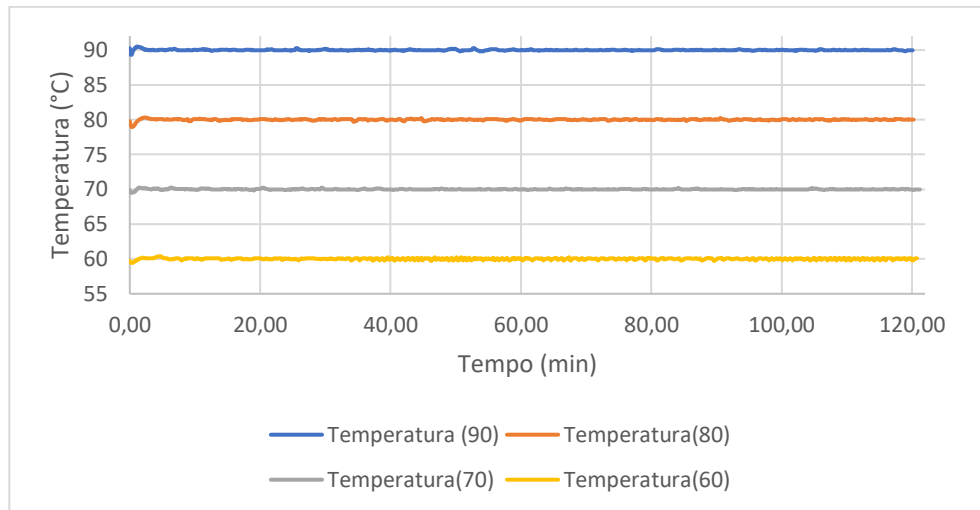


**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Ao se observar a Fig. 13, relacionada ao segundo experimento, é possível notar que o ensaio que corresponde à temperatura de 70°C está variando muito o valor de umidade instantânea. Essa variação pode ter sido causada por uma maior instabilidade na célula de carga no momento deste ensaio específico, em consequência da variação da temperatura. Também é possível notar que a umidade do ensaio mencionado anteriormente está um pouco menor que o esperado, mas não é possível afirmar se é devido à variação da célula de carga ou se é por causa do clima do dia da secagem. Os outros experimentos obtiveram uma umidade instantânea esperada.



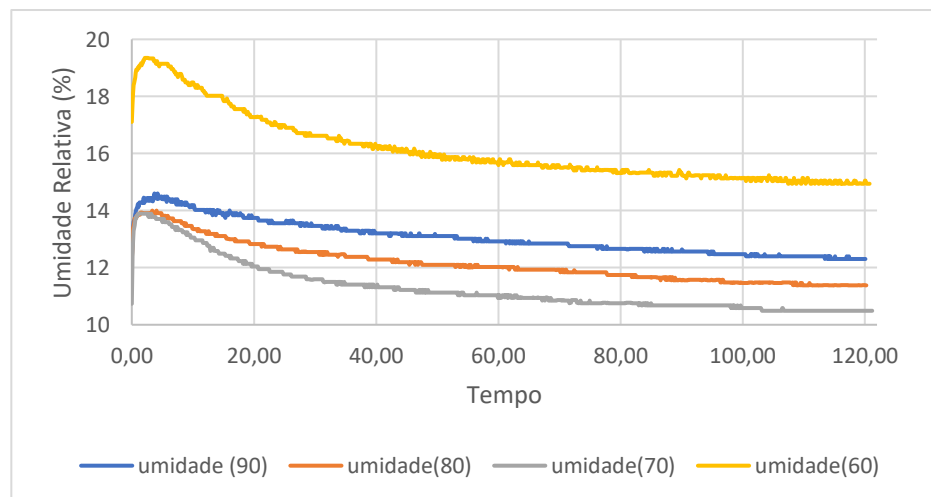
**Figura 14 - Temperatura de secagem em relação ao tempo (experimento 2)**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**

A Fig. 14 reforça o controle adequado da temperatura do ar de secagem no segundo experimento.

**Figura 15 - Umidade relativa do ar em relação ao tempo (experimento 2)**



**Fonte: Autoria Própria (2021)**

Analisando a Figura 15 acima e também a equivalente do experimento 1 (Fig. 11) é possível notar que a umidade relativa aumenta em cerca de 2% nos primeiros minutos de secagem. Esse aumento da umidade é resultado da imediata evaporação da água contida em excesso nos grãos, o que faz com que a umidade do ar dentro do secador aumente um pouco.

## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvido um módulo de secagem automatizado com o objetivo de secar grãos. De acordo com os resultados obtidos na secagem, foi possível concluir que o secador construído se mostrou uma opção válida para fazer análises de secagem, porém alguns problemas ainda precisam ser resolvidos para que o secador tenha um melhor desempenho.

Com relação às dificuldades encontradas durante a construção do secador, é possível afirmar que os maiores problemas se resumem na elaboração da interface gráfica e na montagem do circuito elétrico do secador. A montagem da estrutura do secador ocorreu da forma esperada, com alguns poucos problemas relacionados às partes impressas na impressora 3D, e os experimentos de secagem também ocorreram da forma esperada em sua maioria, com exceção de alguns casos de uma maior oscilação da umidade instantânea em decorrência do aumento da temperatura na célula de carga.

Durante os experimentos de secagem, foi possível observar que existem alguns problemas no secador que poderiam ser resolvidos em um trabalho futuro, como por exemplo a instabilidade da célula de carga devido à mudança de temperatura, a ausência de um atuador para diminuir a temperatura e também uma estrutura capaz de desumidificar o ar de secagem. Com relação à interface gráfica, também existem algumas melhorias que poderiam ser feitas, como, por exemplo, uma forma melhor de coleta de dados, mais opções de controle, melhorias estéticas etc.

De forma geral, o presente trabalho provou ser promissor, e também pode servir de base para a construção de outros trabalhos parecidos na área de controle de temperatura e secagem, ou talvez como inspiração para outros trabalhos focados na construção de módulos didáticos.

Como sugestão para trabalhos futuros, pode-se incorporar novos sistemas de controle no secador, como por exemplo o controle da umidade relativa do ar de secagem, e também encontrar uma forma de medir a massa dos grãos sem que a temperatura influencie no resultado.

## REFERÊNCIAS

BARBOSA, G. P. **Operações da Indústria Química - Princípios, Processos e Aplicações**. 1. ed. São Paulo, Saraiva, 2015.

BOERI, C. N. **Secagem Convectiva De Produtos Alimentares: Otimização E Controle**. 2012. 358 f. Universidade de Aveiro, 2012.

BORGES, F. B. "Descrição da secagem convectiva de grãos de milho através de modelos difusivos", p. 147, 2016. .

COSTA, E. C. da. **Secagem Industrial**. 1. ed. São Paulo, Blucher, 2007. Disponível em:

[https://issuu.com/editorablucher/docs/issu\\_secagem\\_industrial\\_isbn9788521204176](https://issuu.com/editorablucher/docs/issu_secagem_industrial_isbn9788521204176).

CRUZ, F. P. B. "Estudo, Modelagem Matemática E Controle Do Processo De Secagem De Crambe (Crambe Abyssinica) Em Secador De Leito Fixo De Bancada", n. June, 2016. .

EMBRAPA. **Secagem e desidratação**. 2012. Embrapa. Disponível em:

[http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia\\_de\\_alimentos/arvore/CONT000fid5sgie02wyiv80z4s473tokdiw5.html](http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/tecnologia_de_alimentos/arvore/CONT000fid5sgie02wyiv80z4s473tokdiw5.html). Acesso em: 12 maio 2020.

GOMEZ, R. S., MAGALHÃES, H. L. F., PORTO, T. R. N., *et al.* **Processo de secagem de materiais cerâmicos argilosos: uma revisão**. 9. ed. Campina Grande, Research, Society and Development, 2020. v. 9.

KIESLICH, L. D. R., KHATCHATOURIAN, O., BINELO, M. O., *et al.* "Secagem artificial de grãos de soja: desenvolvimento de um controlador de temperatura automático", 2012. .

LUÍS CÉSAR. **Cálculo - Umidade de Equilíbrio**. 2017. Disponível em:

[https://www.agais.com/toolbox/umidade\\_equilibrio.php](https://www.agais.com/toolbox/umidade_equilibrio.php).

MCCABE, W. L., SMITH, J. C., HARRIOTT, P. "Unit operation in Chemical Engineering", **McGraw-Hill Chemical Engineering Series**, v. 1, 1993. .

MIKE. **PySimpleGUI**. 2007. Disponível em:

<https://pysimplegui.readthedocs.io/en/latest/readme/>.

MONTE, J. E. C., MARTINS, J. H., LOPES, D. de C., *et al.* "Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina", **Acta Scientiarum - Agronomy**, v. 30, n. 3, p. 307–312, 2008. DOI: 10.4025/actasciagron.v30i3.3499. .

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying, fourth edition**. 4. ed. London, CRC Press, 2014.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 5. ed. São Paulo, Pearson, 2010.

OLIVEIRA, C.L. V.; ZANETTI, H. A. P. **PROJETOS COM PYTHON E ARDUINO - COMO DESENVOLVER PROJETOS PRÁTICOS DE ELETRÔNICA, AUTOMAÇÃO E IOT**. 1. ed. São Paulo, Saraiva, 2020. Disponível em:  
<https://integrada.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788536533575/>.

SILVA, J. de S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. 2. ed. Viçosa, Issuu, 2008a. Disponível em: [https://issuu.com/juarezufv/docs/cap\\_tulo\\_17\\_2013](https://issuu.com/juarezufv/docs/cap_tulo_17_2013).

SILVA, J. de S. **Secagem e secadores**. 2. ed. Viçosa, Issuu, 2008b. v. 6.

SMITH, C. A., CORRIPIO, A. **Princípios e Prática do Controle Automático de Processo**. 3. ed. Rio de Janeiro, LTC, 2006.

STEVAN, S. L., ADAMASHUK, R. **Automação e Instrumentação Industrial com Arduino - Teoria e Projetos**. 1. ed. São Paulo, Saraiva, 2015.

VILLAÇA, M. V. M., SILVEIRA, J. L. "Uma Breve História Do Controle Automático.", **Revista Ilha Digital**, v. 4, p. 3–12, 2013. Disponível em:  
<http://ilhadigital.florianopolis.ifsc.edu.br/index.php/ilhadigital/article/view/49>.

WINIK, S. V., FAORO, V., LIMA, R. F. De, *et al.* "Controle da Temperatura de Secagem Artificial de Grãos", 2014. .