

Projeto e validação de um sistema de automação para controle de temperatura em máquinas de secagem de café

Design and validation of an automation system for temperature control in coffee drying machines

DOI:10.34117/bjdv7n2-473

Recebimento dos originais: 23/01/2021

Aceitação para publicação: 23/02/2021

Arthur Ferreira Rezende Delfim

Formação: Mestre em Engenharia Mecânica

Instituição: UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais)

Endereço: Av. Antônio Carlos, 6627 – Departamento de Eng. Mecânica, Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901

Rudolf Huebner

Formação: Doutor em Engenharia Mecânica

Instituição de atuação atual: UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais)

Endereço: Av. Antônio Carlos, 6627 – Departamento de Eng. Mecânica, Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901

Antônio Augusto Torres Maia

Formação: Doutor em Engenharia Mecânica

Instituição de atuação atual: UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais)

Endereço: Av. Antônio Carlos, 6627 – Departamento de Eng. Mecânica, Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901

Eduardo José Lima II

Formação: Doutor em Engenharia Mecânica

Instituição de atuação atual: UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais)

Endereço: Av. Antônio Carlos, 6627 – Departamento de Eng. Mecânica, Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901

Gabriel Mendes de Almeida Carvalho

Formação: Mestre em Engenharia Mecânica

Instituição de atuação atual: UFMG (Universidade Federal de Minas Gerais)

Endereço: Av. Antônio Carlos, 6627 – Departamento de Eng. Mecânica, Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP 31270-901

RESUMO

No processo de beneficiamento do café, os estudos mostram que a secagem é a etapa mais importante na determinação da qualidade do produto final. A demanda do mercado internacional de café de alta qualidade aumenta a cada ano e sua oferta não consegue acompanhar esse crescimento, o que revela dificuldades na melhoria qualitativa do fruto. Uma delas, e talvez a mais prejudicial, é a variabilidade da temperatura do ar de secagem, que se não for controlada, provoca danos físicos, tais como descoloração de grãos, rupturas e rachaduras, e também danos químicos, como a elevação da acidez graxa e alterações na estrutura dos compostos voláteis, favorecendo a má qualidade da bebida.

Dessa forma, dada a importância do controle de temperatura em questão, o presente trabalho mostra a concepção, instalação e teste de um projeto de automação do processo de secagem de café, mostrando a viabilidade de utilização de controladores de baixo custo (PIC16f877A), capaz de manter uma temperatura pré-determinada na massa de café, dentro das máquinas, durante todo o processo.

Palavras-Chave: Projeto, Automação, Secador, Café, Mecânica.

ABSTRACT

In the coffee processing process, studies show that drying is the most important stage in determining the quality of the final product. The demand of the international market for high quality coffee increases every year and its supply cannot keep up with this growth, which reveals difficulties in the qualitative improvement of the fruit. One of them, and perhaps the most harmful, is the variability of the drying air temperature, which if not controlled, causes physical damage such as discoloration of the grains, ruptures and cracks, and also chemical damage such as increased fatty acidity and changes in the structure of volatile compounds, favoring the poor quality of the beverage. Thus, given the importance of the temperature control in question, the present work shows the conception, installation and testing of a project for the automation of the coffee drying process, showing the viability of using low cost controllers (PIC16f877A), capable of maintaining a predetermined temperature in the coffee mass, inside the machines, during the whole process.

Keywords: Project, Automation, Dryer, Coffee, Mechanics.

1 INTRODUÇÃO

O café é um dos produtos primários mais valiosos do mundo, sendo superado em valor apenas pelo petróleo. O fruto movimenta indústrias de cultivo, processamento, comercialização, transporte e torrefação, sendo uma das principais fontes geradoras de empregos em muitos países. Seu comportamento de commodity, altamente susceptível à volatilidade do mercado mundial, eleva os riscos de investimento na cultura do fruto, colocando em cheque a estabilidade financeira de diversas famílias, que envolvem produtores e trabalhadores dependentes dessa indústria (BACHA, 1970).

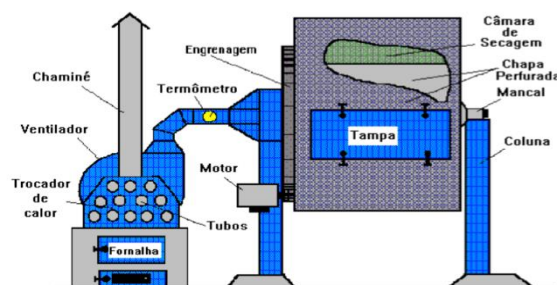
As análises mercadológicas indicam o aumento de qualidade e produtividade como a solução para lucratividade do setor, aliado a um distanciamento cada vez maior da herança latifundiária de caráter quantitativo da produção. No contexto de aumento qualitativo da produção, a secagem se mostra como o fator crítico na pós-colheita do café, pois influencia diretamente no aparecimento de características adstringentes na bebida do café torrado (RENA et al., 1986; MENDES et al., 1995; GODINHO et al., 2000; CUNHA et al., 1995, MOREIRA, 2019). Uma secagem perfeita deve ser lenta e uniforme para

evitar a quebra da estrutura celular dos grãos, dar a uniformidade de cor e consistência, mantendo as características de sabor do produto.

Constata-se que, na maioria dos produtores de café do tipo especial, o fruto após colheita seletiva é secado geralmente em terreiro suspenso - processo que demora cerca de 12 vezes mais que a secagem mecânica e requer revolvimento manual constante, o que eleva despesas com mão de obra, se atrelando a pequenos volumes. No entanto, como muitos produtores possuem extensas lavouras com grande potencial quantitativo, o setor carece de tecnologia de baixo custo capaz de secar grandes quantidades de café de forma homogênea e lenta, a fim de melhorar a qualidade e o preço do produto final.

O secador mecânico industrial mais comum é o secador rotativo horizontal (DIAS, 2019). É constituído de um cilindro metálico com paredes perfuradas, tendo no seu interior ao longo do seu centro um tubo com orifícios, onde é injetado o ar quente vindo da fornalha, apresentando movimento rotativo através de um sistema de engrenagem. Ele é composto, basicamente, por cinco elementos: fornalha, câmara de aquecimento indireto, câmara de secagem, duto de ligação e turbina (ventilador), conforme Fig 1.

Figura 1. Secador rotativo (SILVA, 2001).



O cilindro horizontal gira em torno do seu eixo longitudinal em velocidade constante e não é preenchido completamente pelos grãos, deixa-se um espaço vazio para que o revolvimento possa homogeneizar a temperatura ao misturá-los de forma mais eficiente. O forno transfere calor para o ar, na câmara de aquecimento, e este é aspirado para dentro da câmara de secagem através do duto de ligação, impulsionado pela turbina. O ar aquecido em seu eixo central é transmitido para a massa de grãos através do tubo de chapas perfuradas, e para a periferia do cilindro, gerando um fluxo de calor que impede a formação de bolsões de calor (secagem heterogênea e perda na qualidade).

Atualmente, com a falta de tecnologia de instrumentação, o processo é regido pelo subjetivo controle humano, por mero instinto e experiência do operador, o que confere

baixa precisão à secagem. Além disso, durante a colheita, o maquinário tende a funcionar em regime de 24 horas por dia, sendo comum a prática de preencher a fornalha em sua máxima capacidade para permitir períodos de ociosidade e cochilos durante a madrugada. O problema é que quando isso ocorre, não há controle nenhum da velocidade do ventilador (ar é aspirado à vazão constante), ou em relação à temperatura do ar de secagem, o que acarreta superaquecimento do lote, redução da qualidade e valor de mercado.

Independente de qual seja o tipo de secador, alguns procedimentos devem ser observados para sua melhor eficiência (Embrapa, 2005): considerar a secagem por lotes; manter secagem lenta e uniforme do produto; controlar a temperatura da massa de café, não ultrapassando 45°C; para frutos verdes, abaixar a temperatura e não ultrapassar 30°C; utilizar fornalha de fogo indireto; consumir lenha seca para reduzir produção de fumaça; conferir tempo de secagem em 24-72 horas para café de terreiro e 20hrs para o café cereja descascado; terminar secagem com umidade em 13-14%, chegando a 11-12% após resfriamento; evitar secagem excessiva, pois pode diminuir peso e facilitar a quebra durante o benefício.

Dessa forma, o presente trabalho visa preencher essa lacuna tecnológica e possibilitar a secagem com temperatura controlada para grandes volumes, utilizando sensores de temperatura com fio (inovação tecnológica proposta em patente depositada), ao aplicar controladores e atuadores nas máquinas de secagem mecânica mais comuns (fornalhas à lenha), de forma a uniformizar o processo crucial na produção de café de qualidade que, atualmente, é controlado por mera experiência dos operadores.

2 OBJETIVOS

Após desenvolvimento e teste do protótipo inicial para verificar a aplicabilidade e operacionalidade do sistema, objetiva-se elaborar um projeto de redução de custos ao implementar uma unidade de controle de baixo custo baseada no micro controlador (MCU) PIC16F877A, em substituição completa ao CLP (controlador lógico programável) e verificar a viabilidade de alteração dos equipamentos periféricos, tais como: termoresistor PT100, atuador linear elétrico do tipo pistão e tela digital. Para isso, desenvolveu-se e testou-se o algoritmo de programação do sistema de automação capaz de manter uma temperatura pré-determinada na massa de café, a partir da leitura periódica de temperatura por termopar tipo K e de atuação no processo a partir de LEDs indicadores do estado de abastecimento da fornalha, buzzer sonoro e atuador do tipo servo-motor,

para regular a vazão de entrada de ar frio (ambiente). Todas as informações do processo são mostradas na tela LCD do próprio equipamento e em qualquer computador por comunicação serial.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Na elaboração do projeto de automação para controlar a temperatura dos grãos na secagem, três possibilidades foram abordadas: controle do combustível, da velocidade do ventilador ou do atuador.

3.1 CONTROLE DO COMBUSTÍVEL (LENHA)

Existe a possibilidade de automatizar a alimentação do combustível do sistema, que pode ser de vários tipos: GLP, caldeira, casca de café, biomassa e lenha. No entanto, apenas o combustível (lenha) mais barato será analisado, uma vez que se refere ao tipo de secador mais comum encontrado no mercado, visando atender o maior número de produtores. A madeira poderia ser introduzida através de esteira de velocidade controlada, aumentando o fornecimento caso a temperatura esteja baixa, ou diminuindo-o, em caso contrário, como no caso da biomassa.

O problema é que o abastecimento apresenta resposta lenta em relação à temperatura da massa de café e uma esteira para lenha não possui boa aplicabilidade. O custo seria alto e demandaria supervisão para evitar desvios da madeira. Além disso, a queima da lenha ocorre de forma heterogênea já que, após os picos de monóxido e dióxido de carbono na combustão, a concentração do primeiro decresce, enquanto do segundo, após decrescer um pouco, volta a subir quase na proporção em que o oxigênio decai. “Isto é, sem dúvida, queima heterogênea” (CARVALHO, 1999). Ou seja, seria uma tentativa de controlar a temperatura por um processo de natureza não controlada.

3.2 CONTROLE DA VELOCIDADE DO VENTILADOR

Nos secadores atuais, o ar entra no seu interior por meio de um ventilador (turbina), ligado na rede elétrica, que trabalha em potência máxima, insuflando sempre a maior quantidade de ar possível no sistema. Seguiu-se a hipótese de que, conforme o ventilador assopre mais rápido/devagar, a temperatura do ar de entrada seria maior/menor.

Projetou-se, então, o controle da velocidade do ventilador por meio de um inversor de frequência, disponibilizando, a partir do sinal de referência, maior/menor potência (0-

100%), conforme Fig. 2.

Figura 2. Inversor de Frequência.



Contradizendo o que se esperava, observou-se empiricamente que, na medida em que se reduzia a potência elétrica fornecida ao ventilador e, assim, sua velocidade, aumentava-se a temperatura do ar de entrada, e o contrário também foi verdadeiro. O fenômeno se assemelha à resistência elétrica de um chuveiro quando, com a redução do volume de água a partir do fechamento da torneira, gera a elevação da temperatura da água. Como a quantidade de calor fornecida ao ar de entrada é constante, quanto menor for a massa de ar, proporcionalmente, maior a quantidade de calor recebida por cada unidade de massa.

Dessa forma, se for insuflada uma quantidade menor de ar na entrada do ventilador, o mesmo entrará com uma temperatura mais elevada no secador. Esta nova situação promoveria ainda mais a ocorrência de defeitos físicos, já que altas temperaturas, mesmo com menor massa de ar aquecido, promovem a oxidação da película do grão verde (RENA, 1986).

3.3 CONTROLE DO ATUADOR

A solução para controlar a temperatura da massa de café no interior do secador foi possibilitar o resfriamento do ar de entrada através da introdução de ar à temperatura ambiente, misturando-o com o ar quente proveniente da câmara de aquecimento indireto da fornalha. Isso foi possível graças a duas portinholas metálicas que permitem o acesso ao duto de ventilação. A função delas tem caráter emergencial, sendo abertas manualmente pelo operador em situações extremas de elevação de temperatura dos grãos, ou se ocorre vazamento de fumaça.

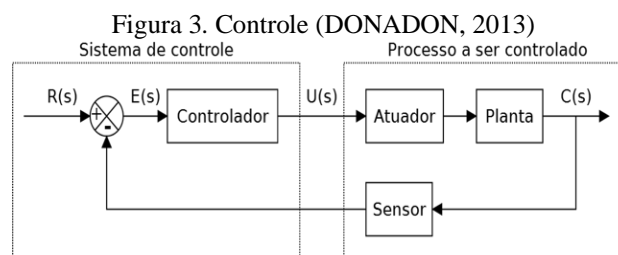
Testes iniciais de abertura manual da portinhola revelaram redução instantânea na temperatura do ar de entrada. Observou-se também que, desde que o equipamento fosse aberto em cerca de 30%, maiores alterações na posição da portinhola não eram capazes

de variar, significativamente (menores que 2°C), a temperatura do ar de entrada, e muito menos, a temperatura da massa de café. Aliado a esse fato, a constante de tempo seria muito alta por tratar-se de um processo que envolve grandes proporções de energia térmica, culminando em uma resposta lenta do sistema. Justificando, assim, a utilização do controle on/off, que é o mais barato e de mais fácil implementação; em contraposição ao PID (Proporcional Integral Derivativo) que modularia a abertura de forma específica.

3.4 CONTROLE DO SISTEMA

Quando um sistema não possui controle (malha aberta), quem ajusta a resposta $c(t)$ é o operador através da sintonia da entrada $u(t)$ (DONADON, 2013). Esse tipo de sistema representa o que ocorre atualmente na secagem mecânica do café. O instinto subjetivo do operador é o responsável por regular a entrada $u(t)$ -temperatura do ar - pelo abastecimento de combustível (lenha) na fornalha, variando a temperatura de operação da planta, que é a resposta do sistema $c(t)$.

Já o sistema de controle em malha fechada, objetivo principal do presente trabalho, envolve uma realimentação presente na malha, conforme na Fig. 3:



- $R(s)$ é a referência, trata-se do *setpoint* de temperatura para a massa de café (40°C); $[\overset{1}{\underset{SEP}{\square}}]$

- $E(s)$ é o erro do sistema, referindo-se à temperatura instantânea da massa de café $C(s)$, subtraída do *setpoint* desejado $R(s)$; $[\overset{1}{\underset{SEP}{\square}}]$

- $U(s)$ é a lei de controle, ou seja, a informação enviada para controlar a posição do atuador (avanço/retração), que se traduz em abertura/fechamento da portinhola;

- $C(s)$ é a resposta controlada, que corresponde à temperatura instantânea medida da massa de café.

3.5 SELEÇÃO DO SENSOR DE TEMPERATURA

Para os testes iniciais, escolheu-se o termoresistor PT100 em função da resistência à contaminação, estabilidade mecânica e confiabilidade. A instalação foi realizada através

de presilhas plásticas e arruelas de posicionamento, conforme Fig. 4, em uma das chapas longitudinais de revolvimento.

Figura 4. Localização Sensor Temperatura



Como o cilindro não é completamente preenchido de café, em virtude do revolvimento requerido para homogeneização, a haste do sensor foi direcionada para o centro do secador, pois, quando a chapa onde ele foi instalado atingir o ponto mais alto da sua trajetória circular, poderia faltar contato entre o sensor e os grãos. A análise da Tab. 1 comprova suficiente uniformidade longitudinal da distribuição de temperaturas ao longo do cilindro secador.

Tabela 1. Temperatura do café na posição radial e longitudinal (OCTAVIANI, 2004).

Secagem	Temperatura do ar de Secagem (°C)	Temperatura Ambiente (°C)	Posições (m)					
			0.25	0.75	1.25	1.75	2.25	2.75
1	80.8	26.3	34.2	33.9	34.6	33.9	33.9	33.0
2	101.7	25.8	37.3	36.8	38.7	38.0	39.2	38.0
3	89.5	25.6	30.5	29.5	29.7	28.6	28.5	28.1
4	100.1	26.2	34.0	35.1	36.3	36.3	35.6	34.2
5	66.1	23.7	26.9	27.2	27.8	27.1	26.8	26.3
6	77.4	23.9	33.3	34.2	35.7	35.0	35.8	33.2
7	87.8	21.8	30.1	30.3	31.2	30.4	30.4	29.4
8	83.8	21.5	31.5	32.9	33.8	33.2	33.3	31.2
9	93.3	22.1	31.0	31.7	33.6	33.2	33.3	31.4
10	96.5	22.4	31.	32.5	35.3	33.8	35.1	33.1
11	106.4	23.9	29.9	29.8	28.8	29.0	29.0	28.8
12	98.2	24.5	32.3	33.1	34.2	32.9	34.0	30.2

Os registros mostram comportamento linear da temperatura do ar de saída, ao longo do comprimento, havendo, em alguns casos, pequena tendência ao aumento da temperatura do ar nas posições centrais do cilindro, o que, todavia, não prejudica a homogeneidade da distribuição do ar na massa de café (OCTAVIANI, 2000). Considerou-se, portanto, a utilização de apenas um sensor na massa de café, suficiente para o controle de temperatura.

3.6 SELEÇÃO DO CONECTOR

O movimento rotativo dos secadores é um empecilho para o monitoramento em

tempo real dos parâmetros, pois é necessário que os sensores instalados dentro do secador enviem o sinal para uma central estática externa, o que criaria uma resultante de torção no fio, até que ele se rompesse. Uma das alternativas existentes é a utilização da tecnologia *wireless*. No entanto, optou-se pela busca de outros métodos pois, por não haver meio físico, não há alimentação de energia pela rede, necessitando o uso de baterias, trocadas periodicamente, diminuindo a operacionalidade do sistema, o que elevaria os custos e inviabilizaria o projeto.

A solução foi a instalação de um conector rotativo. Este equipamento transfere potência elétrica ou sinais de circuitos através de superfície rotativa, por mercúrio ou *slip-rings* (contato entre escovas), entre outros. Deve-se posicioná-lo no eixo central de rotação da máquina, com sua parte fixa na parte estática do secador e a outra na parte girante. Isso evita que o movimento gere uma torção dos fios e sua consequente ruptura.

Inicialmente, utilizou-se um conector rotativo de mercúrio. Contudo, após dois dias de testes, além de não suportar as altas temperaturas, o conector não foi capaz de desempenhar sua função, apresentando atrito que acarretou o rompimento do fio, conforme Fig. 5, à esquerda.

A saída foi solicitar a fabricação de um conector robusto na China, capaz de operar a 300°C e eliminar completamente a resultante de torção. O modelo fabricado sob encomenda, operou por toda a safra sem apresentar qualquer tipo de problema.

Figura 5. Conector queimado; e a solução.

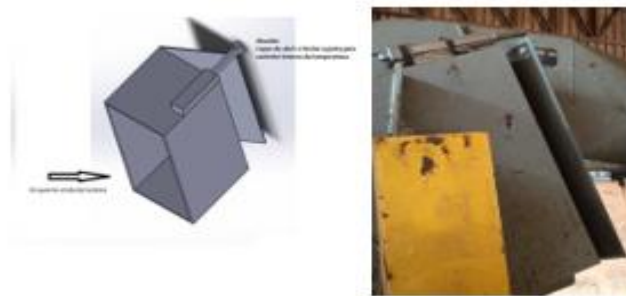


3.7 SELEÇÃO DO ATUADOR

Inicialmente, projetou-se a aplicação de um atuador elétrico linear, capaz de realizar a abertura/fechamento total da portinhola a partir de adaptação mecânica para transformar o seu deslocamento linear em movimento angular de abertura. A informação foi transmitida por um sinal de comunicação proveniente do CLP (Controlador Lógico Programável) que, a partir dos dados de temperatura, determina o momento de fechar ou abrir totalmente a estrutura. Conforme Fig. 6, uma manta térmica foi colocada sob o atuador para evitar que as altas temperaturas gerassem altas taxas de transferência de calor

por condução, prejudicando seu funcionamento.

Figura 6. Simulação e Instalação Atuador



3.8 UNIDADE LÓGICA DE CONTROLE E CUSTO FINAL

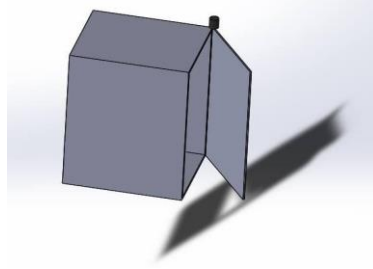
Apesar de ser mais caro que outras unidades disponíveis no mercado como Arduíno e MCU (Unidade de Micro Controlador), o CLP é mais confiável e possui certificação industrial de segurança. A programação do CLP foi realizada através do software ISPsoft versão 1.03, por programação Ladder. No entanto, os resultados preliminares de análise de preço e possível inserção no mercado revelaram que o custo total do projeto final ultrapassou em 280% as metas de estimativas iniciais.

3.9 DESENVOLVIMENTO E REDUÇÃO DE CUSTOS

Uma nova abordagem de redução de preço a partir da substituição dos componentes foi realizada objetivando a fabricação de um novo protótipo e teste através de plataformas de simulação. O ponto crucial seria a troca do controlador. O custo do micro controlador (PIC16F877A) mais simples, capaz de substituir o CLP, seria 10 vezes menor em relação ao modelo utilizado anteriormente, e possibilitaria o desenvolvimento do protótipo.

A partir daí, avaliou-se a viabilidade de inserção de novos componentes periféricos mais acessíveis. Definiu-se para o novo projeto um atuador angular de posição, servo-motor, em razão da acessibilidade e baixo custo. Nesse caso, testes ainda precisam ser realizados em instalação real para verificar a torção aplicada à portinhola. A Fig.7 revela a simulação desenvolvida no SolidWorks para validação geométrica e aplicabilidade.

Figura 7. Abertura e fechamento da portinhola por servo-motor angular.



Inicialmente, no projeto da placa controlada pelo MCU, foi feita a alocação de funcionalidades para os 4 grupos de dispositivos: entradas digitais, saídas digitais, entradas analógicas e saídas analógicas. Em seguida, foi desenvolvido o modelo utilizando o software Proteus 8.1 para simular testes e viabilizar o funcionamento do programa na placa. A partir daí, simulou-se a montagem no *software* Fritizing, e então, realizou-se a construção final e os testes de validação do projeto. Por fim, implementou-se uma interface entre o computador e a placa através do *software* LabView, capaz de ler e enviar dados pela comunicação serial.

As entradas digitais foram definidas em 6 botões: incrementar *setpoint* (SP) de temperatura a ser mantida, ou diminuí-la; confirmar ações e dar início ao processo; redefinir parâmetros de configuração do sistema (taxa de amostragem dos dados e display LCD); silenciar alarme de falta de lenha para permitir a alteração da resposta do sistema ao abastecimento; e simular um sensor na porta de entrada de café.

As saídas digitais incluem: um servo-motor que ativa a abertura/fechamento da porta de entrada de ar caso a temperatura ultrapasse 5°C acima/abaixo do SP; um cooler simula o ventilador que insufla ar quente para dentro da câmara de secagem, devendo ser desligado em situações de emergência; um LED (vermelho) indica que o operador não pode colocar mais lenha na fôrnalha; e um LED (verde) indica que ele deve abastecê-la (quando a temperatura se mantiver 2°C abaixo do SP por um período de 10min).

As entradas analógicas são: um sensor de umidade, ainda não disponível no mercado, para finalização automática do processo, já que o objetivo da secagem é reduzir a umidade dos grãos a 12% b.u. para evitar a proliferação de fungos na armazenagem; e um sensor de fumaça para permitir o desligamento do ventilador e abertura da portinhola, caso acuse a presença de monóxido de carbono. Na fôrnalha de queima indireta, os gases resultantes da combustão são eliminados diretamente pela chaminé. Se perfurada, o ventilador insuflará fumaça para a câmara de secagem, o que reduz, drasticamente, o preço de venda do fruto.

As saídas digitais incluem: um alarme (*buzzer*) controlado por sinal PWM (Pulse Width Modulation) que atua de duas formas distintas: o sinal contínuo indica situações de falta de lenha, caso o operário esteja longe ou dormindo, ele saberá que o processo necessita de calor. Já o sinal pulsado (bipe intervalado), indica situação de emergência (vazamento de fumaça), em que o operador deverá parar qualquer atividade para checar a fornalha.

3.10 MONTAGEM DO HARDWARE E SIMULAÇÃO

O hardware final é composto por uma tela LCD com a função de mostrar a temperatura de secagem; indicar a conclusão do processo; monitoramento constante da umidade dos frutos; visualizar aviso de falta de lenha, excesso de lenha ou detecção de fumaça; mostrar abertura/fechamento da porta de ar ambiente; tipo de café que está sendo secado; set-point; taxa de amostragem e estado do ventilador. O potenciômetro simula o nível de monóxido de carbono para caso ultrapasse o valor estabelecido, o sistema de injeção de ar quente, para que seja desligado imediatamente, e o alarme acionado. A porta de comunicação (RS232) transmite os dados de umidade, porcentagem de fumaça e temperatura da massa de café para o PC, gerando um gráfico da temperatura de secagem no tempo, constatando a adequação do procedimento, o que valorizaria o produto final. A modelagem computacional do projeto no Proteus 8.1 e a interface criada no LabView são mostradas na Fig. 8.

Figura 8. Montagem do circuito de simulação, Proteus 8.1 e interface LabView.



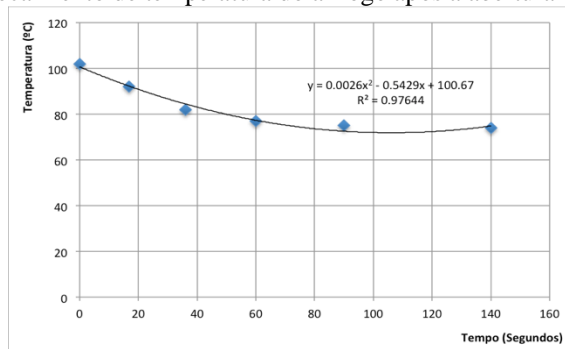
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do tempo de decaimento da temperatura do ar de entrada, inicialmente a 100°C, a partir da abertura da portinhola pelo atuador, indicou 10°C de decréscimo em 16,8s; 20°C em 36,0s; e 25°C em 60s.

O decaimento na temperatura mostrou ter resposta instantânea à abertura da

portinhola. Na medida em que a temperatura diminui, o tempo para gerar um mesmo gradiente negativo de temperatura vai aumentando até que o sistema apresente por volta de 30°C de decréscimo total, tendendo a se estabilizar, conforme mostrado no gráfico da Fig. 9. Ou seja, a abertura total de uma portinhola foi capaz de reduzir por volta de, no máximo, 30% do valor inicial, processo que levou menos de 4 minutos, em todas as observações realizadas.

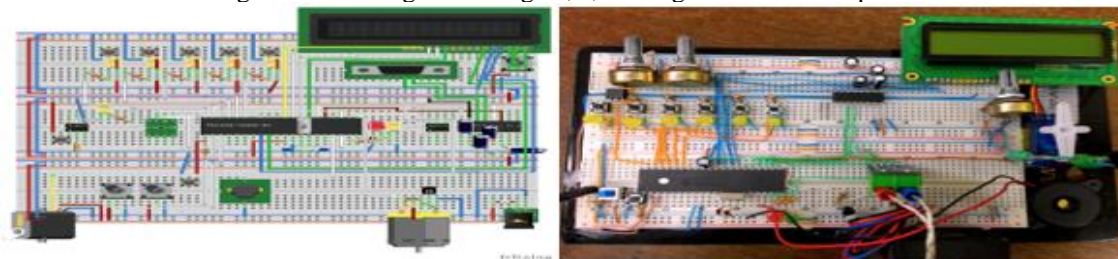
Figura 9. Decaimento de temperatura do ar logo após a abertura da portinhola.



A capacidade de decaimento da temperatura com a abertura da portinhola para menores temperaturas iniciais do ar de entrada (80°C) foi diminuída, registrando redução máxima de 17°C, 22,25% do valor inicial. Após a redução da temperatura do ar de entrada pela abertura da portinhola, a temperatura média da massa de café (15.000 litros) demorou, em média, 22min para iniciar o decaimento, o que corroborou a ineficácia de possível utilização do controle PID.

O projeto de fabricação realizado no Fritzing e o resultado final da montagem da protoboard são mostrados na Fig. 10.

Figura 10. Fritzing de montagem, e, montagem final real da placa.



A taxa de amostragem e os dados apresentados no LCD foram configuráveis na inicialização e a qualquer momento através da conexão serial. A memória *eeprom* foi capaz de gravar esses parâmetros de configuração para que, em caso de falta de energia, fossem restaurados. Os valores analógicos mostraram a média dos dados calculados pelo

algoritmo em um intervalo de tempo selecionado e as saídas digitais puderam ser controladas manualmente através da interface desenvolvida no *software* LabView.

5 CONCLUSÕES

Dada a queima heterogênea da madeira, o processo de controle do combustível fornecido provou ser inadequado para uniformização da temperatura e de baixa aplicabilidade já que apresentaria baixa precisão e picos de temperatura no café durante a secagem.

A variação na velocidade do ventilador no intuito de reduzir a potência máxima de operação provou-se inadequada, já que atuou na contramão do objetivo central do trabalho, potencialmente reduzindo a qualidade de secagem do grão.

O sistema foi submetido a set-points variados comprovando seu funcionamento e eficácia do algoritmo, sendo capaz de retirar completamente o poder de decisão de controle e abastecimento das mãos do operador, evitando prejuízos na qualidade ou secagem excessiva.

O sistema atendeu os objetivos do projeto e revelou adequada aplicabilidade à secagem mecânica de café. A redução de custos promovida pelo MCU abrange muito mais do que apenas o controlador em si, quando comparado ao CLP. Todos os outros componentes da protoboard montada revelaram preços acessíveis, desde o LCD, fontes, atuadores e sistemas de comunicação com o PC. O protótipo representa uma inovação no setor e os resultados preliminares foram suficientes para justificar o investimento em testes de maior escala no período de safra, para automatizar todo o processo de secagem mecânica de café.

REFERÊNCIAS

BACHA, E. L. Análise Econométrica do Mercado Internacional de Café e da Política Brasileira de Preços. Ensaio Econômico da EPGE, n. 2. Instituto Brasileiro de Economia da Fundação Getúlio Vargas, 1970;

CARVALHO, E. R. Investigação sobre incandescência em madeira. Dissertação de Mestrado, São José dos Campos, 1999.

CUNHA, M.L. Canto, M.W.; Cortez, J.G. Ensaio preliminar sobre a secagem de café cereja descascado por ar quente assistido a microondas. 21º Congresso Brasileiro Pesquisas Cafeeiras, p.147-150, 1995.

DIAS, W. B.; Finzer, J. R. D. Secagem de feijão carioca em secador rotativo / Carioca bean drying in rotating dryer. Brazilian Journal of Development, Vol. 5, nº 3, 2019.

DONADON, L. V. Fundamentos da teoria de controle – Notas de aula. UFMG, 2013; EMBRAPA - Sistemas de Produção de café, acessado em 08/07/2015. Disponível em <<http://sistemasdeproducao.cnptia.embrapa.br/Cafe/CultivoCafeRobustaRO/colheita>>.

GODINHO, R. P. Vilela, E. R.; Oliveira, G. A.; Chagas, S. J. R. Variações na cor e na composição química do café. Revista Brasileira de Armazenamento. Viçosa, 2000.

MENDES, A.N.G.; Abrahao, E.J.; Cambraia, J.F.; Guimaraes, J.R. Recomendações técnicas para a cultura do cafeeiro no Sul de Minas. Biblioteca Rui Tendinha, Lavras, UFLA, 1995. 54p.

MOREIRA, D. H. F.; Freitas, F. F.; LANDY, C. C. R.; Charbel, A. L. T. Análise da secagem de café em secador solar passivo direto / Analysis of coffee drying in direct passive solar dryer. Brazilian Journal of Development, Vol. 5, nº 9, 2019.

OCTAVIANI, J. C. Avaliação de qualidade e custos de secagem de café cereja descascado desmucilado, em secador horizontal rotativo, com utilização de lenha de eucalipto e GLP. Journal Ecosystema, Vol. 29, nº2, 2004.

RENA, A.B.; Malavolta, E.; Rocha, M.; Yamada, T. Cultura do cafeeiro: fatores que afetam a produtividade. Associação de Pesquisa do K e Fosfato. Piracicaba, 1986.

SILVA, J. S.; Sampaio, C. P.; Machado, M. C; Monaco; P. A. Secagem e Armazenagem de café – tecnologia e custos. Livro, Cap. 1, UFV, Viçosa, 2001.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao LaBBio da UFMG por incentivar o desenvolvimento tecnológico no Brasil por meio dos programas e fomento à pesquisa.

FINANCIAMENTO

Gratifica-se o DRI – UFMG (Diretoria de Relações Internacionais) por promover o relacionamento entre jovens cientistas de países membros da AUGM (Associação de Universidades do Grupo Montevidéu) e incentivar a integração entre os trabalhos criados, além de promover as redes interpessoais, de caráter científico e acadêmico, e possíveis grupos de investigação científica regional.