

CONCEPÇÃO E TESTE DE UM PROTÓTIPO DE AUTOMAÇÃO DE BAIXO CUSTO ADAPTÁVEL A SECADORES ROTATIVOS DE CAFÉ A LENHA

ARTHUR F. R. DELFIM¹; ANTÔNIO A. T. MAIA²; EDUARDO J. LIMA II³

¹ Mestrando, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, (37)3371-1140, arthurdelfim@me.com

² Professor Doutor, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, (31)3409-5000, aamaia@ufmg.br

³ Professor Doutor, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, (31)3409-5000, ejlima2@gmail.com

Apresentado no
XLVI Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2017
30 de julho a 03 de agosto de 2017 - Maceió - AL, Brasil

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; Engenharia Agrícola.

CONCEPTION AND TEST OF A LOW-COST AUTOMATION PROTOTYPE ADAPTED TO ROTATIONAL COFFEE DRYERS OF WOOD COMBUSTION

ABSTRACT: According to studies, the coffee drying process is the most crucial stage to determine the quality of the final product. International market demand for high quality coffee increases each year, and the market offer is not able to follow this growth (Sato, 2014), what reveals that many impasses and obstacles are found by coffee producers in their way to enhance its quality. One of them, and maybe the most harmful, is the variability of the drying air's temperature, and if not controlled, causes physical damage such as grain discoloration, breaks and cracks, and also chemical damage, where fat acidity increases and lead to alterations in the structure of volatile compounds, favoring the poor quality of the drink. Taking this point of view, the present paper shows the design, installation and quality test of an automation project for the coffee drying process, showing the viability of low-cost industrial controllers (PIC16f877A), being able to keep a pre-set temperature of the grains inside the machines during the entire process.

KEYWORDS: Project; Automation; Dryer; Coffee; Agriculture Engineering.

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 da indústria do café (Bacha, 1970).

As análises mercadológicas mais recentes indicam o aumento de qualidade e produtividade como a solução para lucratividade do setor, aliado a um distanciamento cada vez maior da herança latifundiária, onde objetivava-se, essencialmente, o caráter quantitativo da produção. No contexto de aumento qualitativo da produção, a secagem se mostra como o fator crítico no 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). Uma secagem perfeita, deve ser lenta e uniforme para evitar a quebra da estrutura celular de grãos, dar a uniformidade de cor e consistência dos grãos, 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, conseqüentemente, o preço do produto final.

O secador mecânico industrial mais comum é o secador rotativo horizontal. É constituído de um cilindro metálico com paredes perfuradas, tendo no seu interior ao longo do seu centro, um tubo perfurado 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.

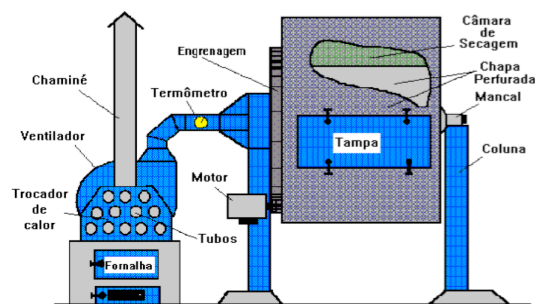


FIGURA 1. Esquema dos componentes de um secador rotativo (Silva et. al, 2001).

O cilindro horizontal gira em torno do seu eixo longitudinal em velocidade constante em torno de 15 rpm. O cilindro não é preenchido completamente pelos grãos (é deixado propositalmente um espaço vazio) para que o revolvimento possa homogeneizar a temperatura ao misturá-los de forma 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 constante e impedindo a formação de bolsões de calor (que geraria secagem heterogênea e conseqüente perda na qualidade).

Atualmente, com a falta de tecnologia de instrumentação no mercado, o processo é regido pelo controle humano de forma subjetiva, 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, conseqüentemente, valor de mercado.

Independente de qualquer que seja o tipo de secador, alguns procedimentos devem ser observados para sua melhor eficiência (Embrapa, 2005): Considerar 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.

A partir desse ponto de vista, o presente trabalho visa preencher essa lacuna tecnológica e possibilitar 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.

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: termo-resistor 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 simultaneamente em qualquer computador através de comunicação serial.

MATERIAL E MÉTODOS

Na elaboração do projeto de automação para controlar a temperatura dos grãos de café no interior do secador, três possibilidades foram abordadas: controle do combustível, da velocidade do ventilador ou da temperatura do ar de entrada.

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 a 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.

O problema é que a madeira possui resposta lenta em relação à temperatura da massa de café, e a aplicabilidade de uma esteira para lenha nesse processo é baixa. O equipamento seria

de custo relativamente alto e demandaria supervisão para evitar desvios da madeira. Um estudo (Carvalho, 1999) provou que a queima da lenha ocorre de forma heterogênea ao mostrar que, após os picos de monóxido e dióxido de carbono, a concentração do primeiro decresce, enquanto do segundo, após decrescer um pouco, volta a subir quase na proporção em que o oxigênio decai. Concluindo: “Isto é sem dúvida queima heterogênea”. Ou seja, seria uma tentativa de controlar a temperatura por um processo de natureza não controlada.

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 o tempo todo em sua potência máxima, insuflando sempre a maior quantidade de ar possível no sistema. Seguiu-se a hipótese de que, conforme o ventilador sopra 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 de sinal de referência maior/menor potência (0-100%) caso a temperatura esteja abaixo/acima do desejado, conforme Fig. 2.



FIGURA 2. Instalação do Inversor de Frequência.

Contradizendo o que se esperava, foi observado, empiricamente, que na medida em que se reduzia a potência elétrica fornecida ao ventilador e, conseqüentemente, sua velocidade, aumentava-se a temperatura do ar de entrada, e o contrário também foi verdadeiro. O fenômeno pode ser comparado à resistência elétrica de um chuveiro, quando 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).

Controle do Atuador

A solução encontrada 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 aquecido 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 da massa de café, ou quando ocorre vazamento de fumaça.

Testes iniciais de abertura manual da portinhola mostraram o potencial deste tipo de controle em reduzir de forma instantânea a 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 se tratar de um processo que envolve grandes proporções de energia térmica, acarretando uma resposta para a mudança de temperatura da massa de café muito lenta em relação à variação da temperatura do ar de entrada. Justifica-se, então, a utilização do controle on/off, que é o mais barato e de mais fácil implementação e funcionamento; em contraposição ao PID, que modularia uma quantidade específica de abertura/fechamento, o que não melhoraria o tipo de sinal resultante de forma significativa.

Controle do Sistema

Quando um sistema não possui controle, muitas vezes chamado de malha aberta, quem ajusta a resposta $c(t)$ é o operador através da sintonia da entrada $u(t)$ (Donadon, 2013). Ou seja, esse tipo de sistema representa o que ocorre atualmente no processo de secagem mecânica do café. O instinto subjetivo do operador é o responsável por regular a entrada $u(t)$, que no caso é a temperatura do ar de entrada, pelo aumento de combustível (lenha) na fornalha, aumentando ou diminuindo 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 pelo menos uma realimentação presente na malha, como é mostrado na Fig. 3:

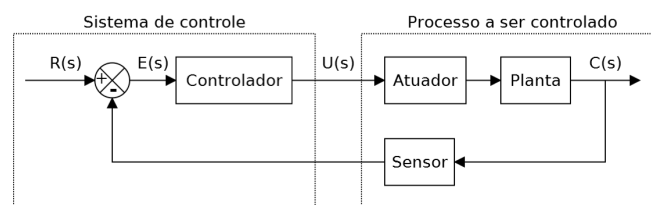


FIGURA 3. Representação do sistema (Donadon, 2013).

- $R(s)$ é a referência, set-point de temperatura ajustado para a massa de café que (40°C);
- $E(s)$ é o erro do sistema de controle - Refere-se à temperatura instantânea medida da massa de café $C(s)$, subtraída da temperatura desejada $R(s)$;
- $U(s)$ é a lei de controle, informação enviada pelo CLP para controlar a posição do atuador em relação ao avanço/retração do pistão, que se traduz em abertura/fechamento da portinhola;
- $C(s)$ é a resposta controlada real, temperatura instantânea medida da massa de café.

Seleção do Sensor de Temperatura

Inicialmente para testar a operacionalidade, o termo-resistor PT100 foi escolhido, principalmente, em função da alta estabilidade mecânica, resistência à contaminação e confiabilidade. Para a massa de café, instalou-se através de presilhas plásticas e arruelas de posicionamento em uma das chapas longitudinais de revolvimento, conforme Fig. 4.



FIGURA 4. Sensor PT100 no interior do cilindro e localização na chapa de revolvimento.

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 variando a posição radial e longitudinal (Octaviani, 2000).

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.

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, através de mercúrio ou slip-rings (do tipo contato entre escovas), entre outros. O equipamento deve ser posicionado 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, não foi capaz de desempenhar sua função, apresentando atrito que rompeu o fio e queimou o equipamento, conforme Fig. 5, à esquerda.

A saída foi solicitar a fabricação de um conector robusto na China, capaz de resistir a temperaturas de 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.

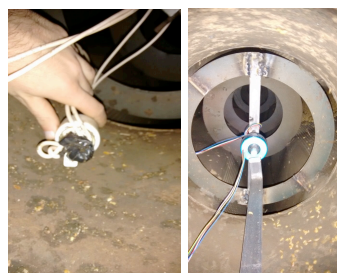


FIGURA 5. À esquerda, o conector queimado; e à direita, a solução que funcionou.

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, que a partir dos dados de entrada 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 o funcionamento do equipamento.

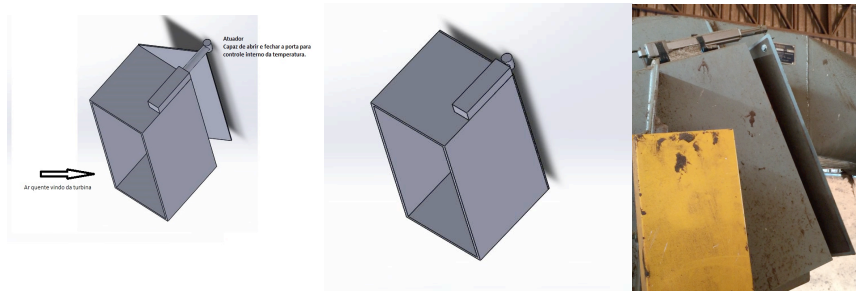


FIGURA 6. Abertura e fechamento da portinhola.

Unidade Lógica de Controle e Custo Final

Apesar de ser mais caro que outras unidades disponíveis no mercado (Arduíno e MCU), 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.

Desenvolvimento do projeto de 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 no mercado, capazes de comunicar com o novo MCU (Micro Controller Unit). Definiu-se para o novo projeto um atuador angular de posição, servo-motor, em razão da disponibilidade no mercado e baixo custo. Mas nesse caso, testes ainda precisam ser realizados em instalação real para validação do momento tórcor aplicado à portinhola. A Fig.7 revela a simulação desenvolvida no SolidWorks para validação geométrica e aplicabilidade.

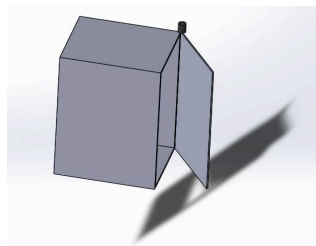


FIGURA 7. Abertura e fechamento da portinhola por servo-motor angular.

O projeto da placa controlada pelo MCU foi subdividido em etapas para viabilizar a montagem e execução. Inicialmente, 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, conforme Fig. 8, para simular testes e viabilizar o funcionamento do programa na placa. A partir daí realizou-se o Fritzing de montagem do circuito, de forma que seja o mais próximo possível do projeto a ser construído e, finalmente, a montagem do circuito e testes finais do software para validar o trabalho, estando ambos mostrados na seção de resultados na Fig. 10. Realizou-se então, a implementação de uma interface entre o computador e a placa através do software LabView, capaz de ler e enviar dados pela comunicação serial, conforme visualizado na Fig. 8.

As entradas digitais foram definidas em 6 botões: incrementar set-point (SP) de temperatura a ser mantida; ou diminuí-la. Confirmar ações e dar início ao processo; reconfigurar, instantaneamente, parâmetros de configuração do sistema (taxa de amostragem dos dados e display LCD); silenciar alarme de falta de lenha para que permita 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 controla a abertura/fechamento da porta de entrada de ar caso a temperatura ultrapasse 5 graus acima/abaixo do SP determinado. Um cooler que simula o ventilador que insufla ar quente para dentro da câmara de secagem, devendo ser desligado em situações de emergência. LED (vermelho) para indicar que o operador não pode colocar mais lenha na fofalha e um LED (verde) para indicar que o operador deve colocar mais lenha na fofalha (quando a temperatura se mantiver 2 graus abaixo do SP por um período de 10 minutos).

As duas entradas analógicas são compostas por um sensor de umidade, ainda não disponível no mercado, para que, possa finalizar o processo automaticamente já que o objetivo da secagem consiste em reduzir a umidade dos grãos de café a 12% b.u., permitindo o armazenamento ao evitar a proliferação de fungos; e um sensor de fumaça para permitir o desligamento do ventilador e abrir a porta de entrada de ar imediatamente caso acuse a presença de monóxido de carbono. Na fofalha de queima indireta, os gases resultantes da combustão são diretamente eliminados pela chaminé. Se perfurada, o ventilador insuflará fumaça para a câmara de secagem o que reduzirá o preço de venda do fruto.

As saídas digitais incluem um alarme (buzzer) controlado por sinal PWM a partir da saída do Pino C1 que trabalhará de duas formas distintas: 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, como um bipe intervalado, indicará situação de extrema emergência (vazamento de fumaça) e deverá parar qualquer atividade para checar a fofalha.

Montagem do Hardware e Teste de Simulação

O hardware final é composto por uma tela LCD com a função de mostrar a temperatura de secagem; indicar 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 seja desligado imediatamente, e o alarme acionado. A porta de comunicação serial RS232 transmite os dados de umidade e porcentagem de fumaça e da temperatura da massa de café de 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 realizada no Proteus 8.1 e a interface criada no LabView são mostradas na Fig. 8.

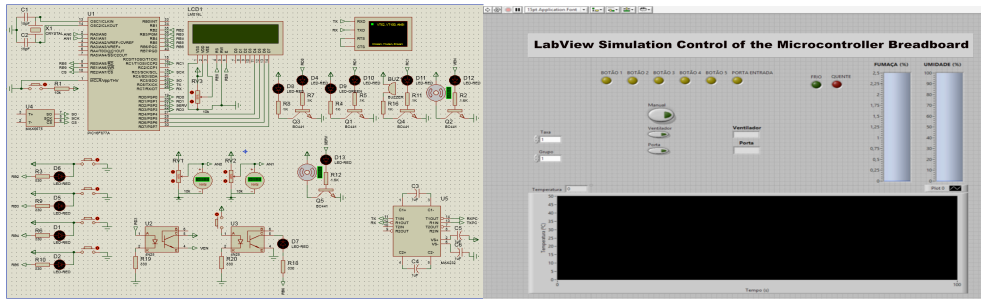


FIGURA 8. Montagem do circuito para simulações no Proteus 8.1 e interface no LabView.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise do tempo de decaimento da temperatura do ar de entrada, inicialmente a 100°C, a partir do momento em que se abria a portinhola através do atuador, indicou 10°C de decréscimo em 16,8 segundos; e 20°C em 36,0s; 25°C em 1 minuto.

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, e tende 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.

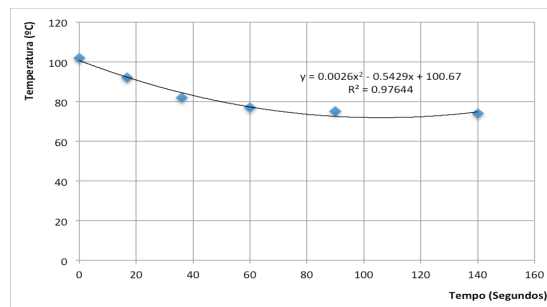


FIGURA 9. Gráfico de decaimento de temperatura do ar logo após abertura da portinhola.

A capacidade de redução do 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, apenas 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, 22 minutos para iniciar o decaimento, o que corroborou a ineficácia de possível utilização do controle PID.

O projeto de fabricação da Protoboard realizada no Fritzing é mostrado na Fig. 10, assim como o resultado final de montagem da placa.

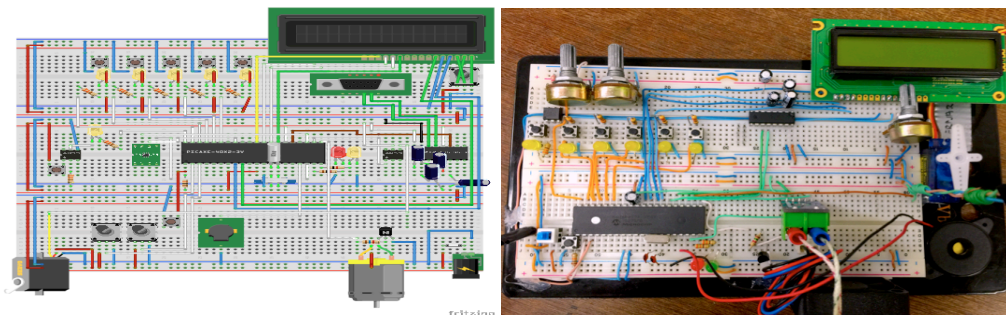


FIGURA 10. À esquerda Fritzing de montagem, e à direita, montagem final real da placa.

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 de conexão serial pela interface desenvolvida no software LabView.

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 em que o ventilador opera a 60Hz 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 proto-board 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 escala real 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**. Ensaios Econômicos 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. **Ensaios preliminares sobre a secagem de café cereja descascado por ar quente assistido a microondas**. 21º Congresso Brasileiro Pesquisas Cafeeiras, p.147-150, 1995.
- 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 Sui de Minas**. Lavras, UFLA, 1995. 76p.
- 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**. Campinas, 2000.
- 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**. UFV, Viçosa, 2001.