

Sistema de Monitoramento em Tempo Real da Cor e Temperatura dos Grãos de Café Durante a Torrefação

Rennan Alves Cardoso
*Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Sistemas e Automação
Universidade Federal de Lavras
MG, Brasil
rennanalves@yahoo.com.br*

Flávio Meira Borém
*Departamento de Engenharia
Universidade Federal de Lavras
MG, Brasil
flavioborem@ufla.br*

Bruno H. G. Barbosa
*Departamento de Automática
Universidade Federal de Lavras
MG, Brasil
brunohb@ufla.br*

Abstract—A cor e a temperatura dos grãos de café são duas variáveis muito importantes de serem monitoradas para avaliar o grau de torra do mesmo, durante uma torrefação. No entanto, os torradores comerciais atuais não possuem sistema de monitoramento dessas variáveis em tempo real. Nesse sentido, este trabalho propõe um sistema de medição de cor de grãos de café e um sistema supervisorio para monitoramento das temperaturas envolvidas durante o processo. Este sistema foi projetado para operação em torradores de tambor rotativo horizontal. Para tal, foi construído um sistema de visão computacional (VC) e dois termopares tipo K foram posicionados de forma apropriada no interior do torrador. O sistema de visão é composto por uma estrutura obtida por meio de impressão 3D que sustenta e direciona uma câmera digital de baixo custo (*Webcam USB*) e um sistema de iluminação para capturar imagens (formato RGB) de grãos no torrador. Os termopares foram conectados a um chassi NI CompactDAQ USB, para condicionar e converter o sinal analógico para digital. Todos os elementos, câmera e chassi, foram conectados em um computador pessoal e um programa desenvolvido em LabVIEW foi utilizado para adquirir imagens e temperaturas e fazer os processamentos necessários. Cada imagem foi adquirida a frequência de 2 Hz e, posteriormente, segmentada e analisada de forma que a cor dos grãos seja fornecida na escala AGTRON, muito utilizada em processos de torrefação. As temperaturas foram adquiridas a uma frequência de 3 Hz e, a partir de uma interface gráfica implementada, os valores de cor e temperatura são apresentados ao usuário em tempo real. O sistema aqui projetado mostrou-se adequado para o monitoramento das temperaturas e cor em tempo real, durante a torrefação.

Index Terms—torrefação, café, cor, visão computacional, automação

I. INTRODUÇÃO

O café é um produto agrícola cujo a qualidade é determinada principalmente pelos compostos químicos presentes nos grãos, desenvolvidos a partir das interações entre os fatores genéticos, ambientais e tecnológicos [1], [2]. Muitas tecnologias são utilizadas para transformar os grãos do café em um produto consumível, dentre elas, a torrefação tem um papel fundamental.

Os autores gostariam de agradecer à CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte financeiro.

O processo de torrefação possui o papel de transformar as propriedades físicas e químicas dos grãos que originarão os compostos responsáveis pelas propriedades organolépticas (aroma, sabor e cor) percebidas na bebida café [9]. Quando os grãos não estão torrados (grãos cru) o aroma é fraco e o sabor da bebida é diferente [3]. Durante a torrefação, os grãos de café passam por uma série de reações de pirólise que criam compostos responsáveis pelo aroma e sabor, bem como mudanças perceptíveis de volume, textura e cor [5]. A intensidade dessas reações é ditada pela quantidade de calor absorvido e tempo que este permanece nos grãos [4]. Portanto, um controle em tempo real da temperatura, que utiliza o monitoramento das variáveis observáveis aroma, sabor e cor dos grãos é idealmente requerido. No entanto, como as análises de aroma e sabor são difíceis de serem obtidas na prática, a cor dos grãos é a principal variável utilizada [5].

Em geral, a cor dos grãos é o principal parâmetro de qualidade avaliado pelos operadores responsáveis pela torração, pois é de fundamental importância na aceitação do produto perante o mercado e está associado ao sabor da bebida e ao nível de satisfação do consumidor. Portanto, prever e controlar a evolução da cor dos grãos são questões importantes para as indústrias de torrefação [6].

Vários sistemas de torrefação disponíveis no mercado ainda dependem da experiência do operador para avaliar a cor dos grãos, usando análises visuais, sendo essas avaliações muitas vezes não consistentes e de pouca precisão [8]. Métodos não destrutivos, baseados em VC, possuem grande potencial para superar as deficiências das análises sensoriais, pois podem fornecer resultados em tempo real, consistentes e quantitativos [7] e [10].

Um sistema de visão computacional proposto por [9], foi projetado para monitorar a cor da superfície dos grãos em tempo real, durante a torrefação, em um torrador piloto estático com ventilação forçada (marca SERVATHIN série SV02 7817). Vale ressaltar que o sistema lá proposto, apesar de ter obtido bons resultados, possui aplicação muito limitada, uma vez que foi projetado para um sistema onde os grãos de

café não se movimentam. Portanto, trata-se de uma solução pouco eficiente pois, em muitos casos, a torrefação ocorre em sistemas rotativos onde os grãos se movimentam durante a torrefação.

Dessa forma, o objetivo deste trabalho foi projetar um sistema de automação que forneça informações em tempo real sobre a cor dos grãos do café e temperaturas envolvidas em um processo de torrefação. Para isso, um sistema de VC foi implementado para capturar e processar imagens, de forma a monitorar o grau de torra (valor de AGTRON) em um torrador de tambor rotativo horizontal. Além do sistema de VC, um supervisor foi desenvolvido para apresentar ao usuário tanto a cor dos grãos quanto as temperaturas fornecidas por sensores do tipo termopar, inseridos apropriadamente dentro do forno e condicionados por uma placa de aquisição de dados. Todo o sistema foi projetado no LabVIEW (versão 2016).

II. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção é apresentada a descrição do sistema de visão computacional e de aquisição de temperatura projetado. As principais características e funcionalidades deste sistema são apresentadas, bem como as etapas do algoritmo em LabVIEW e os métodos utilizados em sua construção.

A. O Torrador de Cafés

O torrador de cafés utilizado neste trabalho é da marca ATILLA modelo GOLD (figura 1). Trata-se de um torrador rotativo horizontal, com capacidade de torrar 5 kg de cafés. Este torrador, de forma simplificada, é composto por (vide figura 1 (b)): *i.* câmara rotativa cuja velocidade angular é controlada pelo motor M1, acionado por um inversor de frequência da marca WEG modelo CFW10; *ii.* sistema de queima de gás (GLP) controlado por válvula manual (HV01); *iii.* sistemas de ventilação com fluxo de ar obtido por meio de controle do motor M2 também acionado por um inversor de frequência da mesma marca e modelo mencionada anteriormente; *iv.* dois termopares do tipo k, TT01 e TT02, para medição de temperatura do fluxo de ar e dos grãos, respectivamente.

A figura 2 apresenta os equipamentos envolvidos no sistema de monitoramento de variáveis do processo de torração. Além da instrumentação do torrador apresentada na figura 1 (a), fazem parte do sistema: *i.* sistema de visão computacional; *ii.* sistema de aquisição de temperatura; e *iii.* computador pessoal com sistema supervisor implementado em LabVIEW. O computador pessoal possui como configuração: Pentium(R) Dual-Core com 2.1 GHz, memória RAM de 4 GB com acesso controlado. Os demais itens serão detalhados nas seções seguintes.

B. Sistema de Visão Computacional

A área disponível que o sistema de VC possui para capturar as imagens dos grãos de café no torrador é pequena, conforme apresentado na figura 1. Normalmente isso ocorre em diversos torradores de pequeno porte, o campo de visão é apenas um pequeno orifício com vidro temperado que separa a câmara de torrefação do ambiente externo. O formato do orifício

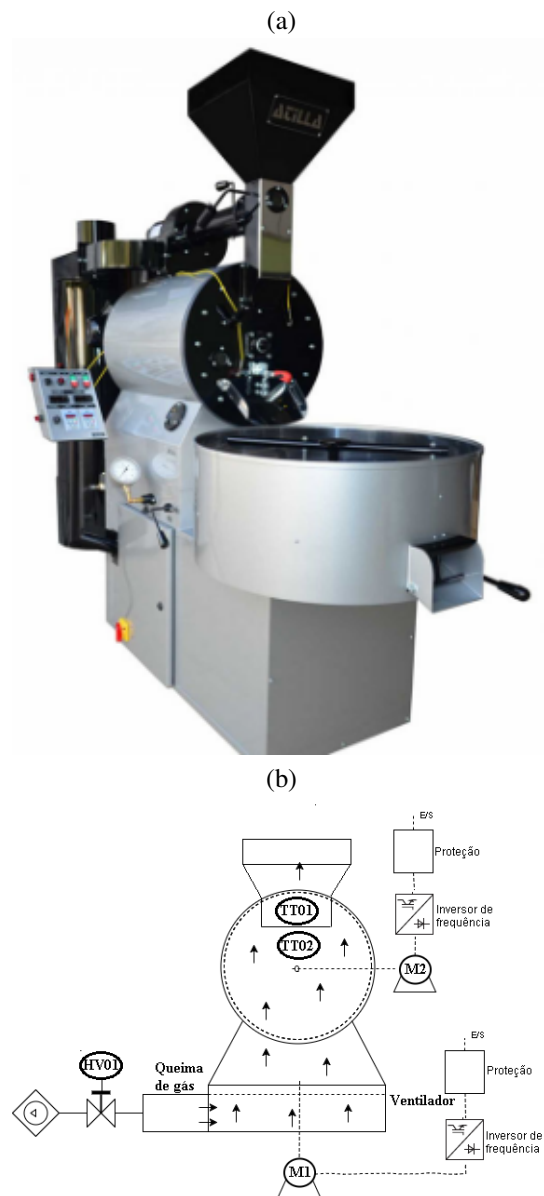


Fig. 1. Torrador utilizado: (a) imagem real e (b) diagrama de instrumentação.

varia de acordo com o modelo do torrador empregado e diferentes torradores proporcionam diferentes características das fotos capturadas, pois os grãos se encontram em movimentos diversos. Além disso, os possíveis sistemas de visão que podem ser empregados variam quanto ao tipo de câmera, representação dos dados capturados, tipo de algoritmo e tipo de iluminação [7]. Nesse contexto, foi utilizado no projeto um sistema de baixo custo capaz de capturar os grãos em movimento, em torradores de tambor rotativo, de forma mais automática possível, usando um programa desenvolvido em LabVIEW.

O sistema é composto por uma câmera (*Webcam 1080P* modelo WB383 da C3Tech) e uma estrutura projetada neste trabalho que possui iluminação própria. O iluminante da estrutura é composto por 12 LEDs fixados em um anel (Figura

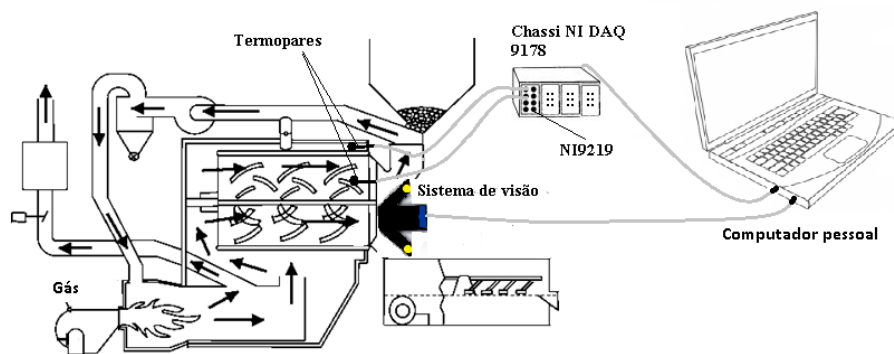


Fig. 2. Esquema do sistema proposto para monitoramento de atributos do café.

3 (a)), pois de acordo com [11], esse tipo de iluminação é adequada para fotografar objetos com superfície plana. A estrutura foi confeccionada em uma impressora 3D (Figura 3 (b)) de forma a obter uma iluminação conhecida como frontal difusa, que consiste na utilização de iluminação disposta a 45° do plano do objeto, com o intuito de reduzir sombras ou reflexos e realçar o objeto em relação ao fundo [11]. Uma imagem do protótipo instalado no torrador é apresentada na figura 4. O protótipo é posicionado sobre um vidro transparente, que se encontra na parte frontal do torrador de tambor rotativo e o reflexo dos LEDs sobre o vidro foi reduzido também por meio de uma proteção de superfície polarizada colocada na lente da câmera.

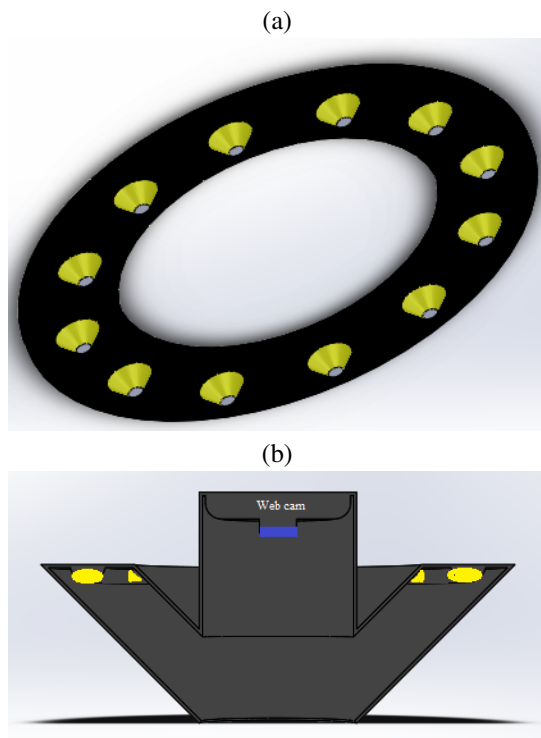


Fig. 3. Protótipo do sistema de captação de imagens: (a) iluminante composto por 12 LEDs e (b) estrutura completa com local de fixação da webcam.

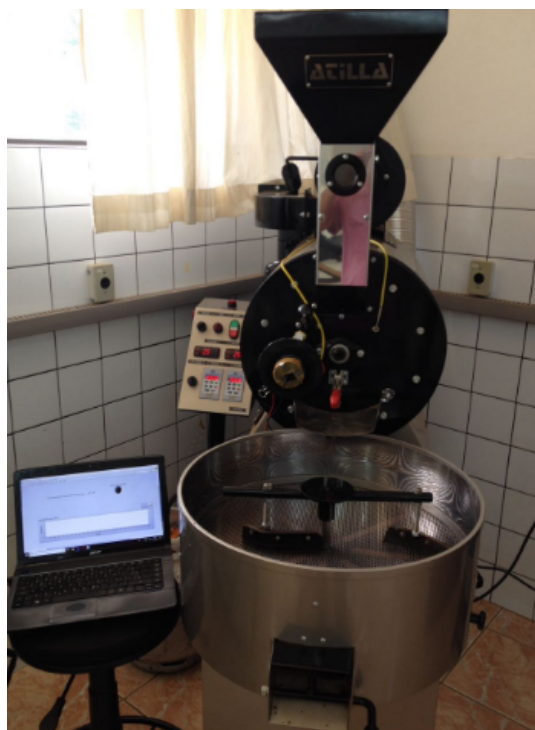


Fig. 4. Sistema de visão computacional instalado no torrador.

A câmera fornece imagens para o computador com uma configuração de até 24 bits e 640 x 480 pixels de resolução. O computador, por meio do programa desenvolvido em LabVIEW, digitaliza e decodifica o sinal de vídeo proveniente da câmera nas coordenadas de cores vermelho, verde e azul (RGB).

Para adquirir e processar as imagens, foi utilizado o assistente *IMAQVisionTH* do Labview [7]. Tais imagens foram convertidas para escala de cinza e um extrator foi utilizado para selecionar os pixels de interesse sendo a média dos mesmos empregada para caracterizar a cor dos grãos. Por fim, um conversor foi implementado para converter esse valor médio em escala Agron. Mais detalhes da etapa de processamento de imagens do sistema de visão computacional serão fornecidos

a seguir.

Processamento de Imagens: A aquisição e análise das imagens foram realizadas por um *toolbox* específico desenvolvido em LabVIEW, o IMAQ Vision, programado em linguagem de programação G em uma interface de usuário gráfico (GUI) [7]. Cabe salientar que o *IMAQVisionTH* é um assistente do LabVIEW que possui blocos de funções específicas para adquirir e processar imagens em tempo real [7]. O aplicativo pode ser dividido em 3 etapas consecutivas, como mostrado na Figura 5.



Fig. 5. Fluxograma do software

Aquisição e Pré-processamento: Na etapa de aquisição, primeiro identifica-se a interface eletrônica por onde a imagem chegará ao computador. Como a câmera está conectada na porta USB do computador, este é o protocolo utilizado. Feita a escolha de interface, o programa ativa a interface gráfica, preparando-a para fazer a aquisição das imagens. Este procedimento recebe o nome de abertura de uma seção de trabalho. Neste momento, o programa identifica os parâmetros de aquisição que serão usados (resolução de 24 bits, tamanho das imagens de 640 x 480 e formato RGB).

Em seguida, o laço de repetição mostrado na Figura 6 sincroniza a captura de imagem em uma frequência de 2 Hz (período de amostragem de 500 ms), até que um comando de interrupção seja satisfeito.

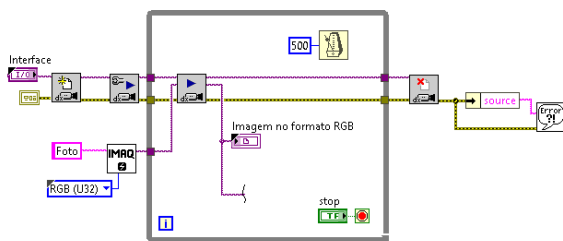


Fig. 6. Laço de aquisição de imagens.

A partir da aquisição, ocorre um pré-processamento (Figura 7) que converte as imagens em formato RGB para o formato tons de cinza. O objetivo dessa conversão é representar o escurecimento dos grãos, utilizando a intensidade fornecida pela escala de cinza [13].

A implementação feita fornece informações para uma interface homem-máquina desenvolvida, mostrada na Figura 8.

Segmentação: A segmentação tem como finalidade selecionar e isolar regiões das imagens que possuem objetos de interesse [12]. No caso específico do algoritmo utilizado, busca-se isolar uma região retangular pré-determinada que contém apenas grãos, das demais regiões. Para tal, foi utilizado

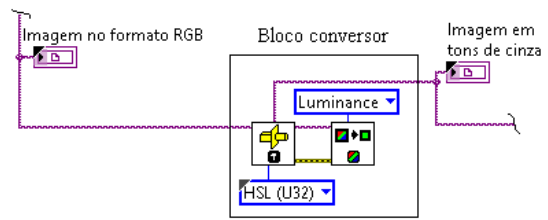


Fig. 7. Conversão para escala de cinza.

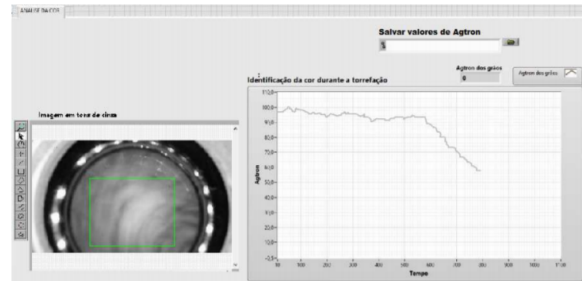


Fig. 8. Interface Gráfica

um bloco de função ROI (*Region of Interest*), Figura 9, que traça um contorno retangular pré-definido sobre a imagem de entrada, para obter à imagem retangular como saída. Buscou-se escolher uma parte da imagem que não possuísse reflexos ou grãos. Por facilidade de implementação, optou-se por uma janela retangular.

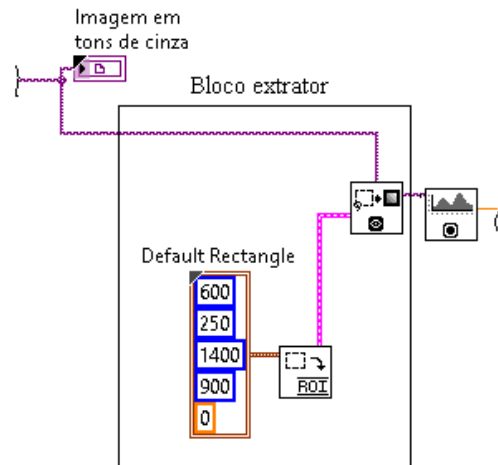


Fig. 9. Código que implementa a segmentação da imagem.

Processamento: A etapa de processamento consiste em extrair características dos pixels e classificar, ou converter, de forma a obter informações desejadas [11]. Em pesquisas de café, a cor é frequentemente representada usando a unidade AGTRON, que é uma norma da Associação Americana de Cafés Especiais (SCAA) que determina a cor dos grãos usando o equipamento AGTRON M-Basic II [14]. Portanto, para apresentar as cores da imagem segmentada foi utilizada a

representação Agtron, que descreve a luminosidade nos grãos, que varia de 0 a 100 (preto a branco). Como as imagens segmentadas estão em tonalidades de cinza, as seguintes etapas foram executadas para obter o Agtron:

- 1) obtenção da média dos valores dos pixels presentes na imagem segmentada;
- 2) aplicação de um filtro média móvel para melhorar a relação sinal-ruído dos valores de médias medidos, utilizando os três últimos valores (figura 10);
- 3) conversão do valor filtrado em escala de cinza para Agtron (figura 11).

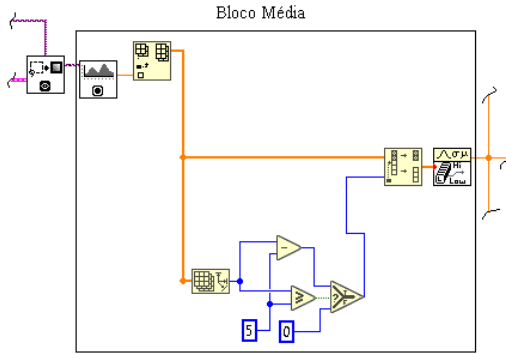


Fig. 10. Código para aplicação de filtro média móvel.

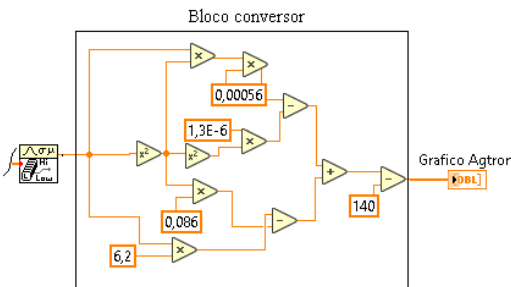


Fig. 11. Código para conversão da escala de cinza para Agtron.

A conversão dos valores de escala de cinza para Agtron exigiu uma análise *off-line* desenvolvida no *software* Matlab (R2016a). Para obtenção de um modelo para esta conversão, foram fotografadas 21 amostras de grãos com diferentes colorações, durante a torrefação, pelo sistema de visão projetado passando as mesmas pelas etapas de pré-processamento, segmentação e filtragem, conforme descrito anteriormente. Além disso, as amostras foram medidas por um equipamento AGTRON M-Basic II, em laboratório. A partir dos valores de escala de cinza obtidos pela imagem em análise e os de Agtron medidos, foi obtido um modelo de conversão polinomial de ordem 4 por meio da função *polyfit* do Matlab, que utiliza a técnica Mínimos Quadrados Parcial (do inglês PLS). Este método utiliza regressão linear e tem como objetivo encontrar uma relação entre a matriz x contendo os valores de escala de cinza e o vetor que armazena os respectivos valores de Agtron

medidos y . O resultado é semelhante à equação de primeiro grau:

$$y = x.b + e \quad (1)$$

onde b é o vetor de regressão e e o vetor que representa os erros do modelo. No modelo PLS, a matriz x é decomposta em matrizes t e w (Pesos), conforme observado em:

$$x.w = t \quad (2)$$

onde $w = (w_1, w_2, \dots, w_k)$ é escolhido de maneira que $t = (t_1, t_2, \dots, t_k)$ apresente covariância máxima com y (k é o número de variáveis latentes).

C. Sistema de aquisição de temperatura

Para adquirir as temperaturas dos grãos e do torrador, dois termopares Hanna Instruments 768P tipo K, que estão posicionados no torrador, conforme figura 2, foram usados. Estes termopares são capazes de suportar até 450 °C (HI 768P) e possuem uma precisão de 0,25 °C.

Para condicionar e converter as medidas feitas pelos termopares, foram utilizadas as entradas analógicas universais de 24 bits do módulo NI 9219, conectado ao Chassi NI CompactDAQ USB de 8 slots, o NI cDAQ-9178. Por meio de uma plataforma em LabVIEW os dados são transferidos e armazenados em um computador, onde é feito o monitoramento das variáveis.

Para adquirir os dados de temperatura foi criado um programa em Labview, conforme apresentado na figura 12, com o bloco *DAQ Assistant*, para receber os sinais que chegam no chassi, inserido dentro de um bloco *While* que controla a frequência de aquisição em 3 Hz, valor máximo permitido pelo módulo.

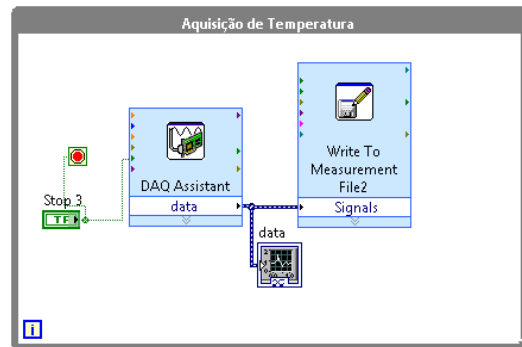


Fig. 12. Código para aquisição dos sinais de temperatura.

III. RESULTADOS

Uma primeira avaliação do SVC criado pode ser feita por inspeção visual das imagens segmentadas adquiridas pelo sistema. Constatou-se que as imagens apresentaram algumas falhas, como ilustrado na figura 13. As falhas mais perceptíveis acontecem devido a presença de regiões escuras em volta dos grãos, conhecidas como falsos contornos, e borrões nas imagens provocadas pelo movimento dos grãos. Essas falhas

se devem principalmente às características do dispositivo de captura (câmera) e ao tipo e geometria de iluminação, que apesar de ter sido projetado para tal, não conseguiu eliminar todos os sombreamento dos grãos capturados pela câmera.

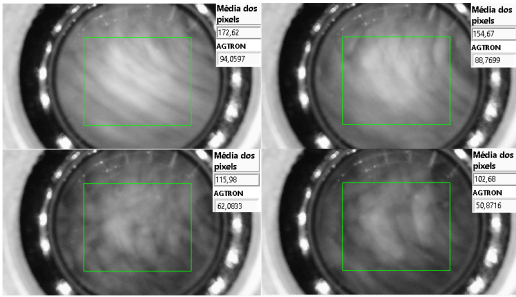


Fig. 13. Detalhe de algumas imagens e suas respectivas segmentações.

Apesar da existência dessas falhas, de modo geral, o sinal obtido pelo algoritmo após todo o processamento implementado obteve uma dinâmica de grau de torra em relação ao tempo condizente com o que é realmente esperado, corroborando o trabalho apresentado em [9], no qual foi implementado um sistema de visão para monitorar a cor em escala de cinza dos grãos durante torrefações em torradores estáticos. O resultado obtido pelo sistema proposto durante uma torra experimental é apresentado na figura 14. É importante observar o efeito do uso da etapa de filtragem dos dados, que cumpriu seu objetivo ao melhorar a relação sinal-ruído.

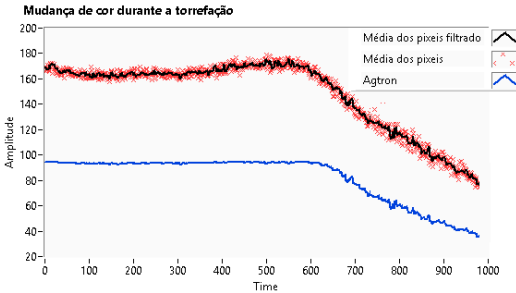


Fig. 14. Mudança de cor no tempo, durante um processo de torrefação.

Para construção do gráfico tonalidade de torra em tempo real apresentado pelo sistema proposto, é necessária a conversão dos valores de tons de cinza para Agtron. O modelo identificado para conversão pode ser descrito pela seguinte equação:

$$Agtron(x) = -1,3 \cdot 10^{-6} x^4 + 5,6 \cdot 10^{-4} x^3 - 8,6 \cdot 10^{-2} x^2 + 6,7x - 1,4 \cdot 10^2; \quad (3)$$

em que x é o valor em escala de cinza. O resultado do modelo de conversão é apresentado na figura 15, onde pode ser constatado que o mesmo obteve uma boa representação os valores, principalmente na faixa de maior interesse, i.e. valores de Agtron inferiores a 100.

Por fim, a respeito da aquisição dos sinais de temperatura, a figura 16 mostra o gráfico desses sinais durante um processo de torrefação dos grãos no torrador. Pode-se constatar

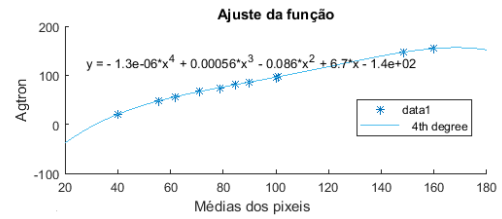


Fig. 15. Modelo polinomial de conversão de escalas de cor.

que os sinais possuem boa relação sinal-ruído, sendo muito importantes para auxílio ao operador durante o processo.

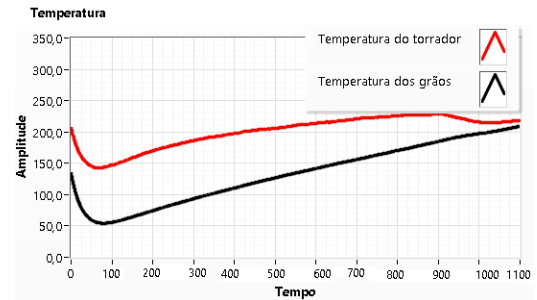


Fig. 16. Gráficos de temperatura do ar e dos grãos durante um processo de torrefação.

IV. CONCLUSÕES

A implementação de um sistema de automação para o torrador de cafés proposto neste trabalho mostra-se bastante atraente pelo fato de poder monitorar variáveis importantes para o processo. O sistema de visão computacional, apesar de não possuir imagens dos grãos de forma nítida, cumpriu seu papel de estimar o valor de Agtron em tempo real com uma boa relação sinal-ruído, parte devido ao uso de filtros tanto na lente quanto no computador e uma escolha adequada do iluminante.

Além da cor, as temperaturas também foram adquiridas e monitoradas. Embora os resultados numéricos são difíceis de explorar, é esperado que a abordagem aqui desenvolvida seja útil para monitorar a cor e a temperatura de grãos de diferentes formas, tamanhos e intensidade de cor inicial, bem como em diversos torradores de tambor rotativo.

Como projeto futuro, espera-se melhorar a nitidez das fotos com câmeras de melhor desempenho e automatizar outras etapas do torrador como a velocidade do tambor e controle preciso de temperatura.

REFERENCES

- [1] Borém, F. Pós-colheita do café. *Lavras: UFPA*. 1 pp. 631 (2008)
- [2] de Oliveira, E. M., Leme, D. S., Barbosa, B. H. G., Rodarte, M. P. & Pereira, R. G. F. A. A computer vision system for coffee beans classification based on computational intelligence techniques. *Journal of Food Engineering*, v. 171, p. 22-27 (2016).
- [3] Eggers, R. & Pietsch, A. Technology I: roasting. *Coffee: Recent Developments*. pp. 90-107 (2001)

- [4] Bekedam, E., Loots, M., Schols, H., Van Boekel, M. & Smit, G. Roasting effects on formation mechanisms of coffee brew melanoidins. *Journal Of Agricultural And Food Chemistry*. **56**, 7138-7145 (2008)
- [5] Pramudita, D., Araki, T., Sagara, Y. & Tambunan, A. Roasting and Colouring Curves for Coffee Beans with Broad Time-Temperature Variations. *Food And Bioprocess Technology*. **10**, 1509-1520 (2017)
- [6] Leme, D. S., Silva, S. A., Barbosa, B. H. G., Borem, F. M. & Pereira, R. G. F. A. Recognition of coffee roasting degree using a computer vision system. *Computers and Electronics in Agriculture*, **156**, 312-317 (2019)
- [7] Ding, Z., Zhang, R. & Kan, Z. Quality and safety inspection of food and agricultural products by LabVIEW IMAQ Vision. *Food Analytical Methods*. **8**, 290-301 (2015)
- [8] Mahendran, R., Jayashree, G. & Alagusundaram, K. Application of computer vision technique on sorting and grading of fruits and vegetables. *J Food Process Technol S1-001. Doi*. **10** pp. 2157-7110 (2012)
- [9] Hernández, J., Heyd, B. & Trystram, G. Prediction of brightness and surface area kinetics during coffee roasting. *Journal Of Food Engineering*. **89**, 156-163 (2008)
- [10] Marengoni, M. & Stringhini, S. Tutorial: Introdução à visão computacional usando opencv. *Revista De Informática Teórica E Aplicada*. **16**, 125-160 (2009)
- [11] Vithu, P. & Moses, J. Machine vision system for food grain quality evaluation: A review. *Trends In Food Science Technology*. **56** pp. 13-20 (2016)
- [12] Gonzalez, R. & Woods, R. Digital image processing. (Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall,2012)
- [13] Gunasekaran, S. Computer vision technology for food quality assurance. *Trends In Food Science Technology*. **7**, 245-256 (1996)
- [14] Rabelo, M., Ribeiro, D., Silva, A., Alves, A., Lima, R., Pinheiro, A., Borém, F. & Pereira, R. Relação entre os sistemas colorimétricos para café torrado e moído com diferentes tonalidades. (Embrapa Café,2015)