



DESENVOLVIMENTO DE UM TORRADOR DE CAFÉ AUTOMATIZADO COM CLASSIFICAÇÃO DE TORRA VIA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.

JOÃO PEDRO COBRA

CASICI - jpcobrac@gmail.com Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais- CEFET - MG - Varginha

JULIO IGNACIO MIRANDA

NETO - jjulio2468@gmail.com Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais- CEFET - MG - Varginha

EDUARDO GOMES

CARVALHO - eduardogomes@cefetmg.br Centro Federal de
Educação Tecnológica de Minas Gerais- CEFET - MG - Varginha

ÁREA: 05. ENGENHARIA DE PRODUTO

SUBÁREA: 5.3 - PLANEJAMENTO E PROJETO DE PRODUTO

RESUMO: ESTE TRABALHO APRESENTA O DESENVOLVIMENTO DE UM PRODUTO INOVADOR PARA O PROCESSO DE TORREFAÇÃO DE CAFÉ: UM SISTEMA AUTOMATIZADO DE MONITORAMENTO E CLASSIFICAÇÃO DE GRÃOS BASEADO NA ESCALA AGTRON. O PROTÓTIPO UTILIZA HARDWARE EMBARCADO DE BAIXO CUSTO E INTEGRA SENSORES ÓPTICOS, VISÃO COMPUTACIONAL E ALGORITMOS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA ANÁLISE EM TEMPO REAL DA COR DOS GRÃOS. TÉCNICAS DE TORREFAÇÃO AUTOMATIZADAS SÃO APLICADAS PARA OTIMIZAR DINAMICAMENTE PARÂMETROS DE TORRA, COMO TEMPO E TEMPERATURA, VISANDO À PADRONIZAÇÃO DA QUALIDADE SENSORIAL E À EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DO PROCESSO. A PROPOSTA PROMOVE A AUTOMAÇÃO INTELIGENTE EM PEQUENAS PRODUÇÕES, OFERECENDO UM PRODUTO ACESSÍVEL, PRECISO E REPLICÁVEL. AO INTEGRAR INOVAÇÃO EM PRODUTO COM MELHORIAS NOS PROCESSOS, O SISTEMA CONTRIBUI PARA O AUMENTO DA EFICIÊNCIA OPERACIONAL E DA COMPETITIVIDADE NA CADEIA PRODUTIVA DO CAFÉ.

PALAVRAS-CHAVES: ENGENHARIA DO PRODUTO; AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS; CAFÉ; VISÃO COMPUTACIONAL; INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL.

1. INTRODUÇÃO

A torra do café constitui uma etapa fundamental no desenvolvimento de seus sabores e aromas, sendo determinante para a qualidade do produto que chega ao consumidor final. Trata-se de um processo que, majoritariamente, ainda é conduzido de forma manual, exigindo elevado grau de habilidade do operador para o monitoramento contínuo e ajuste preciso de variáveis como tempo e temperatura, a fim de se alcançar o ponto ideal de torra. Qualquer desajuste pode resultar em uma torra inconsistente ou em um perfil sensorial indesejado, comprometendo a qualidade global do produto final. Uma torra subdesenvolvida pode ocasionar um café com acidez excessivamente pronunciada, o que pode ser desagradável ao paladar. A acidez em excesso pode conferir notas cítricas, herbais ou até mesmo amargas, além de tornar a bebida mais difícil de ser digerida por algumas pessoas. Por outro lado, uma torra excessiva tende a suprimir as notas sensoriais originais dos grãos, resultando em sabores queimados ou amargor acentuado, decorrentes do desenvolvimento excessivo da cafeína e da caramelização dos açúcares.

Entre os principais tipos de torradores utilizados na indústria destacam-se os torradores de tambor, os torradores de ar ou de leito fluidizado, os torradores tangenciais e os torradores centrífugos. O torrador de leito fluidizado foi concebido como alternativa para mitigar problemas recorrentes em torradores de tambor, como o aquecimento desigual. Nesse sistema, a torra ocorre por meio da circulação de ar quente ao redor dos grãos, proporcionando aquecimento uniforme e contribuindo para a obtenção de um produto mais consistente. A torra por ar permite um processo mais ágil e eficiente; contudo, muitos torradores de leito fluidizado disponíveis no mercado carecem de recursos que possibilitem a inspeção visual dos grãos durante a torra. Essas máquinas operam exclusivamente por convecção: o ar previamente aquecido é forçado através de uma coluna de grãos, limitando o controle por parte do usuário e evidenciando a necessidade de um sistema de monitoramento preciso.

Nesse cenário, a introdução de um sistema automatizado de monitoramento e controle mostra-se essencial para assegurar a padronização e a alta qualidade do produto, além de compensar a ausência de inspeção direta. A implementação de tecnologias digitais avançadas, conforme proposta neste projeto, responde à crescente demanda do setor cafeeiro por qualidade e inovação — contexto em que a automação e o uso de dados assumem papel central na melhoria dos processos e na competitividade do mercado.

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver e validar um sistema automatizado para o processo de torra de café, utilizando a escala Agtron para análise precisa da coloração dos grãos durante a torra, com foco na promoção de uma automação acessível e eficiente no setor.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O Sistema Agroindustrial do Café apresenta oportunidades únicas para o desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente se comparado a outros sistemas agroindustriais. Tal situação ocorre em razão da própria hegemonia do país em termos de produção e exportações dessa *commodity*. O Brasil é o maior produtor de café do mundo, seguido de países como Vietnã, Colômbia, Indonésia, Etiópia e Honduras. Tais países são reconhecidos como produtores agrícolas e países de baixa e média complexidade econômica, ou seja, não são conhecidos como grandes desenvolvedores de tecnologias. Se comparado com outras commodities agrícolas como soja ou milho, tem-se entre os maiores produtores países

como Estados Unidos, China e União Europeia, ou seja, países com maiores índices de complexidade econômica. Portanto, são poucas as tecnologias disponíveis para importação. Assim, cabe ao país assumir a postura de líder e desenvolver as tecnologias voltadas ao Sistema Agroindustrial do Café.

A base da economia do Sul de Minas é o café. Cerca de 30% do café produzido no Brasil sai das lavouras do Sul e Sudoeste de Minas. Contudo, é natural que os principais segmentos do sistema agroindustrial do café estejam presentes na região, o que demonstra a importância do café para além do setor primário. Indústrias de máquinas e implementos, produtores de mudas, indústria de defensivos e fertilizantes, cooperativas, maquinistas, empresas torrefadoras, empresas de solúvel, exportadores, empacotadores, entre outros, são exemplos de atores do sistema agroindustrial com presença no Sul de Minas.

A torra é a fase em que compostos voláteis são liberados e os açúcares são caramelizados, formando o perfil sensorial do café. Níveis diferentes de torra — clara, média, escura — influenciam o amargor, acidez, corpo e doçura da bebida [Clarke e Macrae 2012]. Tradicionalmente, esse processo é guiado pela experiência sensorial do mestre de torra, o que o torna subjetivo e difícil de replicar, especialmente em contextos de pequena escala [Illy e Viani 2005]. Estudos mostram que mesmo pequenas variações de tempo ou temperatura impactam significativamente o perfil final do café [Wintgens 2009], o que reforça a necessidade de maior controle e padronização.

O processo de torrefação do café é uma das partes mais importantes da formação do aroma do café, contudo diversos autores [Bolka e Emire 2020; Leme et al. 2019; Ratanasanya et al. 2022; Reis et al. 2020] são praticamente equânimes sobre a torrefação como uma das etapas mais complexas e importantes da cadeia produtiva do café. Entre os principais tipos de torradores de café estão as torradeiras de tambor, assadores de ar ou leito fluidizado, torradeiras tangenciais e torradeiras centrífugas. O torrador de leito fluidizado foi inventado na década de 1970, visando resolver os problemas causados pelos torradores de tambor. A torrefação à ar obtém um resultado mais consistente, ao distribuir o calor ao redor dos grãos uniformemente. Contudo, a maioria dos torradores de leito fluidizado não tem a opção de inspecionar os grãos durante a torra, pois dependem exclusivamente da convecção para torrar os grãos: o ar é pré-aquecido e subsequentemente empurrado através de uma coluna de grãos de café.

Diante dessas limitações operacionais, torna-se evidente a necessidade de soluções tecnológicas que permitam maior controle e precisão ao processo, especialmente no que tange à avaliação do ponto ideal de torra. Portanto, um sistema automatizado, baseado em detecção de objetos pode ser de grande valia. Esse sistema utilizará como instrumento para avaliar a cor durante a torra o Agtron. A IA, especialmente via redes neurais convolucionais (CNNs), permite que computadores "vejam" e reconheçam padrões em imagens. Essa capacidade tem sido amplamente aplicada em áreas como reconhecimento de objetos, diagnóstico médico e inspeção de qualidade [LeCun et al. 2015; Zhou et al. 2021]. Ao treinar modelos com imagens de grãos torrados em diferentes estágios, é possível criar sistemas capazes de classificar a torra com precisão comparável (ou superior) à de especialistas humanos [Chen et al. 2020]. Essa abordagem já tem demonstrado bons resultados em ambientes industriais e laboratoriais.

A Figura 1 ilustra curvas teóricas de torra, baseadas em dados de [Wintgens 2009] e [Illy e Viani 2005], enquanto a Figura 2 demonstra o modelo de IA em ação, identificando diferentes níveis de torra. Sobre a figura 1, observa-se que a torra clara atinge cerca de 180 °C em aproximadamente 8 minutos, a torra média chega a 200 °C em 12 minutos e a torra escura atinge 220 °C em 15 minutos. As curvas revelam o aquecimento progressivo dos grãos durante o processo, com diferenças no tempo e na temperatura final conforme o tipo de torra desejado. As linhas tracejadas indicam dois momentos críticos: o First Crack (primeira expansão dos grãos), próximo aos 9 minutos, relacionado à torra clara, e o Second Crack (segunda expansão), por volta dos 12 minutos, associado à torra escura. Essas transições físicas são marcos importantes no desenvolvimento dos sabores e aromas do café. Essas tecnologias representam

um avanço crucial para democratizar o acesso à torrefação de precisão, especialmente para pequenos produtores.

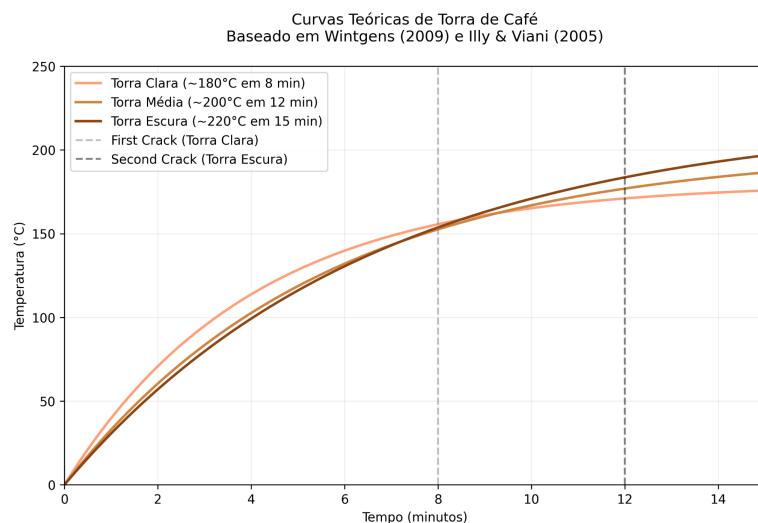


Figura 1 – Curvas teóricas de torra de café.

Fonte: Dos autores baseado nos dados de [Wintgens 2009] e [Illy e Viani 2005]

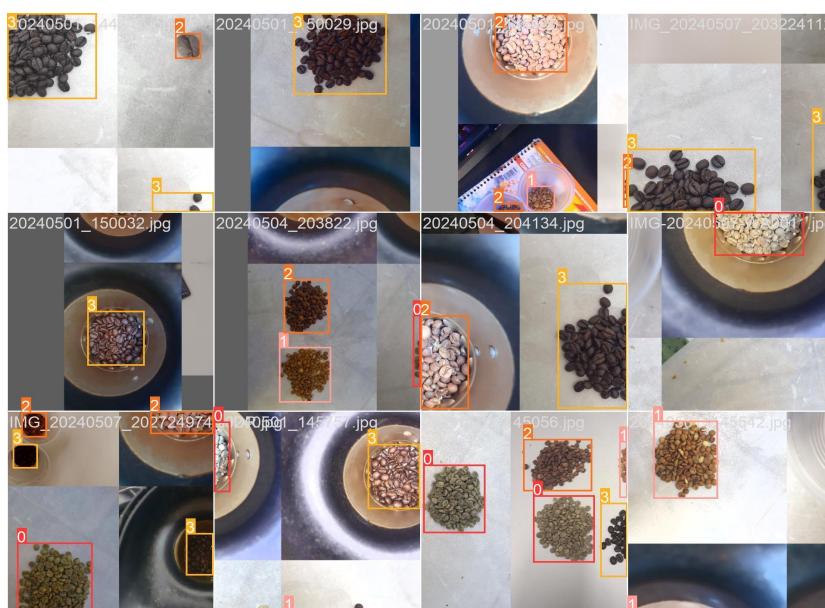


Figura 2 – Modelo identificando as torras

Fonte: Dos autores

3. METODOLOGIA

O método de pesquisa adotado é o quasi-experimento. Segundo [Bryman 1989], o quasi-experimento constitui uma categoria ampla de delineamentos de pesquisa que compartilham diversas características do experimento verdadeiro, porém sem que o pesquisador exerça controle total sobre todas as variáveis independentes, o que impossibilita o atendimento rigoroso dos critérios de um estudo experimental completo. Nesse contexto, o quasi-experimento permite a aplicação de testes controlados em condições próximas àquelas do mundo real, mesmo sem o domínio absoluto das variáveis, configurando-se como uma abordagem adequada aos objetivos deste projeto.

A metodologia será estruturada em três etapas principais:

- **Aprimoramento do Algoritmo de Detecção de Objetos:** Nesta fase, será realizado o refinamento de um algoritmo de visão computacional para o reconhecimento de padrões de torrefação com base na escala Agtron. A ferramenta escolhida é o *You Only Look Once* (YOLO), que, além de ser uma solução de código aberto, apresenta precisão comparável ou superior a outros métodos de detecção de objetos, com velocidade significativamente maior. O algoritmo será treinado para reconhecer diferentes padrões de torra a partir de uma amostra abrangente que represente a escala Agtron, visando assegurar a acurácia na identificação das colorações dos grãos. O indicador de sucesso para esta etapa será o reconhecimento do grau de torra em pelo menos 30 conjuntos distintos de grãos.
- **Desenvolvimento do Protótipo com Raspberry Pi:** Na segunda etapa, será desenvolvido um protótipo utilizando uma placa Raspberry Pi para a captação e o processamento de imagens dos grãos durante o processo de torra, aplicando o algoritmo de visão computacional para a classificação automática dos grãos conforme a escala Agtron. Este protótipo permitirá o reconhecimento em tempo real e será validado com o intuito de assegurar a confiabilidade dos resultados. Durante esta fase, será empregado o software Artisan, uma ferramenta de código aberto utilizada por mestres de torra para registrar, analisar e controlar perfis de torrefação, bem como para automatizar a geração de métricas que subsidiam decisões com impacto no sabor final do café.
- **Protótipo do Torrador Doméstico:** Por fim, a terceira etapa consistirá no desenvolvimento de um protótipo inicial de um torrador doméstico de café. Esse equipamento será modelado por meio de impressão 3D, possibilitando ajustes no design e integração com o sistema automatizado de monitoramento do nível de torra. Ao término desta fase, espera-se a impressão de ao menos um modelo inicial de torrador de café em escala reduzida.

Essas etapas permitirão avaliar a viabilidade da automação do processo de torrefação com foco na acessibilidade, tendo como meta o desenvolvimento de uma solução aplicável a pequenos empreendedores e produtores do setor cafeeiro.

4. RESULTADOS

O protótipo está sendo desenvolvido com base em um microcontrolador Raspberry Pi 3, integrando diversos componentes essenciais para o controle e monitoramento do processo de torra de café. Entre os principais dispositivos, estão uma câmera acoplada para captura contínua de imagens dos grãos, sensores de temperatura do tipo termopar e atuadores (dimmers) responsáveis pelo controle do aquecimento, resfriamento e exaustão. A parametrização dos perfis de torra é realizada por meio de uma interface digital.

O sistema de classificação automática da torra utiliza uma abordagem híbrida, combinando a detecção de objetos por meio do modelo YOLO e a classificação por redes neurais convolucionais (CNNs), implementadas no TensorFlow/Keras. A arquitetura do sistema foi otimizada para funcionar em tempo real no Raspberry Pi, conciliando desempenho computacional com precisão. O modelo de classificação é composto por uma camada de entrada que recebe imagens RGB redimensionadas para 224×224 pixels, seguida de blocos convolucionais com ativação ReLU e normalização por batch. Em seguida, é aplicada uma camada de redução dimensional (GlobalAveragePooling2D), e o modelo prossegue com duas camadas densas (com 256 e 128 unidades, respectivamente) e dropout de 20% para evitar

overfitting. A saída é composta por uma camada softmax com três neurônios, correspondentes às classes: torra clara, média e escura.

O pipeline de processamento é dividido em três etapas principais. A primeira etapa é a detecção em tempo real, realizada com o YOLOv4-tiny, que processa o fluxo de vídeo da câmera a 10 quadros por segundo (FPS), detectando os grãos individuais e aplicando non-maximum suppression (NMS) para eliminar detecções redundantes. A segunda etapa consiste no pré-processamento das regiões de interesse (ROIs), que são recortadas com base nas bounding boxes, redimensionadas para 224×224 pixels e normalizadas (valores de pixel entre 0 e 1). Por fim, a terceira etapa é a classificação, que utiliza um modelo otimizado com TensorFlow Lite, retornando a classe predita, as probabilidades para cada nível de torra e um timestamp para sincronização com os dados dos sensores.

Para o treinamento da CNN, foi utilizada uma base de dados composta por 300 imagens balanceadas (100 por classe), capturadas em condições controladas de iluminação. Técnicas de aumento de dados foram aplicadas, incluindo rotação aleatória ($\pm 20^\circ$), ajuste de brilho e contraste ($\pm 30\%$) e espelhamento horizontal em 50% das imagens. Os parâmetros de treinamento incluíram 50 épocas, com early stopping (paciência de 5 épocas), batch size de 32, otimizador Adam com taxa de aprendizado de 0,0001, e função de perda Categorical Crossentropy.

Os resultados do treinamento do modelo YOLO são apresentados na Figura 3, que mostra a evolução das métricas ao longo das épocas. Observa-se uma tendência de queda nas perdas de bounding box, classificação e distribuição focalizada (DFL), tanto para os dados de treino quanto de validação. As métricas de desempenho, como precisão, recall, mAP50 e mAP50-95, apresentam crescimento progressivo, atingindo valores próximos de 1,0 ao final do treinamento, especialmente após a 35ª época, o que indica forte capacidade de generalização do modelo.

Durante os testes, serão registradas curvas de torra (tempo versus temperatura), e serão realizadas avaliações sensoriais com provadores treinados. A análise dos dados envolverá técnicas de clusterização com K-Means para agrupar perfis de torra semelhantes, além da aplicação de modelos de regressão (como Random Forest e SVM) para prever a qualidade com base nas variáveis de processo. Também será desenvolvida uma interface visual para exibição em tempo real dos parâmetros monitorados, classificações e alertas em caso de desvios. Essa abordagem integrada permite não apenas a automação do processo de torra, mas também sua otimização contínua, garantindo maior precisão, padronização e qualidade nos resultados.

A Figura 3 apresenta as curvas de desempenho do modelo YOLO durante o treinamento, incluindo perdas, métricas de precisão, recall e mAP. A imagem evidencia a eficácia do processo de aprendizado e a capacidade do modelo de se adaptar ao conjunto de dados de maneira robusta.

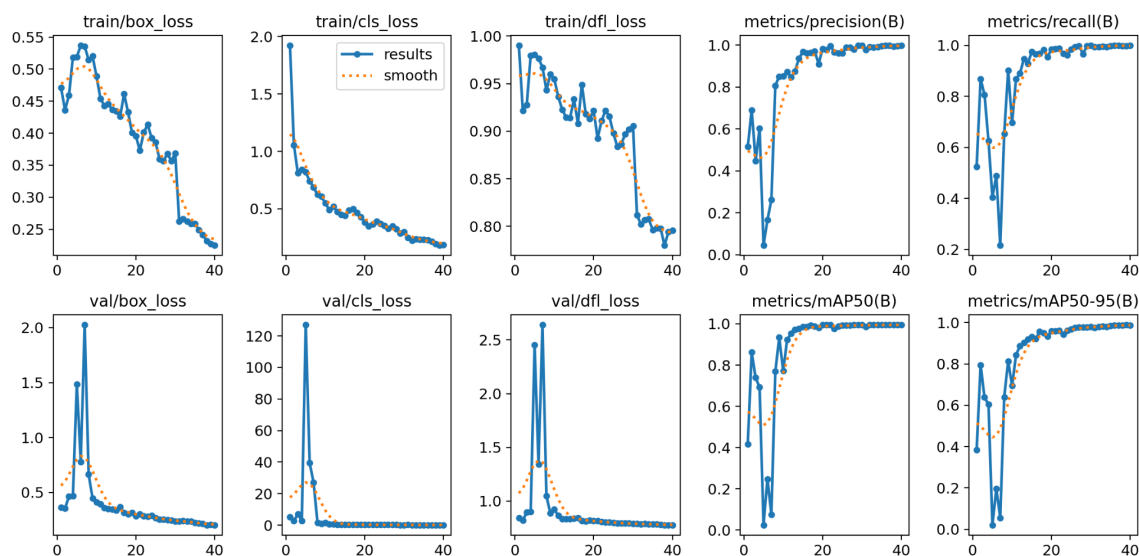


Figura 3 - Gráficos de resultados
Fonte: Do autor

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O projeto encontra-se em andamento, já tendo alcançado avanços significativos. O algoritmo de detecção de objetos foi treinado com sucesso para diferenciar entre os níveis de torra clara, média e escura. Essa conquista representa um marco fundamental no desenvolvimento de um sistema automatizado para a torrefação de café, uma vez que o algoritmo é agora capaz de classificar o grau de torra dos grãos segundo essas três categorias principais.

Adicionalmente, o protótipo baseado na placa Raspberry Pi foi configurado e encontra-se plenamente funcional com a instalação do software Artisan. O Artisan é uma ferramenta de código aberto voltada para a torrefação de café, que permite registrar, analisar e controlar perfis de torra, fornecendo dados em tempo real e métricas automatizadas que auxiliam na tomada de decisões com impacto direto sobre o sabor final da bebida. Com o Artisan instalado, o sistema está apto a capturar e processar imagens dos grãos durante a torra, contribuindo para o monitoramento e a classificação dos grãos em tempo real.

Também foi desenvolvida uma proposta de design para o torrador de café. O protótipo visa reutilizar o motor de uma pipoqueira elétrica, aproveitando equipamentos de baixo custo já disponíveis, com as devidas adaptações para atender às especificidades do processo de torrefação. O processo de modelagem encontra-se em curso, com os esboços iniciais e os planos de construção sendo finalizados.

As próximas etapas do projeto já estão em desenvolvimento. Entre elas, destacam-se a adaptação do sistema à escala Agtron para uma medição mais precisa da coloração dos grãos e os preparativos para a impressão 3D do protótipo do torrador em pequena escala. A equipe trabalha, neste momento, no aprimoramento da integração entre o software e o hardware, visando garantir o funcionamento harmônico e eficiente do sistema.

No entanto, alguns desafios ainda persistem. Uma das dificuldades identificadas está relacionada à coleta da película prateada (silverskin), a fina camada que recobre o grão de café e que tende a se dispersar durante o processo de torra. Além disso, garantir o resfriamento adequado da Raspberry Pi durante a operação constitui outro obstáculo, dado que o

aquecimento do dispositivo pode comprometer seu desempenho. Esses pontos críticos deverão ser enfrentados nas próximas fases do projeto.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

BOLKA, M.; EMIRE, S. Effects of coffee roasting technologies on cup quality and bioactive compounds of specialty coffee beans. *Food Science & Nutrition*, v. 8, n. 11, p. 6120-6130, 2020.

CHEN, C.; HSIEH, C.; LEE, H. Coffee roasting classification using deep learning. *Food Control*, v. 112, p. 107142, 2020.

CLARKE, R. J.; MACRAE, R. *Coffee: volume 1 – chemistry*. Dordrecht: Springer, 2012.

ILLY, A.; VIANI, R. *Espresso coffee: the science of quality*. London: Academic Press, 2005.

LECUN, Y.; BENGIO, Y.; HINTON, G. Deep learning. *Nature*, v. 521, n. 7553, p. 436-444, 2015.

LEMAY, A.; MORENCY, F.; GOSSELIN, B. Predictive quality modeling for food roasting using ML. *Journal of Food Engineering*, v. 243, p. 1-10, 2019.

RATANASANYA, S. et al. Model-based optimization of coffee roasting process: model development, prediction, optimization and application to upgrading of Robusta coffee beans. *Journal of Food Engineering*, v. 318, p. 110888, 2022.

WINTGENS, J. N. *Coffee: growing, processing, sustainable production*. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

ZHOU, Y. et al. Vision-based quality inspection in food production: a review. *Trends in Food Science & Technology*, v. 112, p. 40-55, 2021.

.