



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

LUCAS EDUARDO AMORE FENZ

Desenvolvimento de um torrador de café automatizado

Sorocaba

2024

LUCAS EDUARDO AMORE FENZ

Desenvolvimento de um torrador de café automatizado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Verri Liberado

Sorocaba

2024

F343d

Fenz, Lucas Eduardo Amore

Desenvolvimento de um torrador de café automatizado / Lucas Eduardo Amore Fenz. -- Sorocaba, 2024

60 p.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Controle e Automação) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba

Orientador: Eduardo Verri Liberado

1. Automação. 2. Café Processamento. 3. Controladores PID. 4. Microcontroladores. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Ciência e Tecnologia, Sorocaba. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Instituto de Ciência e Tecnologia
Câmpus de Sorocaba

Lucas Eduardo Amore Fenz

Desenvolvimento de um torrador de café automatizado

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Universidade Estadual Paulista (UNESP), como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel(a) em Engenharia de Controle e Automação.

Data da defesa: 05/08/2024

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Eduardo Verri Liberado
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

Prof. Dr. Galdenoro Botura Junior
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

M.Sc. Paulo Fernando Silva
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de Sorocaba

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de expressar minha mais profunda gratidão aos meus pais, Eduardo e Angela e à minha irmã, Maria Luiza, que me deram apoio tanto emocional como financeiro, essenciais para que eu pudesse concluir minha jornada.

Aos meus amigos Gabriel, Talles, Pedro Masseti, Pedro Zanon e Milene Silva agradeço por sempre estarem ao meu lado, me incentivando e encorajando a seguir em frente, mesmo quando as dificuldades pareciam insuperáveis. Todo o apoio e momentos de descontração foram fundamentais para manter minha perseverança ao longo desta trajetória.

Um agradecimento em especial à minha namorada Vitória, por sempre me incentivar e estar ao meu lado durante os momentos mais difíceis.

Por fim, agradeço ao corpo docente da faculdade, cujos ensinamentos, orientação e dedicação foram cruciais para o meu desenvolvimento acadêmico e pessoal. Vocês não apenas transmitiram conhecimento, mas também inspiraram e desafiaram a buscar sempre o melhor de mim.

RESUMO

O Brasil é reconhecido mundialmente como o maior produtor e exportador de café, desempenhando um papel crucial na economia nacional. O café é uma das principais commodities agrícolas do país, responsável por gerar milhares de empregos e movimentar a economia em diversas regiões. A torra do café é um processo fundamental que influencia diretamente a qualidade final do produto. Uma torra adequada realça os sabores e aromas desejados, garantindo uma experiência sensorial superior para o consumidor. No desenvolvimento do trabalho de conclusão de curso, foi projetado um torrador de amostra de café automatizado, utilizando como base a modificação de uma pipoqueira elétrica. Para o controle da potência AC e a comunicação com o software ARTISAN, amplamente utilizado entre os profissionais de torrefação, foi empregado um microcontrolador em conjunto com semicondutores de potência. A modelagem dos parâmetros do sistema foi realizada utilizando o software MATLAB, permitindo o projeto de controladores P, PI e PID. Os controladores foram avaliados com o auxílio de uma Métrica de Torra (MT) desenvolvida baseada no método IAE e em características químicas do processo de torra. O controlador PID foi o mais bem avaliado, tanto na repetibilidade, ao reproduzir as torras pré-programadas, quanto na robustez ao torrar diferentes tipos de café mantendo os resultados da MT abaixo de 1. O sistema de controle em malha fechada permite a correção da variável da potência entregue ao aquecedor elétrico, resultando em torras consistentes e de qualidade. A integração com o software ARTISAN facilita o desenvolvimento e a análise das curvas de torra, contribuindo para a padronização e repetibilidade do processo, aspectos essenciais na produção de café especial. Além disso, o uso do ARTISAN também facilita a operação do sistema desenvolvido, uma vez que é um software amplamente conhecido e utilizado por profissionais da área.

Palavras-chave: Café Especial; Automação; Controle de potência; Microcontrolador; Torra de café

ABSTRACT

Brazil is globally recognized as the largest producer and exporter of coffee, playing a crucial role in the national economy. Coffee is one of the country's main agricultural commodities, responsible for generating thousands of jobs and driving the economy in various regions. The roasting of coffee is a fundamental process that directly influences the final quality of the product. Proper roasting enhances the desired flavors and aromas, ensuring a superior sensory experience for the consumer. In the development of the final course project, an automated coffee sample roaster was designed, using the modification of an electric popcorn maker as a basis. A microcontroller, in conjunction with power semiconductors, was employed for AC power control and communication with the ARTISAN software, which is widely used among roasting professionals. The system parameters were modeled using MATLAB software, allowing for the design of P, PI, and PID controllers. The controllers were evaluated with the help of a Roasting Metric (RM) developed based on the IAE method and chemical characteristics of the roasting process. The PID controller was the best evaluated, showing excellent results ($RM < 1$) in both repeatability, by reproducing pre-programmed roasts, and robustness, by roasting different types of coffee while keeping RM results below 1. The closed-loop control system allows for the correction of the power variable delivered to the electric heater, enabling adjustments that result in consistent and high-quality roasts. The integration with ARTISAN software facilitates the development and analysis of roasting curves, contributing to the standardization and repeatability of the process, which are essential aspects in the production of specialty coffee. Additionally, the use of ARTISAN also simplifies the operation of the developed system, as it is software that is widely known and used by professionals in the field.

Keywords: Specialty Coffee; Automation; Power Control; Microcontroller; Coffee Roasting

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
1.1. Contexto e justificativa	10
1.2. Objetivos	11
1.2.1. Objetivo Geral	11
1.2.2. Objetivos Específicos	11
1.3. Requisitos do projeto, definição de variáveis dependentes e independentes	11
1.3.1. Requisitos funcionais.....	11
1.3.2. Requisitos técnicos.....	12
1.3.3. Variáveis dependentes e independentes.....	12
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	13
2.1. Café Especial	13
2.1.1. Processo de torra do café especial	14
2.1.2. Tipos de torradores.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
3.1. Otimização do controle automático de um torrador de café (FREITAS, 2023)	20
3.2. Analysis of temperature control effect in fluidized bed coffee roaster	20
4. MATERIAIS E MÉTODOS	22
4.1. Materiais	22
4.1.1. Pipoqueira elétrica.....	22
4.1.2. Módulo Dimmer 16A, 127V.....	23
4.1.3. Termopar Tipo K + amplificador Max 6675	23
4.1.4. Placa de desenvolvimento ESP32-DevKitC V4.....	24
4.1.5. Fonte 24V 10A	24
4.1.6. Software Artisan Scope.....	25
4.2. Desenvolvimento	25
4.2.1. Verificação de capacidade da pipoqueira.....	25
4.2.2. Controle de potência para o aquecedor.....	26
4.2.3. Controle do ângulo de disparo	29
4.2.4. Implementação no microcontrolador.....	30
4.2.5. Configurando a comunicação com o Artisan.....	32
4.2.6. Implementação do Circuito de controle AC na pipoqueira.....	34
4.2.7. Modelagem da Função transferência do torrador	35

4.2.8.	Desenvolvimento da metodologia para calcular a eficiência do controlador	38
4.2.9.	Configuração dos parâmetros de controle no Artisan	40
4.2.10.	Projeto e avaliação dos parâmetros de controle	42
4.2.11.	Projeto de um controlador proporcional (P)	43
4.2.12.	Projeto de um controlador proporcional integrativo (PI)	44
4.2.13.	Projeto de um controlador proporcional integrativo derivativo (PID)	46
4.3.	Compilado de resultados dos testes dos controladores	48
5.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
5.1.	Repetibilidade do torrador	49
5.2.	Robustez do torrador	51
5.3.	Compilado dos resultados	55
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	56
6.1.	Conclusão	56
6.2.	Trabalhos Futuros	57
REFERÊNCIAS	58

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contexto e justificativa

O Brasil é o maior produtor de café do mundo tendo produzido 55.1 milhões de sacas de 60 quilos de produto beneficiado para o ano de 2023, sendo 73,7% correspondente à espécie arábica e o restante à espécie robusta. (CONAB, 2023).

Tradicionalmente, o café é produzido no Brasil desde a época do império. Sua produção tem absorvido grande quantidade de mão-de-obra, sendo a quarta produção agrícola mais importante do país e contribuindo para o crescimento PIB (Produto Interno Bruto) brasileiro. (IBGE, 2022)

Embora o Brasil seja o maior produtor e o segundo maior mercado consumidor depois dos Estados Unidos, a economia cafeeira brasileira ainda não desenvolveu a tecnologia de países exportadores de café industrializado como a Itália e a Alemanha. Para conseguir uma geração de valor agregado na cadeia produtiva do café, é preciso conhecer e estudar as operações unitárias inerentes ao seu processamento.

A torra é a operação unitária mais importante durante toda a cadeia produtiva do café e determinante para qualidade do produto na xícara. Neste processo, o objetivo principal é a formação de aroma e sabor da bebida de café por meio de processos químicos iniciados pelo calor aplicado. O aquecimento modifica a textura do grão até atingir um ponto que permite a moagem e posterior extração dos aromas e sabores (BAGGENSTOSS et al., 2008).

Na maioria dos torradores industriais, o controle do processo é feito indiretamente, usando a cor do grão e a perda de massa como os principais parâmetros para definir o nível de torra. Uma vez que estes parâmetros, por si só, não são confiáveis para obter uma correta avaliação pois não levam em consideração os tempos de secagem e caramelização, durante as últimas décadas diversos estudos desenvolveram ferramentas de controle do processo não invasivas e em tempo real com o objetivo de obter um café de alta qualidade (FRANÇA et al., 2009).

Neste presente trabalho, é apresentado o desenvolvimento de um torrador elétrico de pequeno porte. É empregado o monitoramento em tempo real da temperatura dos grãos em relação ao tempo de torra, já que dessa forma é possível entender por quais fases do processo de torra o café está passando no momento. A tecnologia de controle em malha fechada é aplicada para realizar a manipulação da potência elétrica entregue ao aquecedor buscando

manter a temperatura do café a mais próxima possível da curva temperatura x tempo pré-estabelecida como referência.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um torrador de amostras de café automático com sistema de controle embarcado, com a capacidade de seguir as curvas de torra previamente definidas. O dispositivo deve realizar a torrefação de amostras de café com repetibilidade e garantindo a qualidade e homogeneidade dos grãos.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Investigar as metodologias e tecnologias disponíveis para realizar a torrefação de café especial.
- Projetar e desenvolver um dispositivo capaz de realizar a torra automática de café seguindo um perfil pré-definido.
- Analisar os resultados obtidos e verificar a capacidade do torrador em realizar torras para café especial.

1.3. Requisitos do projeto, definição de variáveis dependentes e independentes

1.3.1. Requisitos funcionais

- Tempo de torra: O torrador deve ser capaz de torrar a quantidade especificada em um tempo inferior a 8 minutos, de forma a contemplar torras rápidas.
- Temperatura Máxima: O torrador deve ser capaz de atingir temperatura superior à estipulada para torras de cafés especiais (220°C), de forma a ser capaz de torrar em todas as intensidades desejadas.
- Margem de controle: O controlador deverá ser projetado de modo a ajustar o valor eficaz da tensão de alimentação entre 0 a 127 V dentro da faixa operacional de comando do TRIAC (180° - 0).
- Repetibilidade: As torras devem ser repetitivas, com duração e temperatura final sendo atingidas de forma esperada.

1.3.2. Requisitos técnicos

- Tensão de funcionamento: O torrador deverá operar com tensão eficaz de 127 V, monofásico.
- Quantidade mínima: O torrador deverá torrar no mínimo 60 g de café.

1.3.3. Variáveis dependentes e independentes

Quanto às variáveis envolvidas no processo de torrefação de café, define-se como variável independente a curva de temperatura x tempo do processo de torra, denominada curva de torra.

A partir da curva de torra, definem-se as variáveis dependentes:

- O sinal de controle proveniente do controlador do processo, o qual por sua vez depende do sinal de erro entre a curva de torra e a temperatura medida.
- A tensão fornecida ao resistor do torrefador, à qual depende do sinal de controle proveniente do controlador do processo.
- A temperatura de torra dos grãos de café, à qual depende da potência dissipada pelo resistor do torrador, à qual por sua vez é função da tensão fornecida ao resistor.
- As características dos grãos de café torrados (cor, aroma, sabor), às quais dependem do comportamento dinâmico da temperatura no processo de torra, o qual depende da curva de torra adotada e do seu seguimento pelo torrador.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Café Especial

Todo lote de café comercializado passa pelo processo de análise sensorial para que possa ser precificado. Para isso os *Quality Graders*, profissionais qualificados para realizar a degustação do café, torram a amostra que representa o lote e avaliam sistematicamente os atributos do café nos seguintes quesitos:

- Aroma: são definidos pelas percepções olfativas do café, quando em pó seco e após a adição da água quente.
- Sabor: é a associação do cheiro com o gosto. É avaliado se apresenta notas características desejadas de outros alimentos como cítricas, achocolatadas, frutadas e herbais, ou sabores indesejados como defumado, medicinal, vinagre e leguminosas.
- Acidez: é uma propriedade sensorial que é percebida nos lados posteriores da língua durante a degustação, tem como característica principal fazer a boca salivar. Acidez cítrica, málica e tartárica são desejáveis. Já a acidez acética, presente no vinagre, é um defeito que diminui severamente a nota do café.
- Sabor residual: é a sensação persistente na boca após a ingestão da bebida.
- Corpo: é a sensação de oleosidade e de viscosidade do líquido na boca, principalmente entre a língua e o céu da boca.
- Equilíbrio: é a forma como todos os vários aspectos de sabor, finalização, acidez e corpo da amostra se complementam ou contrastam um com o outro. Em outras palavras, se os atributos estão em harmonia entre si, o equilíbrio do café será bom.
- Uniformidade: refere-se à consistência do sabor nos diferentes copos de amostra provados. Se os copos (são utilizados cinco copos para provar o mesmo café) apresentarem sabores diferentes, a classificação deste aspecto não será tão elevada. Avalia a homogeneidade do lote.
- Xícara limpa: é quando não há interferência de impressões negativas no sabor das amostras, desde a primeira ingestão à sensação de finalização, refletindo a transparência da bebida.
- Doçura: Refere-se a intensidade da doçura percebida durante a degustação. Quanto mais intensa, maior a pontuação.
- Impressão geral: é o conjunto dos aromas da bebida e de seu grau de intensidade, do equilíbrio e da harmonia da bebida e é nesse momento que os degustadores fazem suas avaliações pessoais.

A nota final do café é a soma dos quesitos individuais que variam de 0 a 10. De acordo com a BSCA (Brazilian Speciality Coffee Association), Cafés Especiais são grãos isentos de impurezas e defeitos que possuem atributos sensoriais diferenciados. Acima dos 80 pontos na análise sensorial o café é considerado especial (SCA Cupping Protocol, 2008).

2.1.1. Processo de torra do café especial

A obtenção de um café de qualidade especial é o resultado de cuidados excepcionais de todos os processos unitários pelo qual o café passa.

O plantio e manejo da lavoura, o planejamento de safra e os métodos de processamento e beneficiamento do café devem ser muito bem planejados e executados para atingir uma pontuação SCA acima de 80. Porém é durante o processo de torra que todo o trabalho envolvido é transformado em aspectos sensoriais palatáveis, sendo esse o mais importante processo pelo qual o café passa e onde há o maior valor agregado.

Para (Silva, 2008) “Em decorrência da transferência do calor, as reações pirolíticas ocorridas ocasionam a formação de vários compostos voláteis e não voláteis”. Esses compostos são responsáveis pelos atributos sensoriais do café. O grau e resultados dessas reações depende da qualidade dos componentes do café cru e da intensidade do calor aplicado durante o processo.

O café passa por 3 fases durante a torra: secagem, pirólise e resfriamento.

- Secagem: O café especial cru pode possuir de 10% a 12% de água no seu interior. A maior parte dessa umidade é evaporada nos 5 primeiros minutos da torra, até a temperatura externa dos grãos atingir cerca de 150°C. Durante essa fase, não ocorrem reações químicas significativas. É possível observar a mudança de tonalidade de verde claro para amarelo claro durante a secagem.
- Pirólise: Durante essa fase, que inicia após a secagem, é quando acontecem as principais reações químicas. A partir dos 150°C a quantidade de calor injetada nos grãos de café e o tempo de torra tem impacto direto na qualidade final da bebida. As reações de pirólise formam compostos químicos aromáticos voláteis responsáveis pelo aroma e sabor.
- Resfriamento: Assim que o café atinge a temperatura desejada pelo torrefador (entre 195°C até 220°C para cafés especiais), o café necessita ser resfriado rapidamente para cessar as reações químicas que ocorrem em seu interior.

Para (Washington, 2004), o sabor e aroma que caracterizam a bebida café são resultantes da combinação de centenas de compostos químicos produzidos pelas reações que ocorrem

durante a torrefação. A qualidade final da bebida, intrinsecamente relacionada à composição dos grãos torrados, é influenciada pelas características da matéria-prima e pelas condições de processamento pós-colheita. O grau de torra afeta diretamente o sabor do café, definindo os vários compostos que são extraídos durante a formação da bebida. Todas essas características estão diretamente associadas com a cor do grão torrado.

Para melhor entendimento, seguem as características do grão torrado, relacionados com a cor e a temperatura do grão no fim da torra, obtidas por Washington no trabalho: *A importância da informação sobre o grau de torra do café e sua influência nas características organolépticas da bebida*:

- **Estágio amarelo – 90°C-120°C.** No estágio o café passa da coloração verde para amarelada, como mostra a Figura 1.

Figura 1: Estágio Amarelo.



Fonte: (Embrapa, 2004).

- **Estágio Marrom (Figura 2) – 120°C a 180°C.** Neste momento o grão está perdendo umidade rapidamente. No final desse estágio, é após 150°C que as principais reações químicas começam a ocorrer no interior do grão.

Figura 2: Estágio Marrom.



Fonte: (Embrapa, 2004).

- **Estágio American - 180°C - 190°C.** Quando o primeiro “*crack*” começa. O café ainda está com a cor mesclada, os grãos começam a expandir de tamanho e a semente se rompe fazendo o som de “*crack*” característico, como mostra a Figura 3. Nesse estágio poucos açúcares estão caramelizados e o sabor ainda não se desenvolveu completamente.

Figura 3: Estágio American.



Fonte: (Embrapa, 2004).

- **Estágio City, City Plus e Full City – 190°C-220°C.** O café completou o primeiro crack, alcançando um marrom moderado (Figura 4). Neste ponto, o café tem se expandido devido ao escape de gases do primeiro *crack*. Em termos da qualidade da bebida, neste estágio, terá a melhor chance para sentir o caráter original do café. O intervalo de temperatura entre 195°C a 220°C representa as temperaturas de torra do “pico do sabor”.

Figura 4: Estágio City Plus



. Fonte: (Embrapa, 2004).

- **Estágio Full City Plus – 221°C- 230°C.** O segundo *crack* aconteceu completamente. O brilho indica um processo de eliminação de óleo (Figura 5).

Figura 5: Estágio Full City+



Fonte: (Embrapa, 2004).

- **Estágio Viena – 231°C a 240°C.** É uma torra intensa, com o resultado do sabor queimado sobrepondo os outros sabores (Figura 6).

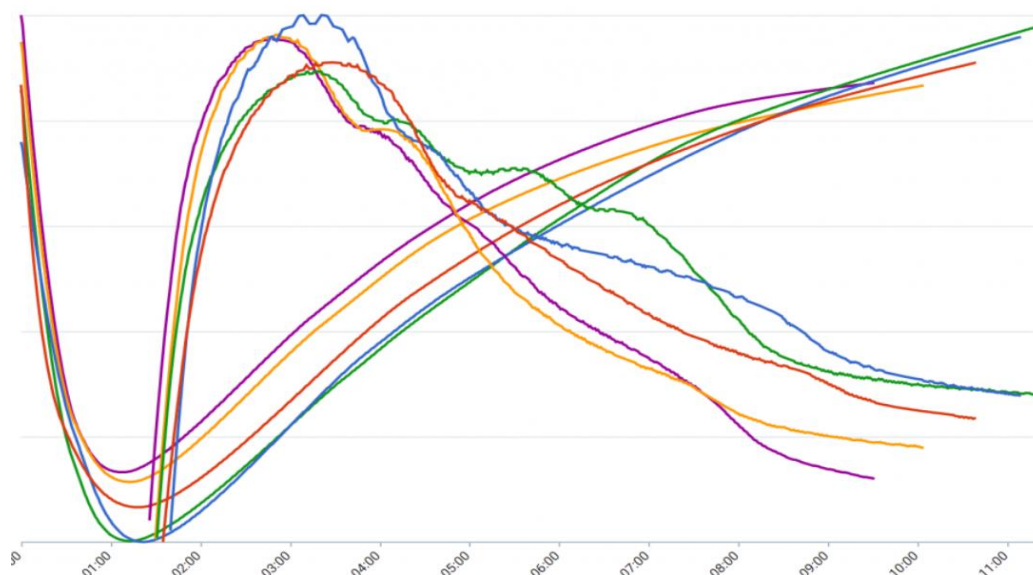
Figura 6: Estágio Viena.

Fonte: (Embrapa, 2004).

Para o café especial, o alvo da temperatura do fim de torra é entre 195°C e 220°C. Porém, o tempo que o café leva para chegar na temperatura final interfere no sabor. Torras mais rápidas (7 a 10 min) tendem a ser mais ácidas, trazendo notas frutadas e cítricas enquanto torras mais lentas (10 a 14 min) tendem a trazer notas mais achocolatadas e suaves.

Para padronizar a torrefação de cafés especiais e obter resultados mais consistentes, os torrefadores começaram a realizar a aquisição dos dados de temperatura durante a torra com a finalidade de ter referências para as consecutivas torras do mesmo lote de café, com isso surgiram os “Perfis de torra”.

Um mesmo lote de café pode possuir diversos perfis de torra, obtendo sabores ligeiramente diferentes, alguns sendo indicados para cafés coados, outros para expressos, ou até mesmo para modelar a acidez de acordo com o perfil de consumo dos clientes. Na Figura 7 são apresentadas diversas curvas de torra para um lote de café. Entre elas há diferenças nas características sensoriais do produto, demonstrando a importância de se controlar a torra do café para obter lotes com qualidade e consistência. (PDG, 2020)

Figura 7: Perfis de torra.

Fonte: (PDG, 2020).

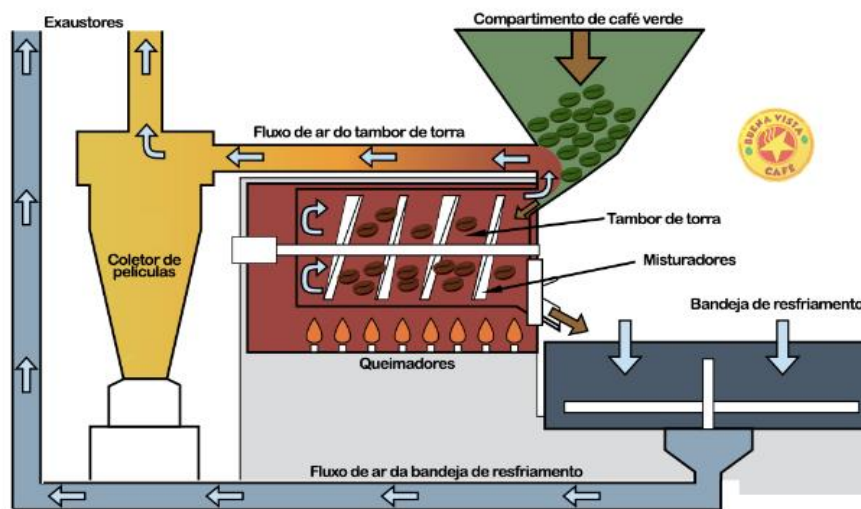
2.1.2. Tipos de torradores

A seguir são apresentados os principais tipos de torradores.

- Torra por fogo direto: Nesse tipo de torra os grãos de café giram dentro de um cilindro que é aquecido na parte externa por chamas (fogo direto), o tambor aquecido transfere calor para os grãos de forma homogênea, já que o tambor movimenta de forma circular misturando o café (PEREIRA; MOREIRA, 2021).

A transmissão de calor ocorre principalmente através da condução do calor da chapa metálica em contato com os grãos de café. É o método mais primitivo para realizar a torrefação do café, porém, ainda utilizado atualmente.

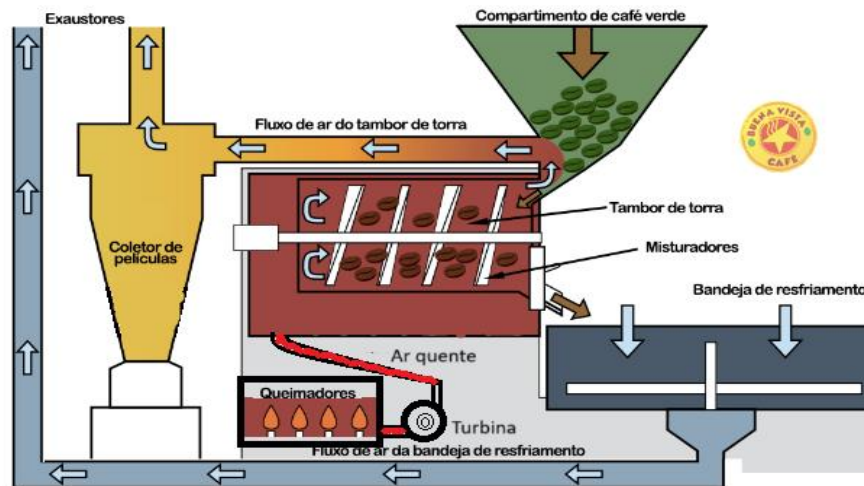
Figura 8: Torrador tipo cilindro Fogo Direto.



Fonte: (Buenavista Café, 2020)

- Torra por ar pré-aquecido: Um fluxo de ar quente gerado por um queimador é direcionado para um tambor rotativo contendo o café. A transferência de calor ocorre através da convecção do fluxo laminar entre o ar e o café e através da condução entre os grãos (PEREIRA; MOREIRA, 2021). A Figura 9 apresenta o esquemático de um torrador que utiliza ar pré-aquecido.

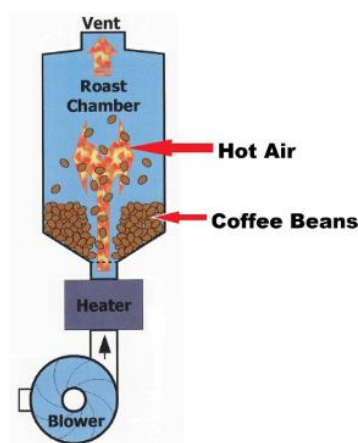
Figura 9: Torrador por ar pré-aquecido.



Fonte: Buenavista café (Modificado)

- Torra por leito fluidizado: Nesse tipo de torra, um fluxo de ar quente pré-aquecido passa pela câmara de torrefação (onde os grãos estão) com velocidade suficiente para suspendê-los. A transferência de calor ocorre através da convecção de fluxo. (BASILE; KIKIC, 2009). A transferência de calor por convecção ocorre quase que exclusivamente pelo leito fluidizado, o que permite uma torrefação rápida e de alto rendimento (PUTRA et al., 2019). A Figura 10 apresenta um esquemático de um torrador por leito fluidizado.

Figura 10: Esquema torrador de leito fluidizado.



Fluid Bed Coffee Roaster

Fonte: (COFFEE, [s.d.])

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste tópico, são apresentados trabalhos e pesquisas relacionadas ao controle em malha fechada aplicada a torrefação de café. Esses projetos serviram como motivação no desenvolvimento deste trabalho.

3.1. Otimização do controle automático de um torrador de café (FREITAS, 2023)

O objetivo deste trabalho era apresentar uma proposta para otimizar o controle de temperatura do ar quente de um torrador de café contribuindo para a melhoria do processo de torra. A proposta busca aprimorar o controlador automático do tipo Proporcional Integral Derivativo (PID) com o objetivo de deixar o controle de temperatura do ar quente com uma resposta mais rápida sem perder a precisão. (FREITAS, 2023)

No trabalho citado, é desenvolvido um sistema PID adaptativo que atua na variável porcentagem de fluxo de gás dos queimadores, controlando a temperatura do ar que entra na câmara de torrefação. O torrador em questão tem capacidade para torrar até 480 kg de café. Três tipos de controle PID foram desenvolvidos, um conservador, um moderado e um agressivo. Dependendo do erro da temperatura do ar em relação ao “setpoint”, o tipo de PID mais adequado a situação seria implementado, tornando o processo mais robusto.

Os estudos foram teóricos e não houve o desenvolvimento de nenhuma métrica que correlacionasse o erro durante o processo à qualidade do produto final.

3.2. Analysis of temperature control effect in fluidized bed coffee roaster

O objetivo principal deste trabalho foi desenvolver um sistema de leito fluidizado para estudar o efeito do controle de temperatura nas propriedades físicas do café torrado de Cauca, Colômbia. O controle automático integrado à fabricação digital tem desempenhado um papel importante no avanço tecnológico da indústria cafeeira e na fabricação de novos produtos. (CAMPO-CEBALLOS et al., 2020, tradução nossa)

No trabalho em questão, foi desenvolvido e construído um torrador de café controlado por PID. O projeto consistiu em um torrador de pequeno volume, baseado em leito fluidilizado. A interface foi programada em LabView, e os parâmetros PID calculados por MatLab. Os resultados de precisão de controlador foram realizados utilizando o método de análise Kruskal Wallis.

Porém ainda assim, foi constatada a necessidade de se desenvolver um método estatístico levando em consideração o erro acumulado, devido a imprecisão inerente ao instrumento de medição. (CAMPO-CEBALLOS et al., 2020, tradução nossa)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Materiais

4.1.1. Pipoqueira elétrica

No presente trabalho, o torrador foi baseado em uma pipoqueira elétrica. Ao verificar os componentes, nota-se a semelhança construtiva entre a pipoqueira e um torrador de leite fluidizado. Ambas possuem um elemento aquecedor, ventoinha, distribuidor e reservatório para grãos. O modelo da pipoqueira elétrica utilizada foi a “Sate 1200w”, mostrado na Figura 11.

Figura 11: Pipoqueira elétrica Satellite.



Fonte: (Americanas, [s. d.]).

Ao desmontar a pipoqueira, foi possível analisar seus componentes internos:

- **Motor e resistência**

A pipoqueira é construída de forma que o elemento resistivo e o motor são alimentados por corrente alternada. Porém, o motor DC está conectado por meio de um divisor de tensão no próprio elemento resistivo, como mostra a Figura 12. A corrente é retificada por meio de uma ponte retificadora de onda completa. A tensão nominal do motor DC é de 24 V.

Figura 12: Motor e resistência.



Fonte: Autora Própria.

Foi verificado que o resistor de aquecimento tinha uma resistividade de aproximadamente 13Ω , sendo que a parcela do resistor associada aos polos do motor tinha uma resistência de cerca de 3Ω , totalizando cerca de 16Ω , resultando numa potência dissipada de 1008 W.

- Recipiente/Distribuidor

A pipoqueira possui um compartimento em alumínio e aletas para distribuição do ar quente proveniente do aquecedor (Figura 13), de modo a agitar o seu conteúdo e obter uma maior eficiência térmica. O modelo em questão é indicado para estourar 60 g de pipoca.

Figura 13: Recipiente/Distribuidor da pipoqueira.



Fonte: Autora Própria.

4.1.2. Módulo Dimmer 16A, 127V

O módulo dimmer TRIAC é um circuito eletrônico capaz de realizar o controle da potência elétrica entregue a uma carga resistiva via microcontrolador. Originalmente o módulo contava com um TRIAC especificado para uma corrente de até 8 A. O componente foi substituído por um que possui capacidade de até 16 A, similar ao apresentado na Figura 14.

Figura 14: Módulo Dimmer.



Fonte: (UsinaInfo, [s. d.]).

4.1.3. Termopar Tipo K + amplificador Max 6675

O termopar tipo K é um dispositivo composto por dois fios metálicos de cromel e alumel. Soldados em uma extremidade para formar uma junta de medição, este termopar opera com base no princípio do efeito Seebeck. Quando submetido a uma diferença de temperatura, gera uma tensão proporcional à variação térmica entre a junta de medição e a junta de referência. Este fenômeno confere ao termopar tipo K uma faixa de operação que vai de 0°C a aproximadamente 850°C. A tensão gerada pela junta é amplificada e convertida ao protocolo SPI pelo chip MAX 6675. Posteriormente, no microcontrolador, a informação enviada pelo MAX 6675 é convertida em escala de temperatura. A Figura 15 apresenta o modelo de termopar utilizado neste trabalho.

Figura 15: Termopar e módulo.



Fonte: (UsinaInfo, [s. d.]).

4.1.4. Placa de desenvolvimento ESP32-DevKitC V4

O ESP32-DevKitC V4 é uma placa de desenvolvimento da Espressif, contendo o módulo Wifi e Bluetooth. Possui processador de 32 bits, além da presença de dois núcleos de CPU (processador dual-core), permitindo que aplicações sejam compatíveis com sensores, módulos e diversas interfaces (Espressif, 2023). A Figura 16 apresenta a placa de desenvolvimento ESP32 utilizada neste trabalho.

Figura 16: Placa de desenvolvimento ESP32.



Fonte: (UsinaInfo, [s. d.])

4.1.5. Fonte 24V 10A

A Figura 17 apresenta a fonte utilizada neste trabalho, à qual consiste numa fonte chaveada bivolt com tensão nominal de 24 Volts e capacidade de entregar até 240 W à carga.

Figura 17: Fonte de alimentação 24 V, 10 A.



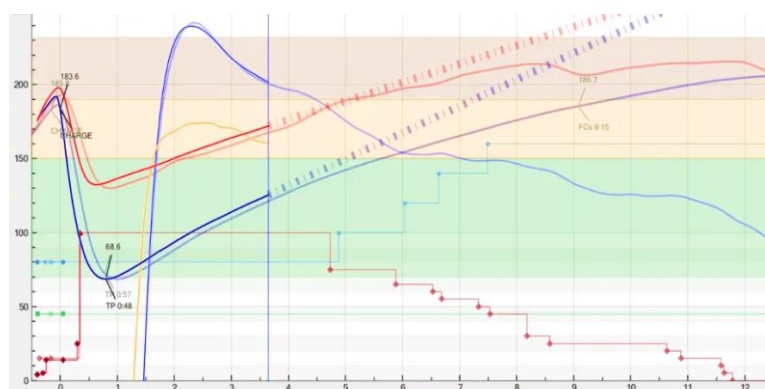
Fonte: (UsinaInfo, [s. d.])

4.1.6. Software Artisan Scope

Artisan é um software *open source* que auxilia torrefadores a gravar, analisar e controlar os perfis de torra de café. Com ele é possível criar as curvas de torras a serem seguidas, criar eventos durante o processo, configurar protocolos de comunicação Serial, Modbus, Profinet, entre outros. (ARTISAN, [s.d.])

Possui área de controle, onde é possível inserir parâmetros PID para automação. Possui interface definida pelo usuário, com a possibilidade criar botões e eventos com funções programadas. Além disso, as informações de torra podem ser exportadas em diversos formatos, como Excel, CSV, e em formatos proprietários para serem utilizados em outros softwares de controle de torra. A Figura 18 apresenta uma tela de análise de dados do Artisan.

Figura 18: Exemplo de tela do Artisan Scope.



Fonte: Autoria Própria.

4.2. Desenvolvimento

O presente trabalho tem como ideia inicial a adaptação de uma pipoqueira elétrica para a realizar torras de amostras de café automaticamente, seguindo um gráfico de temperatura em função do tempo previamente definido.

4.2.1. Verificação de capacidade da pipoqueira

O primeiro passo foi verificar a capacidade da pipoqueira elétrica, sem modificações, de realizar a torra de uma amostra de café. Foi constatado que ao inserir 110 g de café e ligar a pipoqueira, 7 minutos foram o suficiente para o grão apresentar cor escura com manchas de óleo na superfície, como mostra a Figura 19. A título de comparação, o grão torrado no primeiro teste se assemelhava a uma torra Full City Plus (221°C - 230°C). Nesse padrão de torra, as características do café já começam a se degradar, sendo a temperatura máxima do grão para um café especial até 220 °C.

Figura 19: Primeiro café torrado.



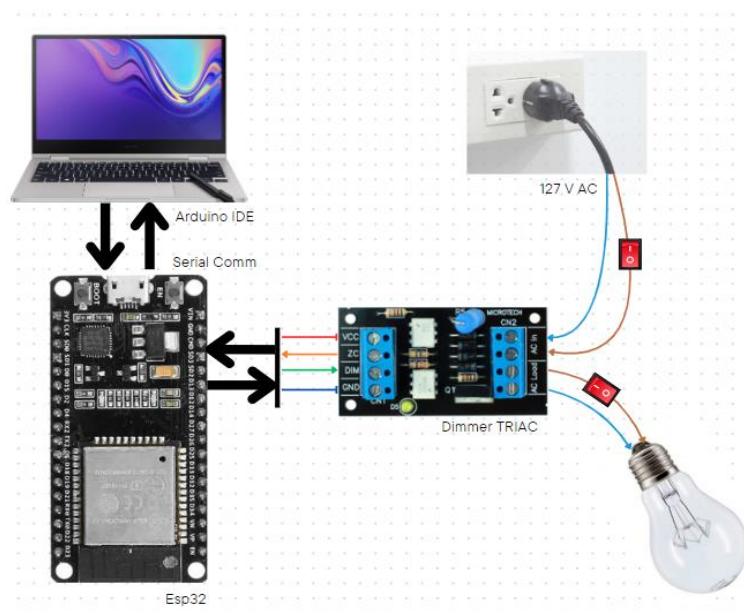
Fonte: Autoria Própria.

Visto isso, foi verificado que a pipoqueira possui potência suficiente para realizar torra de 110 g de café especial com resultado satisfatório, já que os grãos estavam uniformemente torrados em uma temperatura superior às torras de café especial e em um intervalo de tempo menor que o convencional.

4.2.2. Controle de potência para o aquecedor

O esquema de ligação apresentado na Figura 20 foi desenvolvido com a finalidade de controlar a tensão CA sobre uma carga resistiva. O desenvolvimento desse circuito simplificado também foi útil para realizar testes e o início do desenvolvimento do *firmware* para controle de tensão.

Figura 20: Esquema do hardware de teste.



Fonte: Autoria própria.

Para iniciar os testes, o esquema foi montado em bancada, como mostra a Figura 21. Uma programação simples foi implementada com a intenção de testar apenas o *dimmer* controlando uma resistência (Lâmpada Incandescente).

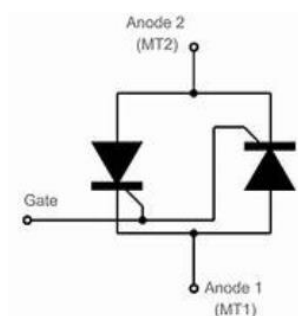
Figura 21: Hardware de teste montado.



Fonte: Acervo pessoal

O sistema de controle foi baseado em um módulo *dimmer* acionado por um TRIAC, componente eletrônico utilizado para realizar o controle de potência CA. Sua construção é baseada em dois tiristores conectados em antiparalelo com o *gate* em comum (Figura 22).

Figura 22: Triac.

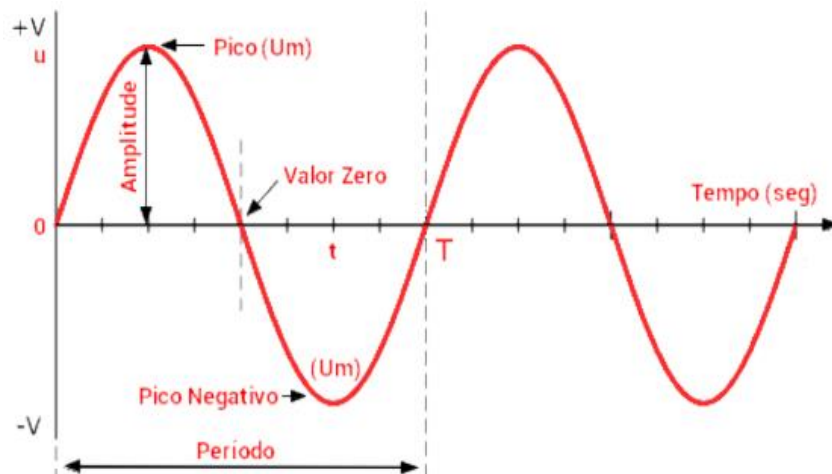


Fonte: (HART, 2011)

Resumidamente, o seu funcionamento ocorre quando a tensão aplicada na porta Gate é maior que a tensão de limiar, assim, o TRIAC entra em modo de condução, permitindo a passagem de corrente do Anodo 1 para o Anodo 2. O dispositivo permite a passagem de corrente até o momento em que não há DDP entre os Anodos, sendo necessário outro pulso no Gate para entrar em condução novamente, portanto, é necessário um novo pulso na porta Gate após cada semiciclo para que o dispositivo continue conduzindo.

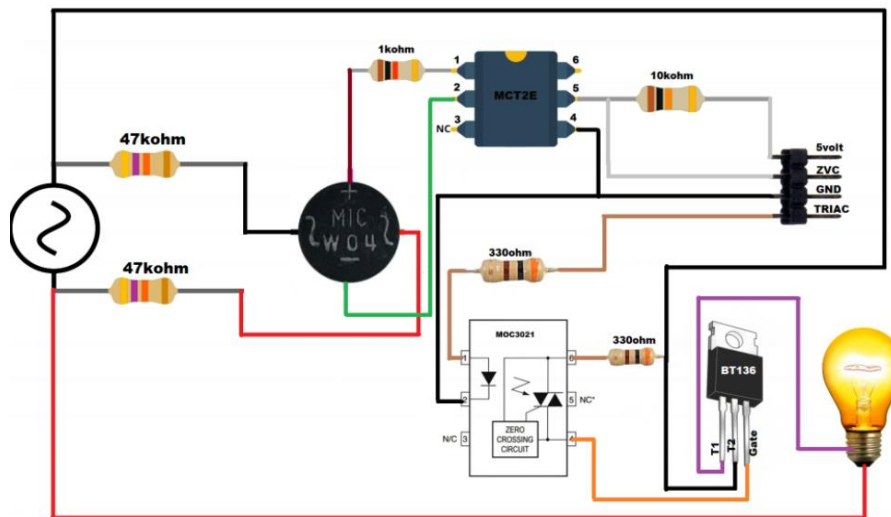
O módulo *dimmer* conta com um circuito de *zero crossing*, que serve para possibilitar a sincronização do disparo do TRIAC quando a tensão CA passa pelo 0 V (conforme mostra a Figura 23), permitindo um controle mais preciso. A Figura 24 apresenta um esquemático detalhado do circuito do módulo *dimmer*.

Figura 23: Forma de onda de tensão alternada evidenciando um ponto no qual a tensão é igual a 0 V.



Fonte:((EQUIPE DESTERRO ELETRICIDADE, 2016).

Figura 24: Esquemático módulo *dimmer*.



Fonte: (TECHNOLABCREATION, [s.d.]).

O circuito é composto por um retificador de onda completa, circuito identificador de *zero crossing* (Com saída de sinal para um microcontrolador) e um circuito para realizar o acionamento do TRIAC (Com entrada para sinal de um microcontrolador). Uma das fases da alimentação CA é conectada na carga, enquanto a outra passa pelo TRIAC, que funciona como um interruptor.

Em um ramo paralelo, a tensão de entrada CA passa por resistores de alto valor Ôhmico para limitar a corrente, e então é retificada por um retificador de onda completa. O sinal pulsante resultante passa por um opto acoplador que serve como identificador de *zero crossing*. Toda

vez que a tensão proveniente do retificador é nula, um pulso é emitido do opto acoplador para uma saída digital.

Um outro circuito, também baseado em opto acoplador, espera um pulso de tensão proveniente de um microcontrolador. Esse pulso é então utilizado para energizar o terminal *gate* do TRIAC e fazê-lo entrar em modo de condução. O tempo, ou ângulo de defasagem entre o sinal emitido pelo “*zero crossing*” e o sinal recebido para o disparo do TRIAC é o parâmetro que realiza o controle da potência entregue à carga.

4.2.3. Controle do ângulo de disparo

Segundo HART (2011), um controlador Monofásico pode utilizar 2 SCRs ou 1 TRIAC. O controle da potência utiliza o Ângulo de Disparo do semicondutor como parâmetro. Para um ângulo de disparo de 0° , a tensão RMS sobre a carga é igual à tensão da fonte. Quanto mais próximo o disparo é de 180° , menor é a tensão RMS de saída. A tensão RMS entregue a carga pode ser calculada da seguinte forma:

$$V_{oRMS} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} [V_m \cdot \sin(\omega t)]^2 d(\omega t)}$$

Porém, devido a simetria da forma de onda senoidal, a equação acima pode ser reescrita da seguinte forma:

$$V_{oRMS} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin(2\alpha)}{2\pi}}$$

Sendo:

V_{oRMS} = Tensão RMS da saída do controlador

α = Ângulo de disparo do TRIAC

V_m = valor de pico da tensão de entrada do circuito de controle.

Como mencionado anteriormente, o elemento aquecedor da pipoqueira tem uma resistência de 16Ω . A potência dissipada é calculada por:

$$P = \frac{V_{oRMS}^2}{R} = \frac{127^2}{16} = 1008 \text{ W}$$

Sendo:

P = Potência [W]

R = Resistência [Ω]

Portanto o sistema de controle deve entregar uma potência que varia de 0 a 1008 W, em relação ao ângulo de disparo de 180° a 0°.

Para facilitar a programação do Microcontrolador, o parâmetro de controle da potência foi trocado da escala de graus para segundos. Essa alteração foi realizada da seguinte forma:

- A frequência da corrente alternada no Brasil é de 60 Hz, ou seja, 60 ondas completas (0° - 360°) por segundo.
- Como o circuito *dimmer* entrega o pulso de *zero crossing* a cada passagem da tensão por 0 V, logo cada semiciclo será controlado.

Portanto, a frequência dos semiciclos é de 120 Hz. Para o cálculo do período do semiciclo, tem-se:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{120} \approx 0.0083 \text{ s}$$

Sendo:

T = Período (s)

f = Frequência (Hz)

Com o resultado acima, é possível realizar a função de conversão de graus para milissegundos no microcontrolador, uma vez que o disparo do *gate* do tiristor deve ocorrer entre 0ms – 8,3ms de forma a controlar o valor RMS da tensão entre 100% e 0%, respectivamente.

4.2.4. Implementação no microcontrolador

A Figura 25 apresenta o fluxograma da programação implementada no microcontrolador.

O valor de potência desejado em porcentagem é escrito pelo usuário na porta Serial e fica salvo no ESP 32, podendo ser alterado a qualquer momento. Paralelamente, o circuito detector de zero monitora a tensão CA no circuito *dimmer*. Quando a tensão da rede é zero, um sinal é enviado para o pino de interrupção externa do ESP 32. A interrupção faz rodar uma lógica em que o último valor escrito na porta serial seja convertido para milissegundos.

Com o período do semiciclo calculado, foi possível desenvolver a lógica da interrupção externa. Essa lógica converte o valor de potência (0% - 100%) em (8 ms - 0 ms) utilizando a função `Map`, interna da arduino IDE. Essa função remapeia um número de um intervalo para outro da seguinte maneira:

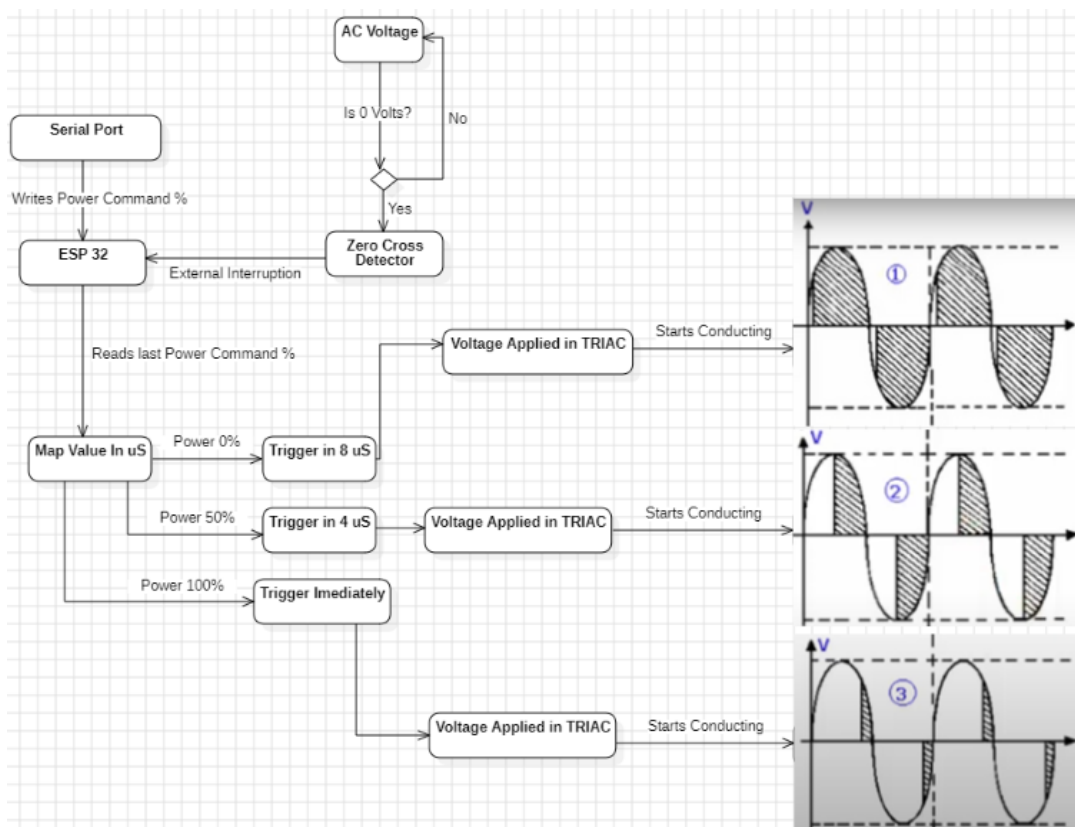
```
=map(valor, deMenor, deMaior, paraMenor, paraMaior);
```

```
=map(power, 0, 100, 8 milliseconds, 0 milliseconds);
```

(“map() - Documentação de Referência do Arduino”, [s.d.]).

Assim que o valor é convertido de porcentagem para milissegundos, o microcontrolador inicia uma contagem regressiva do valor recebido. Quando o valor chega a 0, um pulso é enviado do ESP 32 para o TRIAC, que entra em modo de condução. Quanto menor o tempo para disparo do TRIAC, maior a tensão entregue à carga. Enquanto não há pulso no TRIAC, não há tensão sobre a carga. O valor RMS da tensão vai depender de quanto tempo o microcontrolador demorou para disparar o TRIAC.

Figura 25: Fluxograma do programa implementado no microcontrolador



Fonte: Autoria própria.

A Figura 26 apresenta quatro testes realizados com o circuito de testes, variando a potência entregue à lâmpada de 0 a 100 %.

Figura 26: Testes realizados com o circuito de testes.



Fonte: Autoria própria.

4.2.5. Configurando a comunicação com o Artisan

O software Artisan possui suporte para comunicação serial. Seu protocolo possui algumas funções pré-estabelecidas, porém, há liberdade de criar eventos definidos pelo usuário.

Utilizando a comunicação Serial, o Artisan tem a capacidade de ler dados provenientes de até 6 sensores diferentes. Sua comunicação se dá da seguinte maneira:

- O usuário configura o intervalo de tempo que as leituras devem ser requisitadas.
- O Artisan escreverá “READS” na porta serial em um intervalo pré-definido e esperará uma resposta no seguinte formato: *chan1,chan2,chan3,chan4,chan5,chan6*, pelo microcontrolador. *chan1* é reservado para leituras de temperatura do fluxo de ar, *chan2* é reservado para leituras de temperatura do grão de café (BT). Os demais canais podem ser configurados livremente.
- Como no caso há apenas um termopar no sistema, o *chan2*, referente à BT (*Bean Temperature*), foi utilizado na comunicação. Os demais canais receberam o valor de “0.00”.
- Há diversos outros comandos que podem ser enviados do Artisan via comunicação serial, mas que não serão utilizados.

Um exemplo de resposta após a requisição de dados pelo Artisan é o seguinte:

```
COM6,115200,8,N,1,0.8 || Tx = || Rx = [] || Ts= 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00, 0.00
```

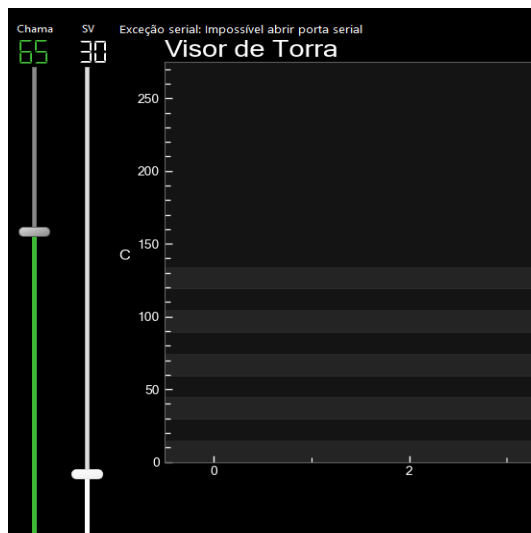
Após a requisição dos dados, o Artisan realiza a escrita dos dados de eventos internos requisitados.

O usuário tem a liberdade de criar botões, slides e eventos na tela principal do software. Caso desejado, as alterações de valores dos botões, slides e eventos podem ser escritas na porta serial. A escrita por parte do Artisan é realizada após as leituras dos dados provenientes do microcontrolador, e foi realizada a padronização dos dados no seguinte tipo: FUNÇÃO;VALOR. A Figura 27 mostra um exemplo no qual os valores do *Slide Control* “Chama” são escritos juntos com a sua função “POWER;{Valor do slide}”. Ao alterar a posição do Slide “Chama”, o respectivo valor será escrito na porta serial.

No microcontrolador, a todo momento em que há informação nova no *Serial Monitor* uma função de *String Compare* busca por “POWER”, e se a comparação retorna valor lógico 1, então os valores dos dígitos numéricos após o “;” são transferidos para a lógica da interrupção externa que controla o disparo do TRIAC.

Figura 27: Exemplo de envio de dados provenientes de componentes da tela do Artisan.

Evento	Ação	Comando	Min	Máx	Fator	Compensação	Bernoulli	Passo	Temperatura	Unidade
<input type="checkbox"/> Ar			0	100	1.0000	0.00	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> Tambor			0	100	1.0000	0.00	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	
<input type="checkbox"/> Registro			0	100	1.0000	0.00	<input type="checkbox"/>	1	<input type="checkbox"/>	
<input checked="" type="checkbox"/> Chama	Commando Serial	POWER;{}	0	100	1.0000	0.00	<input type="checkbox"/>	5	<input type="checkbox"/>	



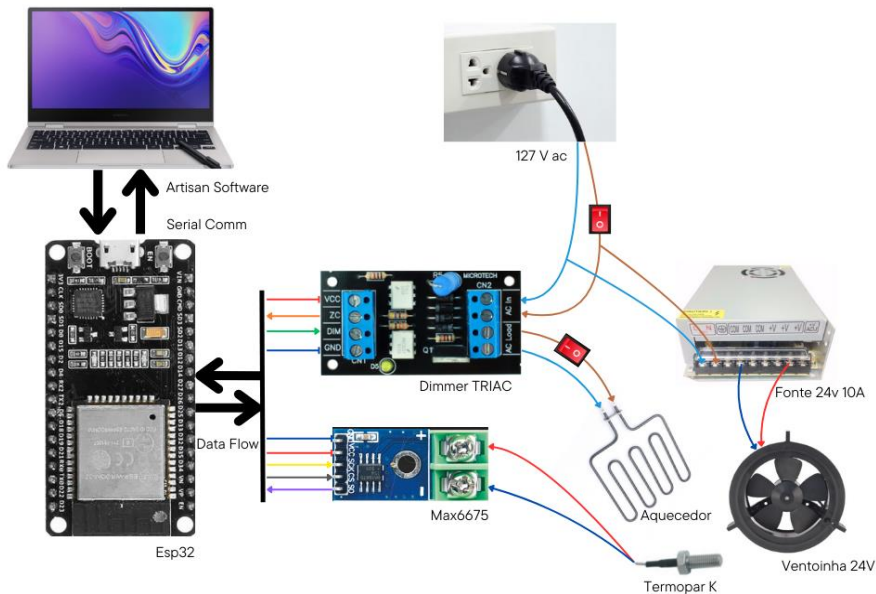
Serial Command: COM6,115200,8,N,1,0.8 || Tx = 'POWER;65' || Rx = No answer needed

Fonte: Autoria própria.

4.2.6. Implementação do Circuito de controle AC na pipoqueira

Após validar a comunicação entre Artisan e Microcontrolador, o esquema mostrado na Figura 28 foi implementado:

Figura 28: Esquema para testes com os componentes da pipoqueira modificada

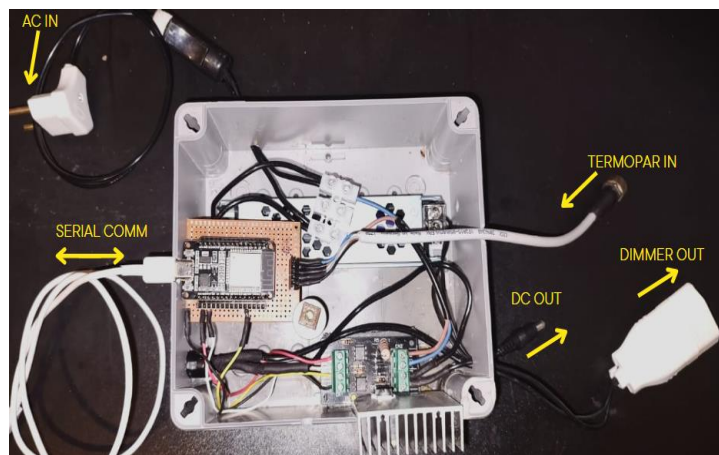


Fonte: Autoria própria.

O motor DC da ventoinha foi desconectado da ponte retificadora e ligado a uma fonte de alimentação DC com tensão nominal igual a 24V. Isso foi necessário para não alterar a velocidade do fluxo de ar durante a torra e evitar interferências indutivas no controle do aquecedor. A lâmpada foi substituída pelo elemento aquecedor e um termopar foi incluído no circuito.

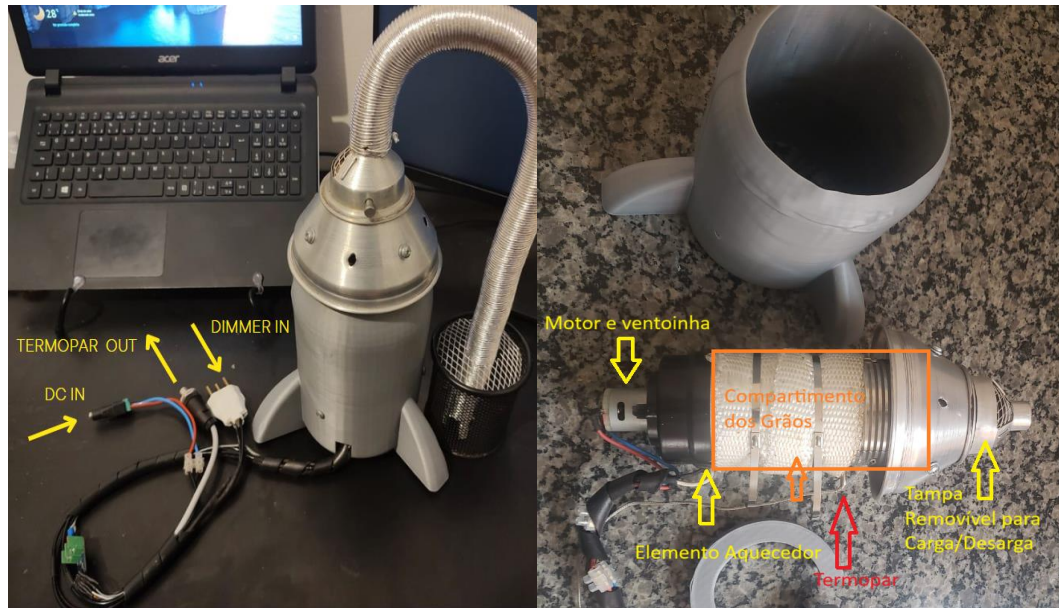
As figuras 29 e 30 apresentam imagens em detalhes do hardware montado.

Figura 29: Circuito de acionamento e controle do *dimmer*.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 30: Pipoqueira modificada com estrutura mecânica, saída de sinal do termopar, entrada para tensão DC e entrada para tensão AC dimerizada.



Fonte: Autoria Própria.

O circuito foi montado de forma que o interruptor que liga e desliga a tensão CA na saída do *dimmer* só conduz se o ramo que alimenta a fonte do motor DC também estiver ligado. Assim, evitando a possibilidade de o elemento aquecedor ser ligado sem o motor estar girando e protegendo o resistor de queimar.

4.2.7. Modelagem da Função transferência do torrador

Após realizadas as modificações na pipoqueira e verificado o pleno funcionamento do circuito de controle e da comunicação serial, uma torra foi feita para adquirir os parâmetros de temperatura x tempo da massa de café após um degrau de potência, ou seja, verificar o comportamento da temperatura após a potência aplicada na resistência ir de 0% para 100%.

O café utilizado é mostrado na Figura 31, e algumas características da amostra são listadas a seguir:

- Variedade: Catuaí Vermelho
- Peneira: Bica Corrida
- Densidade: 57 kg/m³
- Peso: 110 g

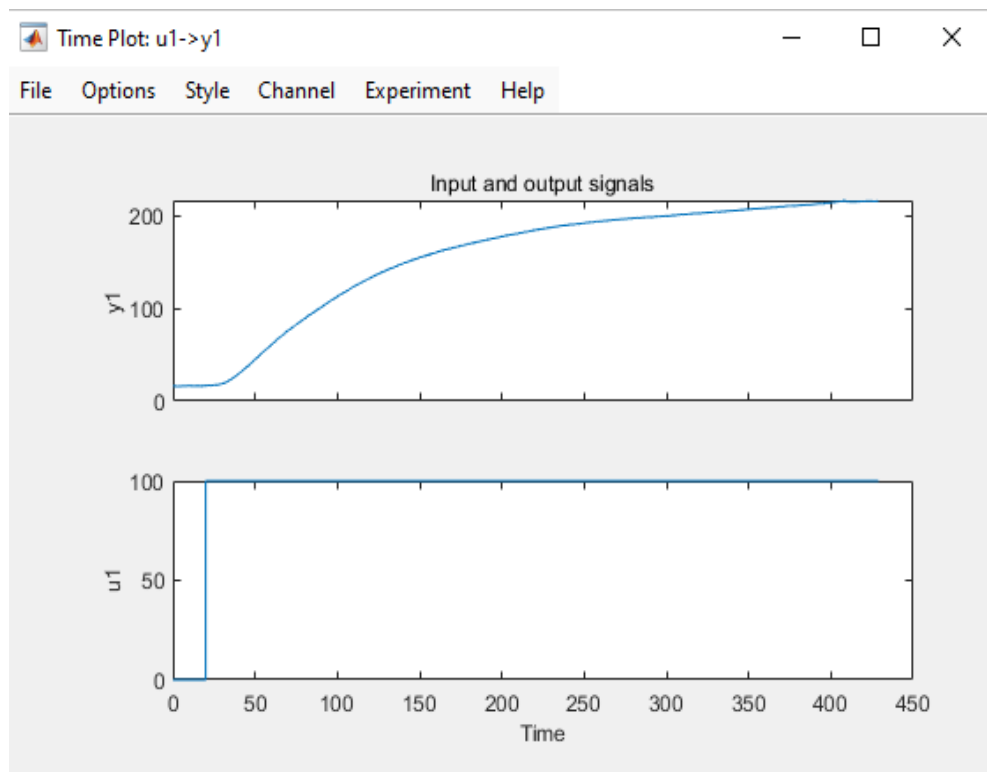
Figura 31: Amostra de café utilizada no teste para modelagem da função transferência do sistema.



Fonte: Autoria Própria.

Durante os 20 primeiros segundos a potência estava em 0%, no segundo 21, foi alterada para 100%. A aquisição de dados foi feita a cada 1 segundo. Quando a temperatura se estabilizou, após cerca de 450 segundos, o sistema foi desligado e os dados exportados para o MatLab, no qual foram gerados os gráficos da Figura 32.

Figura 32: Gráficos da temperatura medida (acima) e do degrau de potência (abaixo) em função do tempo.



Fonte: Autoria Própria.

As curvas “*Thermocouple*” (y_1) e “*Power*” (u_1) foram exportadas para o “*System Identification Toolbox*” do Matlab.

Uma função de transferência é um modelo matemático dado por um coeficiente que relaciona a resposta de um sistema ($Y(s)$) a um sinal de entrada ou excitação ($U(s)$).

Por definição, uma função transferência é determinada pela seguinte equação:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Num(s)}{Den(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_1 s + b_0}{s_n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} = \frac{N(s)}{D(s)}$$

onde:

$G(s)$ é a função de transferência

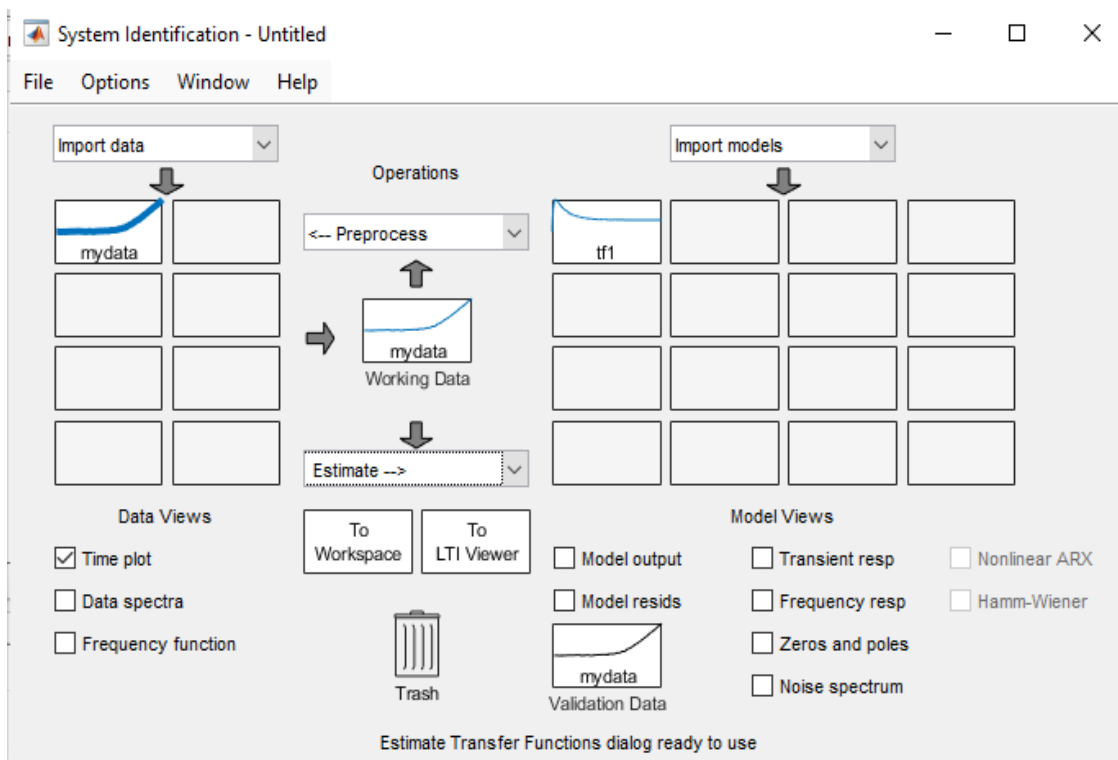
$Y(s)$ é a transformada de Laplace da resposta do processo

$U(s)$ é a transformada de Laplace do sinal de entrada ao processo

Ao analisar o gráfico de resposta ao degrau mostrado na Figura 32, é possível afirmar que o sistema pode ser descrito por uma função transferência de primeira ordem, já que não há *overshoot* (sobressinal) na subida da temperatura.

Os gráficos $Y(1)$ e $U(1)$ obtidos foram exportados para o *System Identification toolbox* (Figura 33), que executa diversos algoritmos, incluindo a equação acima para encontrar a função transferência de um grupo de dados de entrada e saída.

Figura 33: Tela inicial do *System Identification toolbox*.



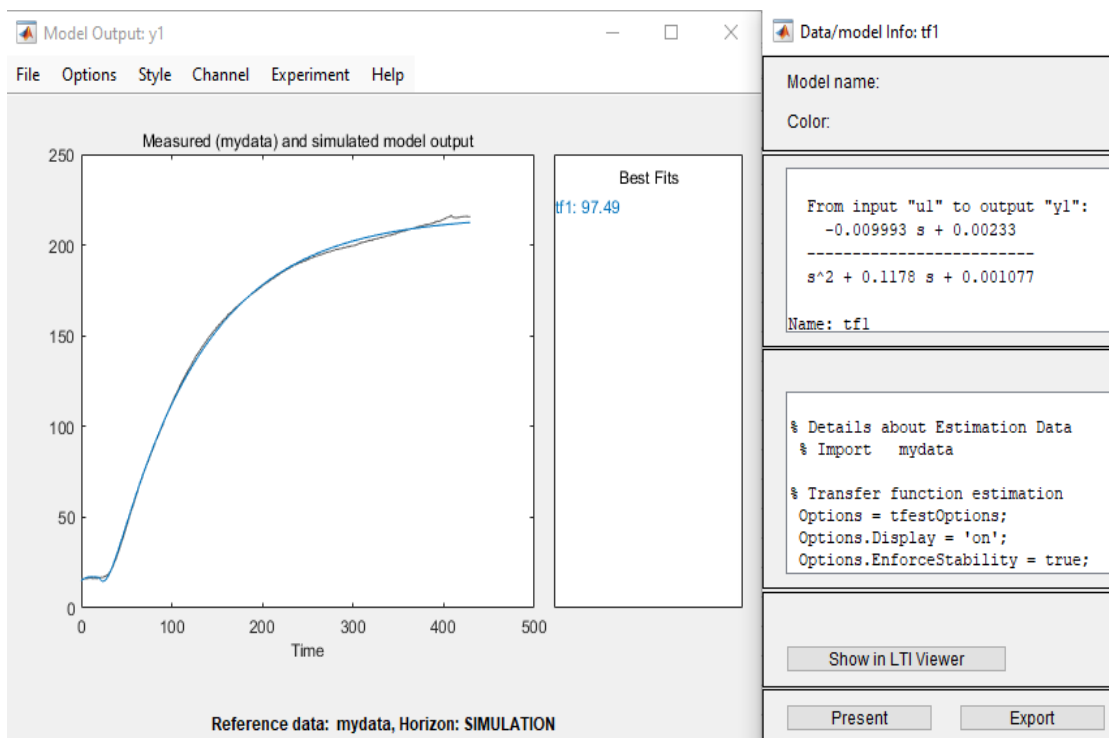
Fonte: Autoria Própria.

O *toolbox* foi configurado de acordo com a frequência de aquisição dos dados no equipamento (1 Hz). Após a execução, a seguinte função transferência foi calculada para o torrador:

$$G(s) = \frac{-0,009993s + 0,00233}{s^2 + 0,1178s + 0,001077}$$

Embora a estimativa inicial indicasse que o modelo mais adequado seria o de primeira ordem, com o modelo de segunda ordem obteve-se 97,49% de aderência à curva medida, conforme mostra a Figura 34.

Figura 34: Tela do *System Identification toolbox* com a função transferência obtida.



Fonte: Autoria Própria.

4.2.8. Desenvolvimento da metodologia para calcular a eficiência do controlador

A eficiência do controle pode ser avaliada utilizando a metodologia IAE (*Integral of Absolute Error*) ou Integral do Erro Absoluto, em português. O método IAE é calculado da seguinte forma:

- Definição do erro absoluto no tempo: A diferença em módulo entre o valor desejado e o valor real do sistema no instante.
- Integração do erro ao longo do tempo: Soma dos valores absolutos do erro ao longo de um período de tempo.

- Avaliação do desempenho: Quanto menor o valor da IAE, mais eficiente é o sistema de controle.

Como citado anteriormente no tópico **2.1.1 Processo de torra do café especial**, as reações químicas que ocorrem no grão durante a fase de seca, até 150°C, são mínimas e não interferem no sensorial do café. Porém, durante a pirólise, a partir de 150°C, as reações químicas se tornam mais intensas com a formação de compostos voláteis que são essenciais para o sabor e aroma do café.

Por esse motivo, o índice IAE foi dividido entre as fases de seca e pirólise, com pesos diferentes para a somatória final, levando em consideração a maior importância de um controle preciso durante a fase de caramelização.

$$IAE_{seca} = 0.3 * \int_{t_0}^{t_f} |e(t)| dt \quad \text{se temperatura} < 150^{\circ}\text{C}$$

$$IAE_{piro} = 0.7 * \int_{t_0}^{t_f} |e(t)| dt \quad \text{se temperatura} \geq 150^{\circ}\text{C}$$

$$IAE_{torra} = IAE_{seca} + IAE_{piro}$$

Sendo :

IAE_{seca} = IAE durante a seca. Somatória dos erros antes de 150°C

IAE_{piro} = IAE durante a pirólise. Somatória dos erros a partir de 150°C.

IAE_{torra} = Soma IAE parciais ponderados.

$|e(t)|$ = Módulo do erro da temperatura no instante de tempo t.

t_0 = tempo inicial.

t_f = tempo final

O índice IAE por si só pode não ser uma métrica confiável para analisar a qualidade da torra, pois leva em consideração principalmente o erro de temperatura. Caso a temperatura suba rapidamente e atinja o valor final alguns segundos antes ou depois do desejado, haverá diferenças no sensorial. Além disso, torras mais lentas terão, naturalmente, maior erro acumulado do que torras rápidas mesmo com o pequeno erro instantâneo.

Para evitar que a duração programada da torra interfira no resultado final da métrica que está sendo desenvolvida, será utilizada a média do erro acumulado pelo tempo programado de torra:

$$MIAE = \frac{IAE_{torra}}{T_p}$$

Sendo:

T_p = Tempo programado da torra

$MIAE$ = Média do erro acumulado

E, para penalizar ainda mais o erro do tempo, o valor $MIAE$ será multiplicado pela diferença percentual entre a duração programada da torra e a duração da torra de fato.

$$MT = MIAE * \left(1 + \frac{|T_p - T_t|}{T_p} \right)$$

Sendo:

T_t = Tempo total da torra

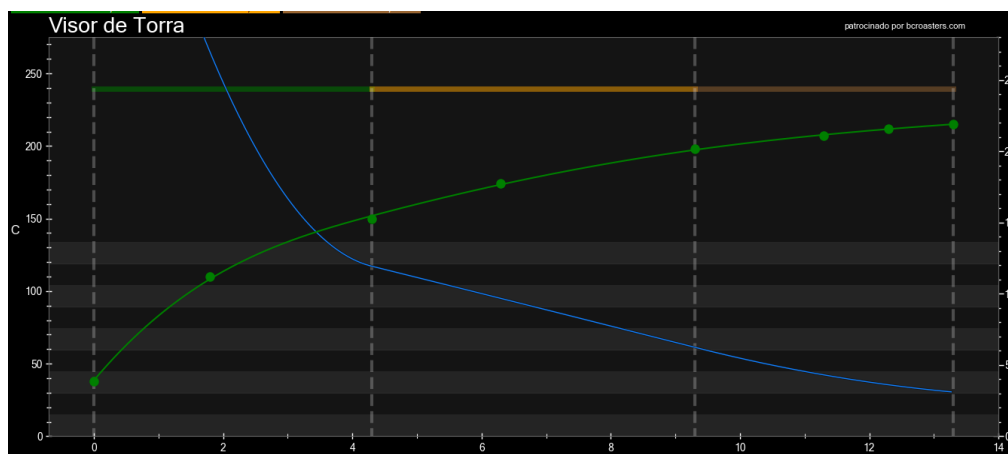
MT = Métrica para Torra

4.2.9. Configuração dos parâmetros de controle no Artisan

Definida a métrica para realizar a avaliação do controle das torras, os parâmetros de controle no Artisan foram configurados.

O software possui um método para criar as curvas de torra a serem seguidas, gerando pontos em um gráfico de temperatura x tempo. Os pontos são unidos por uma curva, a qual serve de referência para o torrefador. No gráfico apresentado na Figura 35, o gráfico verde é a temperatura de referência, e a linha azul é o *Rate of Rise* (RoR), que é a taxa de crescimento da temperatura. O RoR é utilizado para estimar a temperatura dos grãos nos próximos segundos, de modo a facilitar o controle manual do elemento aquecedor e verificar a estabilidade da temperatura.

Figura 35: Exemplo de curva de torra obtido no Artisan.



Fonte: Autoria Própria.

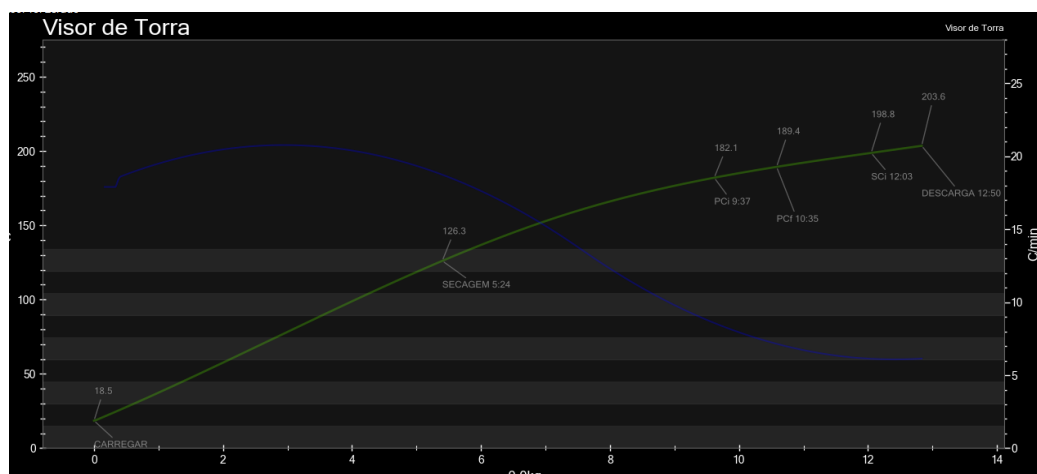
O Artisan possui interface para inserir os parâmetros de ganho (Figura 36), realizando o controle por um algoritmo PID Paralelo.

Figura 36: Tela do *Artisan* para configuração do controlador.

Fonte: Autoria Própria.

A atuação do algoritmo de controle foi configurado utilizando o controle deslizante “Chama”, mostrado na figura 27 variando de acordo com a diferença entre a temperatura lida pelo termopar “BT”, e a temperatura da curva de torra carregada no Artisan, chamado modo “Fundo”. Os valores do controle deslizante “Chama” são escritos a cada segundo na porta serial e lidos pelo microcontrolador.

Figura 37: Exemplo de curva de torra configurada no Artisan.



Fonte: Autoria Própria.

A curva de torra mostrada na Figura 37 foi configurada para que o café atinja a temperatura final de 203.6 °C em 12 minutos e 50 segundos. O sistema Artisan realiza a

comparação entre a temperatura aferida pelo termopar e a temperatura de referência a cada segundo, utilizando os ganhos PID inseridos no ambiente mostrado pela figura 36 para correção da potência. Assim que a temperatura do grão atinge a temperatura final do gráfico, o elemento aquecedor é instantaneamente desligado e a ventoinha continua ligada, resfriando o grão.

4.2.10. Projeto e avaliação dos parâmetros de controle

Para realizar o projeto dos ganhos K_p , K_i e K_d , a função transferência calculada no índice 4.2.7. **Modelagem da Função transferência do torrador** foi inserida como parâmetro de planta no “*PID Tuner Toolbox*” do software MatLab. Nessa plataforma é possível definir o tipo controle que será utilizado.

A função dos parametros de granho na variável manipulada (Power) e na variável controlada (Temperatura do grão)

Parametro Proporcional:

- Efeito na variável de manipulada: O controle proporcional ajusta a variável de controle em proporção ao erro. Quanto maior o ganho proporcional (K_p), maior será a ação do controlador.
- Efeito na variável controlada: Um aumento no ganho proporcional reduz o erro estático. Em sistemas sem a parte integral, um erro de regime permanente pode permanecer.

Parametro Integral:

- Efeito na variável de manipulada: O controle integral acumula o erro ao longo do tempo e ajusta a variável de manipulada para eliminar o erro de regime permanente.
- Efeito na variável controlada: O aumento do ganho integral (K_i) reduz o tempo necessário para que o sistema alcance o setpoint, mas pode levar a uma resposta mais lenta ou causar oscilações se for muito alto.

Parametro Derivativo:

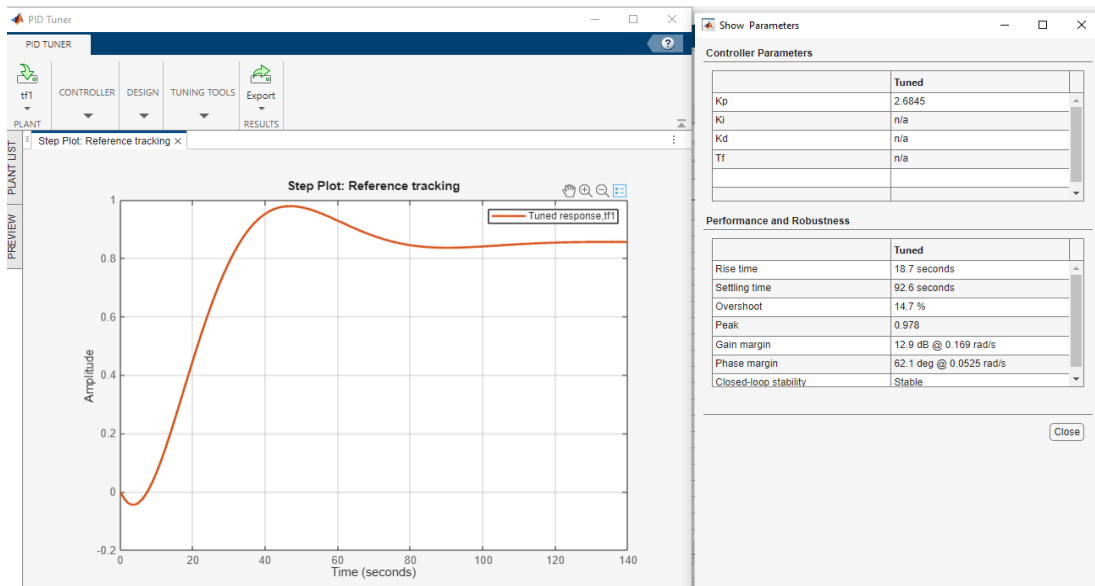
- Efeito na variável manipulada: O controle derivativo reage à taxa de mudança do erro. Ele antecipa futuras tendências de erro com base na velocidade com que o erro está mudando.
- Efeito na variável controlada: Um aumento no ganho derivativo (K_d) tende a suavizar a resposta do sistema, reduzindo o overshoot (excesso sobre o setpoint) e melhorando a estabilidade. No entanto, se o ganho derivativo for muito alto, pode gerar instabilidade no processo.

Para todos os projetos de controladores, 110 g do café “Catuaí Vermelho” foram utilizados, sendo do mesmo lote do café utilizado para a modelagem da função transferência.

4.2.11. Projeto de um controlador proporcional (P)

Os dados da função transferência foram inseridos, e como resposta, apenas um ganho proporcional foi calculado, cujo valor é mostrado na Figura 38 juntamente com a resposta do sistema controlado por esse ganho e parâmetros de performance.

Figura 38: Resultados obtidos para o projeto do controlador proporcional.



Fonte: Autoria Própria.

Ao implementar o ganho proporcional no Artisan, obteve-se o gráfico da Figura 39. A linha verde clara é o *setpoint*, a linha verde escura é a temperatura registrada, a linha verde pontilhada é a potência entregue e a linha azul é a taxa de crescimento da temperatura.

Figura 39: Resultado obtido no Artisan para o controlador proporcional.



Fonte: Autoria Própria.

Utilizando apenas o controle proporcional, a temperatura do grão de café se comportou como simulado pelo MatLab, porém, com diferenças em relação ao perfil torra pré-estabelecido, principalmente na duração da torra.

Os dados de *setpoint* e temperatura lida pelo termopar foram exportados para uma planilha e o índice IAE foi calculado, e os resultados são apresentados na Tabela 1 e graficamente na Figura 40.

Tabela 1: Índice IAE calculado para o resultado com o controlador proporcional.

Tempo Programado	Tempo realizado	Erro tempo (%)	IAE (IAEseca + IAEpiro)	MT
12:50 (770 s)	11:21 (681 s)	11,5 %	4255,68	6,35

Fonte: Autoria Própria.

Foi notória a diferença de tempo de torra entre o perfil de fundo (12:50) e a torra realizada (11:21). Visto isso, a diferença entre a torra e o perfil configurado inviabiliza um controle de temperatura utilizando apenas o ganho proporcional. O erro em regime permanente pode ser verificado na figura 40.

Figura 40: Curvas de setpoint, medida, e índice IAE para o resultado com controlador proporcional.

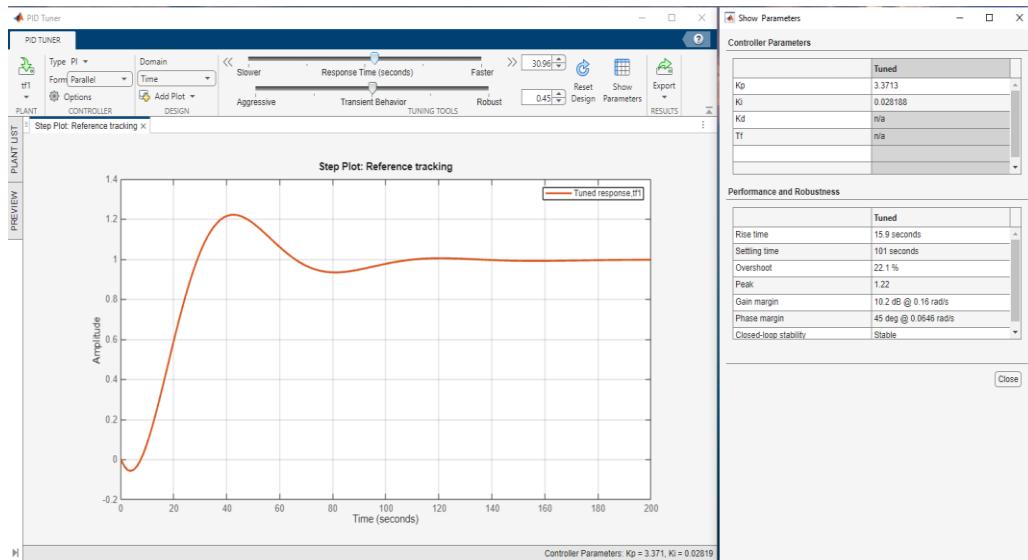


Fonte: Autoria Própria.

4.2.12. Projeto de um controlador proporcional integrativo (PI)

Posteriormente, um controlador proporcional integrativo foi projetado utilizando o PID Tuning. Os resultados são apresentados na Figura 41.

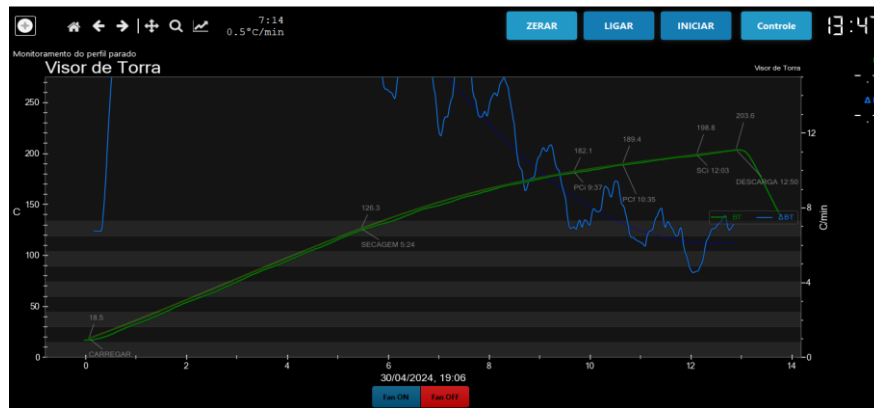
Figura 41: Resultados obtidos para o projeto do controlador proporcional integrativo.



Fonte: Autoria Própria.

Ao implementar o controlador proporcional-integrativo no Artisan, foi obtido o resultado apresentado na Figura 42.

Figura 42: Resultado obtido no Artisan para o controlador proporcional-integrativo.



Fonte: Autoria Própria.

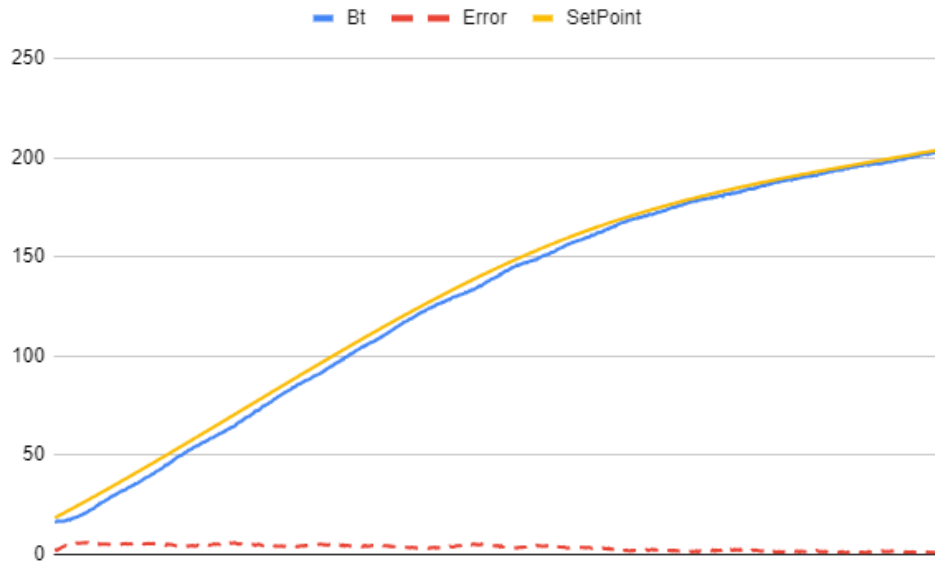
Em comparação com o controlador proporcional, o controle PI se mostrou mais aderente ao *setpoint*, como mostram também os resultados do índice IAE apresentados na Tabela 2 e na Figura 43.

Tabela 2: Índice IAE calculado para o resultado com o controlador proporcional-integrativo.

Tempo Programado	Tempo realizado	Erro tempo (%)	IAE (IAEseca + IAEpiro)	MT
12:50 (770 s)	12:55 (775 s)	0,6%	1088,72	1,49

Fonte: Autoria Própria.

Figura 43: Curvas de *setpoint*, medida, e índice IAE para o resultado com controlador proporcional-integrativo.



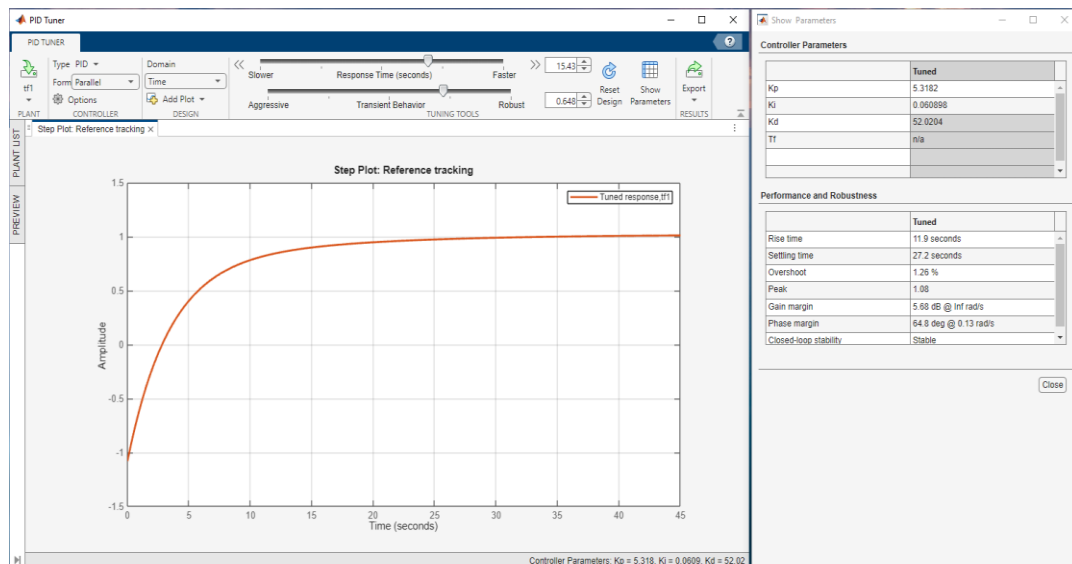
Fonte: Autoria Própria.

O controle PI implementado se mostrou estável, com diminuição do erro de regime permanente durante o processo em comparação ao controlador proporcional. Porém, para explorar ainda mais as ferramentas de controle, um controlador PID foi projetado com o intuito de diminuir ainda mais o erro acumulado e também para tornar o processo mais robusto.

4.2.13. Projeto de um controlador proporcional integrativo derivativo (PID)

Da mesma forma dos anteriores, o controlador PID foi projetado utilizando o toolbox PID tuner do matlab, com os resultados mostrados na Figura 44.

Figura 44: Resultados obtidos para o projeto do controlador PID.



Fonte: Autoria Própria.

Implementando o controlador PID no Artisan, obteve-se o resultado mostrado na Figura 45.

Figura 45: Resultado obtido no Artisan para o controlador PID.



Fonte: Autoria Própria.

A torra utilizando os ganhos PID devidamente configurados refletiram em uma torra estável e com erro mínimo e métrica da torra (MT), como mostram os resultados da Tabela 3 e as curvas da Figura 46.

Tabela 3: Índice IAE calculado para o resultado com o controlador PID.

Tempo Programado	Tempo realizado	Erro Tempo (%)	IAE (IAEseca + IAEpiro)	MT
12:50 (770 s)	12:51 (771 s)	0,01%	365,61	0,475

Fonte: Autoria Própria.

Figura 46: Curvas de *setpoint*, medida, e erro para o resultado com controlador PID.



Fonte: Autoria Própria.

Ao analisar a figura 46, é possível verificar a atuação dos parâmetros Integrais e Derivativos. A temperatura atingiu o setpoint mais rapidamente e as variações de temperatura durante o processo foram reduzidas em comparação aos outros controladores.

É válido acrescentar que umidade, densidade e tamanho do grão modificam a termodinâmica da torra. Por esse motivo, dependendo das características do café cru, o controle da torra pode se comportar de maneiras distintas.

4.3. Compilado de resultados dos testes dos controladores

A Tabela 4 apresenta um compilado dos resultados dos testes dos três controladores aplicados ao torrador. Fica evidente a redução do erro, do valor do IEA e da métrica de torra ao aplicar um controlador com parcelas integrativas e derivativas ao invés de um controlador puramente proporcional. Importante ressaltar também que em nenhum dos testes realizados observou-se saturação do sinal de controle, ou seja, este sinal se manteve dentro da margem especificada nos requisitos definidos na seção 1.3.

Tabela 4: Classificação da Métrica da torra.

Controlador	Erro tempo (%)	IAE (IAEseca + IAEpiro)	MT
P	11,5 %	4255,68	6,35
PI	0,6%	1088,72	1,49
PID	0,01%	365,61	0,475

Fonte: Autoria Própria.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Como forma de analisar a eficiência do sistema de controle, a MT (Métrica da torra) foi separada na classificação apresentada na Tabela 5, levando em consideração os resultados obtidos durante o projeto dos controladores.

Tabela 5: Classificação da Métrica da torra.

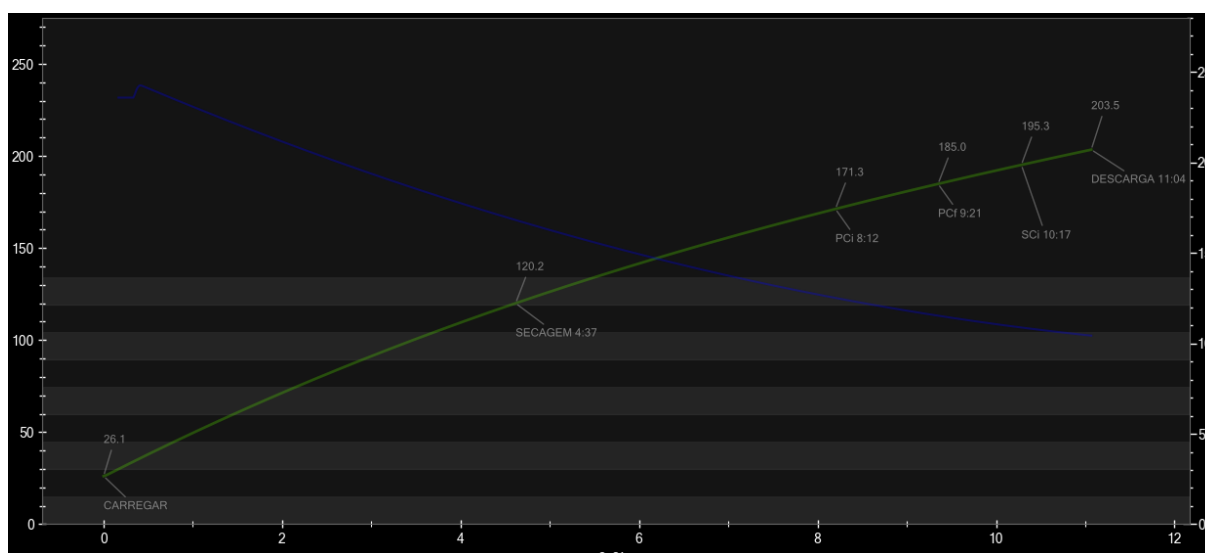
Excelente	Boa	Ruim	Inaceitável
$MT \leq 1$	$1 < MT \leq 2$	$2 < MT \leq 3$	$MT > 3$

Fonte: Autoria Própria.

5.1. Repetibilidade do torrador

Para validar a repetibilidade do torrador, um lote diferente de café foi torrado 5 vezes, utilizando o perfil de torra mostrado na Figura 47 como referência:

Figura 47: Perfil de torra adotado para validar a repetibilidade do torrador.



Fonte: Autoria Própria.

A temperatura de descarga é de 203.5 °C no tempo de 11:04s (664s), caracterizando uma torra estágio City Plus, com duração intermediária.

Segue as características do café, do qual uma amostra é apresentada na Figura 48:

- Variedade: Arara
- Peneira: Moca 12 acima
- Densidade: 67 kg/m³
- Peso: 110 g

Figura 48: Uma amostra de café utilizada nos testes de repetibilidade do torrador.



Fonte: Autoria Própria.

Os dados de temperatura x tempo de cada uma das torras foram exportadas para uma planilha e plotadas juntas no gráfico da Figura 49. A métrica da torra (MT) foi calculada para cada uma das torras.

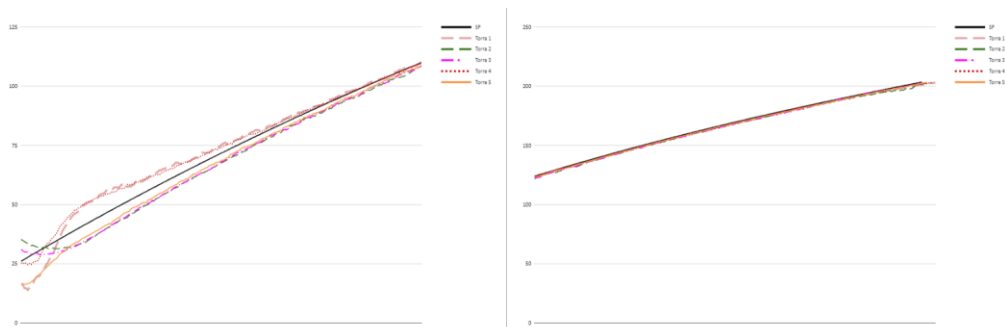
Figura 49: Curvas temperatura x tempo medidas para as 5 torras no teste de repetibilidade.



Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 50 são apresentados trechos em destaque do comportamento de $BT < 150^{\circ}C$ e $BT > 150^{\circ}C$.

Figura 50: Trechos em destaque nas curvas temperatura x tempo medidas para as 5 torras no teste de repetibilidade.



Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 6 apresenta o resultado dos erros e métrica da torra, e a Figura 51 apresenta imagens das 5 amostras após as torras.

Tabela 6: Índices IAE e métrica da torra obtidos para as 5 torras do teste de repetibilidade.

	Tempo Programado	Tempo Realizado	Diferença tempo (%)	IAEtorra (IAEseca + IAEpiro)	MT
Torra 1	664 s	681 s	0,025 %	203,78	0,78
Torra 2	664 s	671 s	0,010 %	304,04	1,01
Torra 3	664 s	665 s	0,001 %	219,97	0,84
Torra 4	664 s	678 s	0,021 %	182,58	0,73
Torra 5	664 s	668 s	0,006 %	180,747	0,65

Fonte: Autoria Própria.

Figura 51: Amostras após as torras para o mesmo grão e mesma torra.



Fonte: Autoria Própria.

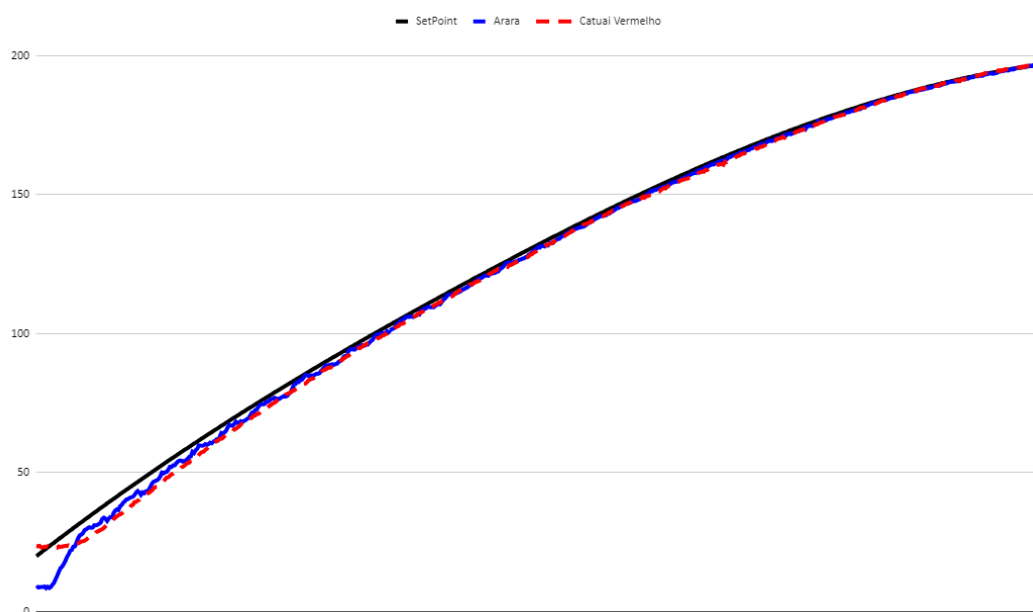
Das 5 torras realizadas, 4 obtiveram resultado Excelente e uma muito boa segundo a métrica definida na Tabela 4. Visto isso, é notória a repetibilidade da torra quando utilizado o mesmo grão.

5.2. Robustez do torrador

Para verificar a robustez do sistema, 3 curvas de torra foram desenvolvidas. Uma torra do tipo City (190°C-200°C), uma do tipo City Plus (200°C - 210°C) e uma full City (210°C - 220°C). Para cada torra, dois tipos de grãos foram utilizados, sendo eles o Catuai Vermelho e o Arara. Toda torra foi feita utilizando 110 gramas de café cru.

- Torra City (Clara): Foi programada para atingir 197°C em 627 s. Os resultados são apresentados nas Figura 52 e na Tabela 7.

Figura 52: Setpoint e resultado temperatura x tempo da curva de torra clara para dois lotes de café.



Fonte: Autoria Própria.

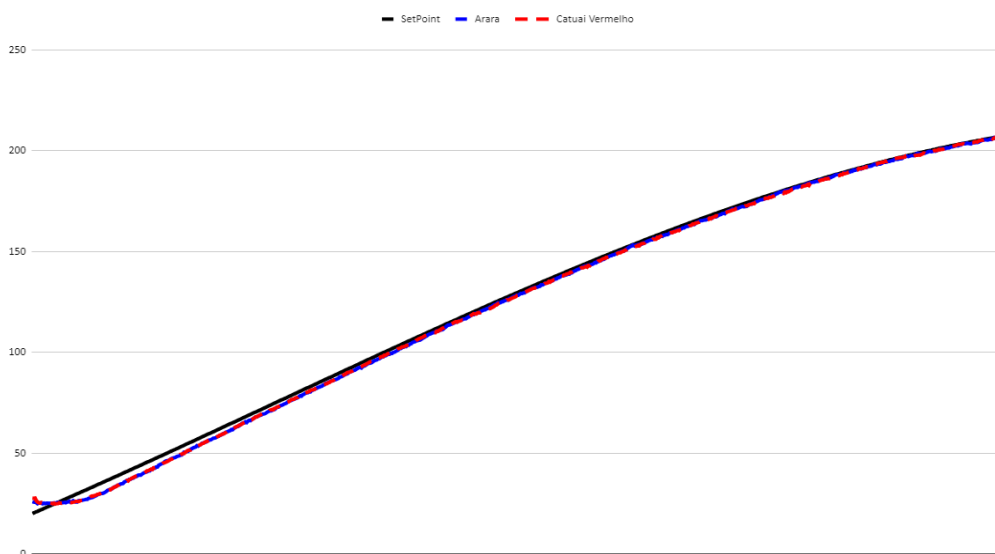
Tabela 7: Índices IAE e métrica da torra obtidos para as torras claras de diferentes lotes.

TORRA CITY (CLARA)	ARARA	CATUAÍ
IAE Seca	333,9	378,216
IAEPiro	128,184	176,204
IAETorra	462,084	554,42
Tempo programado	627	627
Tempo de torra	622	624
Erro Tempo (%)	1,007	1,004
MIAE	0,736	0,884
MT	0,742	0,888

Fonte: Autoria Própria.

- Torra City Plus (Média): Foi programada para atingir 207°C em 759 s. Os resultados são apresentados nas Figura 53 e na Tabela 8.

Figura 53: Setpoint e resultado temperatura x tempo da curva de torra média para dois lotes de café.



Fonte: Autoria Própria.

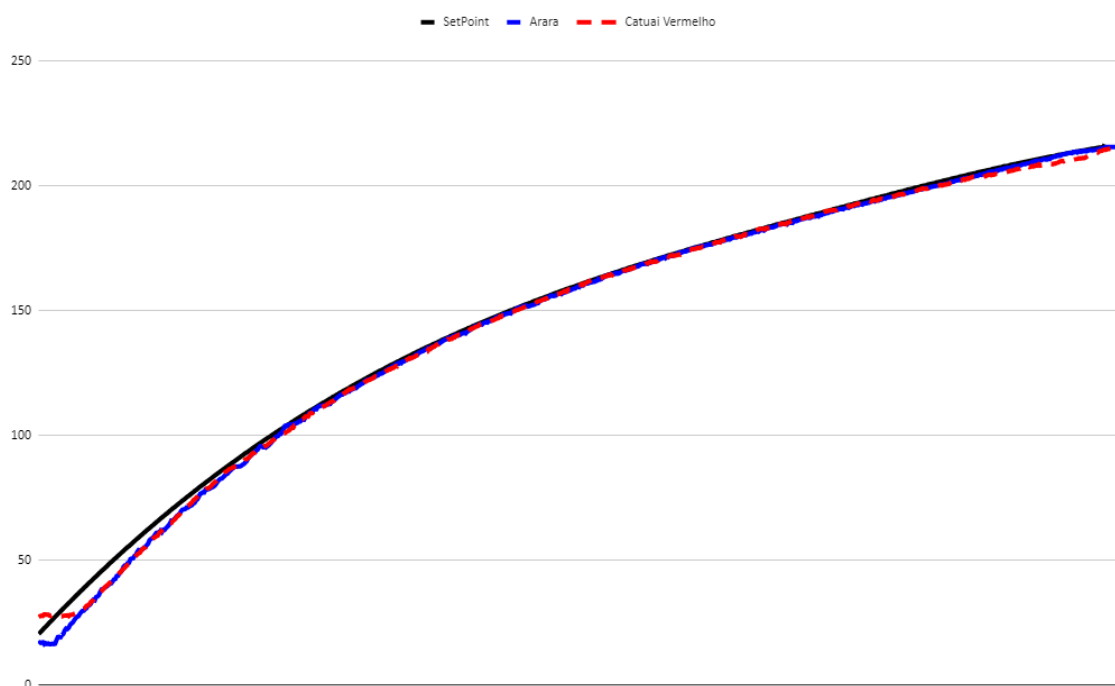
Tabela 8: Índices IAE e métrica da torra obtidos para as torras médias de diferentes lotes.

TORRA (City Plus) MÉDIA	ARARA	CATUAÍ
IAE Seca	346,899	341,211
IAEPiro	169,729	194,481
IAETorra	516,628	535,692
Tempo programado	759	759
Tempo de torra	760	761
Erro Tempo (%)	1,005	1,003
MIAE	0,676	0,701
MT	0,679	0,703

Fonte: Autoria Própria.

- Torra Full City (Escura): Foi programada para atingir 216°C em 780 s. Os resultados são apresentados nas Figura 54 e na Tabela 9.

Figura 54: Setpoint e resultado temperatura x tempo da curva de torra escura para dois lotes de café.



Fonte: Autoria Própria.

Tabela 9: Índices IAE e métrica da torra obtidos para as torras escuras de diferentes lotes.

TORRA ESCURA (Full City)	ARARA	CATUAÍ
IAE Seca	343,323	311,409
IAEPiro	216,482	299,39
IAETorra	559,805	610,799
Tempo programado	780	780
Tempo de torra	782	795
Erro Tempo (%)	1,001	1,019
MIAE	0,717	0,783
MT	0,719	0,798

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 55 e 56 apresentam imagens das amostras após as torras.

Figura 55: Amostra das torras do Catuaí.



Fonte: Autoria Própria.

Figura 56: Amostra das torras do Arara.



Fonte: Autoria Própria.

5.3. Compilado dos resultados

A Tabela 10 apresenta as métricas de torra para as cinco torras idênticas realizadas com o café Catuaí Vermelho:

Tabela 10: Compilado métricas das torras obtidas para as torras de repetibilidade.

MT torra 1	MT torra 2	MT torra 3	MT torra 4	MT torra 5
0,78	1,01	0,84	0,73	0,65

Fonte: Autoria Própria.

Já, para as torras claras, médias e escuras com o Arara e Catuaí Vermelho, as métricas de torra são apresentadas na Tabela 11:

Tabela 11: Compilado métricas das torras obtidas para as torras nos testes de robustez com diferentes lotes.

	MT Torra Clara	MT Torra Média	MT Torra Escura
Arara	0,736	0,679	0,719
Catuaí	0,884	0,793	0,798

Fonte: Autoria Própria.

Verifica-se que, de acordo com o critério de avaliação apresentado na Tabela 5, obteve-se uma torra excelente em todos os testes, exceto na torra 2 do teste de repetibilidade.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. Conclusão

Diversos testes foram realizados para estressar o equipamento e o sistema de controle e também para avaliar a repetibilidade e a robustez do controle de torra.

Devido a falta de literatura a respeito da avaliação de controladores aplicados em torra de café, a métrica de torra (MT), foi desenvolvida neste trabalho. Embasada na metodologia IAE, o cálculo da métrica utilizou o tempo programado para a torra, o tempo real da torra e as características químicas do grão durante a secagem e caramelização. Torras excelentes apresentam valor de $MT \leq 1$; torras boas apresentam $1 < MT \leq 2$, torras ruins $2 < MT \leq 3$ e torras inaceitáveis $MT > 3$.

Para avaliar a repetibilidade, 5 amostras de um mesmo café foram torradas usando a mesma curva de torra como referência. Das 5 torras, 4 apresentaram resultado Excelente e 1 resultado bom.

Para avaliar a robustez, 3 diferentes curvas de torras foram desenvolvidas, sendo uma torra clara, uma média e uma escura. 2 lotes de café distintos foram torrados utilizando cada uma das curvas, totalizando em 6 torras abrangendo os estágios city, city+ e full city. As 6 torras obtiveram resultado excelente segundo a métrica definida.

Por fim, com base nos resultados dos testes, conclui-se que o torrador de café desenvolvido neste trabalho atendeu aos requisitos definidos na seção 1.3.

6.2. Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros, três pontos podem ser abordados com atenção aos detalhes, sendo:

- Correlação entre o resultado da métrica da torra e o sensorial do café: Realizar, juntamente com profissionais “*Q-Graders*” qualificados, estudos correlacionando o resultado da métrica da torra com a análise sensorial do café, desenvolvendo uma metodologia criteriosa sobre a relação da qualidade do controle com o resultado sensorial do café torrado.
- Estudos sobre a eficiência energética: Estudar mecanismos para mensurar e reduzir a quantidade de energia necessária para realizar a torra de um lote de café.
- Estudos de mercado: Entender quais são os maiores desafios para desenvolver um torrador de café controlado que atenda um certo público alvo.

Além dos estudos citados acima, três melhorias técnicas foram mapeadas para futuras implementações:

- Substituição do TRIAC por um sistema SSR que realize a comutação no ponto do cruzamento por zero da onda senoidal: Essa troca de equipamento retira a necessidade de cada semiciclo ser comutado individualmente, reduzindo o ruído na rede e aumentando a eficiência do controlador por causar menor dissipação de energia térmica durante o chaveamento. Uma alternativa a esta substituição seria utilizar uma ponte H transistorizada, através da qual uma tensão senoidal com amplitude variável seria fornecida ao resistor.
- Retorno de ar quente para o elemento aquecedor: Essa modificação reduz a potência necessária para aquecer o ar, já que ele retornará da câmara de torrefação com uma temperatura superior ao ar em temperatura ambiente. Tal modificação tem impacto direto na eficiência energética do torrador.
- Algoritmo PID Adaptativo: Implementar uma lógica que permita que o controle PID apresente uma resposta com menor tempo de acomodação e/ou livre de sobressinal dependendo do erro instantâneo entre a temperatura medida e a da curva de torra. Tal modificação melhoraria o resultado das métricas de torra.

REFERÊNCIAS

About Artisan Notable Features. Disponível em: <<https://artisan-scope.org/about/#notable-features>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

BAGGENSTOSS, J. et al. Coffee Roasting and Aroma Formation: Application of Different Time–Temperature Conditions. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 14, p. 5836–5846, jul. 2008.

BASILE, M.; I. KIKIC. **A Lumped Specific Heat Capacity Approach for Predicting the Non-stationary Thermal Profile of Coffee During Roasting.** v. 23, n. 2, p. 167–177, 30 jun. 2009.

BROWN, H. **Como Usar Curvas de Torra para Guiar a Torra de Café.** Disponível em: <<https://perfectdailygrind.com/pt/2020/08/20/como-usar-curvas-de-torra-cropster/>>. Acesso em: 9 jun. 2024

CAMPO-CEBALLOS, D. A. et al. Analysis of temperature control effect in fluidized bed coffee roaster. **Visión electrónica**, v. 14, n. 2, p. 255–263, 22 jul. 2020.

COFFEE, F. S. R. **Fluid Bed Coffee Roasting.** Disponível em: <<https://fluidcoffee.ca/pages/an-introduction-to-fluid-bed-coffee-roasting/>>. Acesso em: 12 jul. 2024.

Conab - Produção de café cresce 8,2% em 2023 e chega a 55,1 milhões de sacas. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5323-producao-de-cafe-cresce-8-2-em-2023-e-chega-a-55-1-milhoes-de-sacas>>. Acesso em: 1 jun. 2024

DEBONA, Danieli Grancieri; OLIVEIRA, Emanuele Catarina da Silva; TEN CATEN, Carla Schwengber; GUARÇONI, Rogério Carvalho; MOREIRA, Taís Rizzo; PEREIRA, Lucas Louzada; MORELI, Aldemar Polonini. **Sensory analysis and mid-infrared spectroscopy for discriminating roasted specialty coffees.** *Coffee Science - ISSN 1984-3909*, v. 16, p. e161878–e161878, 2021. DOI: 10.25186/V16I.1878. Disponível em: <http://www.coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/1878>.

EQUIPE DESTERRO ELETRICIDADE. O que é corrente e tensão alternadas? - Eletricista Florianópolis | Desterro Eletricidade. Disponível em: <<https://www.desterroeletricidade.com.br/blog/eletrica/o-que-e-corrente-e-tensao-alternadas/>>. Acesso em: 1 ago. 2024.

ESP32 NodeMCU Iot com WiFi e Bluetooth - 30 Pinos. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/nodemcu/esp32-nodemcu-iot-com-wifi-e-bluetooth-30-pinos-5147.html?search_query=ESP32&results=166>. Acesso em: 19 jun. 2024.

Fonte Chaveada 24V 10A 240W 127V/220VAC - S240-24. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/fonte-colmeia/fonte-chaveada-colmeia-24v-10a-240w-real-9a-127v220vac-s240-24-8405.html?search_query=fONTE+24V+10A&results=2>. Acesso em: 17 jun. 2024.

FRANCA, A. S. et al. A preliminary evaluation of the effect of processing temperature on coffee roasting degree assessment. **Journal of Food Engineering**, v. 92, n. 3, p. 345–352, jun. 2009.

FREITAS, J. **OTIMIZAÇÃO DO CONTROLE AUTOMÁTICO DE UM TORRADOR DE CAFÉ.** Pós-Graduação Lato Sensu—IFES: [s.n.].

HART, D. W. **Introduction to power electronics.** New York, N.Y.: McGraw Hill, 2011.

Kit Termopar Tipo K 0 a 800°C + Módulo de Leitura Max6675. Disponível em: <https://www.usinainfo.com.br/sensor-de-temperatura/kit-termopar-tipo-k-0-a-800c-modulo-de-leitura-max6675-3889.html?search_query=termopar&results=35>. Acesso em: 17 jun. 2024.

map() - Documentação de Referência do Arduino. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/reference/pt/language/functions/math/map/>>. Acesso em: 17 jun. 2024

MELO, W. A Importância da Informação Sobre do Grau de Torra do Café e sua Influência nas Características Organolépticas da Bebida. **Embrapa**, 1 jan. 2004.

Módulo Dimmer para Arduino e ESP32 MC-8A com sinal Zero Cross 220V. Disponível em: <<https://www.usinainfo.com.br/dimmer-arduino/modulo-dimmer-para-arduino-pic-mc-8a-com-sinal-zero-cross-220v>>. Acesso em: 17 jun. 2024.

MUINHOS, R. **Conhecimento | Buenavista Café – Blog.** Disponível em: <<https://buenavistacafe.com.br/blog/category/conhecimento/>>. Acesso em: 13 jun. 2024

Pipoqueira Satellite A-PC131 1200W. Disponível em: <<https://www.americanas.com.br/produto/41802276/pipoqueira-eletrica-satellite-a-pc131-de-1200w-para-ate-60-gr-110v-preta>>. Acesso em: 7 jun. 2024

Produção Agropecuária | IBGE. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/explica/producao-agropecuaria/>>. Acesso em: 1 jun. 2024

SCA. **SCAA CUPPING PROTOCOLS.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://coffeetraveler.net/wp-content/files/901-SCAA_CuppingProtocols_TSC_DocV_RevDec08_Portuguese.pdf>.

SILVA, J. R. Otimização do processo de torração do café pelo monitoramento de parâmetros e propriedades físicas e sensoriais. **www.sbicafe.ufv.br**, 28 fev. 2008.

TECHNOLABCREATION. **AC Light Dimmer Using TRIAC & ESP32.** Disponível em: <<https://www.technolabcreation.com/ac-light-dimmer-using-triac-esp32/>>. Acesso em: 10 jun. 2024