



LUCAS DUARTE AUGUSTO
VINÍCIUS RODRIGUES DOS SANTOS

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E
PROPOSTA DE UM SISTEMA DE CONTROLE
DE UM MOEDOR PARA UMA CAFETEIRA
INTELIGENTE

2ª edição revisada e atualizada

LAVRAS – MG

2019

LUCAS DUARTE AUGUSTO
VINÍCIUS RODRIGUES DOS SANTOS

ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E PROPOSTA DE UM
SISTEMA DE CONTROLE DE UM MOEDOR PARA UMA CAFETEIRA
INTELIGENTE

2^a edição revisada e atualizada

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências de conclusão do curso de Engenharia
de controle e automação na modalidade de
Concepção Básica, para a obtenção do título de
Bacharel.

Prof. DSc. Wander Gustavo Rocha Vieira
Orientador

Prof. DSc. Francisco Scinocca
Coorientador

LAVRAS – MG
2019

**LUCAS DUARTE AUGUSTO
VINÍCIUS RODRIGUES DOS SANTOS**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA E PROPOSTA DE UM
SISTEMA DE CONTROLE DE UM MOEDOR PARA UMA CAFETEIRA
INTELIGENTE
ECONOMIC FEASIBILITY ANALYSIS AND PROPOSAL OF A
GRINDER CONTROL SYSTEM FOR AN INTELLIGENT COFFEE
MACHINE**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Universidade Federal de Lavras, como parte das
exigências de conclusão do curso de Engenharia de
controle e automação na modalidade de Concepção
Básica, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em Defesa em 29 de Novembro de 2019.

Bacharel Fidelis Marcio Santos Rabelo de Melo Junior UFV

Prof. DSc. Wander Gustavo Rocha Vieira
Orientador

Prof. DSc. Francisco Scinocca
Co-Orientador

**LAVRAS – MG
2019**

*Dedicamos este trabalho a nossos amigos que sempre estiveram presentes, às
nossas famílias pelo apoio contínuo, assim como a todos os envolvidos nessa
jornada, damos graças a Deus por termos chegado até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, a minha família pelo suporte, e a todos aos meus amigos que me carregaram em seus ombros até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus. Seu fôlego em mim me deu sustento e coragem para questionar minha realidade e propor um novo mundo de possibilidades.

Aos meus pais, Maria e Darcí, por terem depositado sua crença em mim, e ter me dado apoio e suporte por todo esses anos. Não teria chegado aqui, sem vocês ao meu lado.

A minha amada namorada, que de forma especial e pacientemente me deu forças e coragem, me apoiando em momentos de dificuldades. Sua presença significou segurança que eu não estava sozinho nessa caminhada.

Aos meus amigos, Douglas Cordeiro, Douglas Roberto, Gabriel Lucas, Lucas Duarte, Paulo Henrique e Vitória Casati. Pelas horas e horas e mais horas de estudo, amizade e companheirismo. De forma alguma teria chegado tão longe sem todo o ensinamento e paciência de vocês.

*Alguns homens veem as coisas como são, e dizem 'Por quê?' Eu sonho com as coisas que nunca foram e digo 'Por que não?'.
(George Bernard Shaw)*

RESUMO

O presente trabalho estuda a análise de viabilidade técnica e econômica de um sistema de controle de granulometria de uma máquina de café expresso do tipo automatizada. O projeto visa uma melhoria na qualidade do produto final, graças ao controle de velocidade de moagem e da granulometria do café pós-moído. Durante o processo, a velocidade de moagem pode alterar propriedades físicas e químicas da bebida, ainda que pequena, há uma influência diretamente na qualidade do produto. Um outro fator que altera o sabor e a qualidade do produto final é o tamanho do grão pós-moído. A infusão de água em contato com as moléculas do café dá início ao processo de extração que, inicialmente, extrai os sabores mais intensos como o azedo e ácido, posteriormente, tais compostos intensos são suavizados e então são extraídos os sabores mais calmos e suaves. Portanto, a granulometria influencia na maneira e na velocidade da extração de tais aromas e sabores.

Palavras-chave: Controle. Granulometria. Café. Engenharia. Automação

ABSTRACT

The present work has as the study and analysis of the technical and economical viability of a granulometry control system of an automated espresso machine, aiming at an improvement in the quality of the final product, thanks to the grinding speed control and of the post-ground coffee granulometry. During the process, the grinding speed can change the physical and chemical properties of the beverage, although small, there is a direct influence on the quality of the product. Another factor that changes the flavor and quality of the final product is the size of the post-ground grain, because the infusion of water in contact with the coffee molecules, initiates the extraction process that, initially, extracts the flavors more intense like sour and acid, and posteriorly, such aggressive compounds are softened and then the calmer and softer flavors are extracted. Therefore, granulometry influences the manner and rate of extraction of such flavors and tastes.

Keywords: Control. Granulometry. Coffe. Engineering. Automation.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1.1 – Esquemático Geral do Moedor | 15 |
| Figura 4.2 – Tempo de <i>Payback</i> das alternativas | 31 |
| Figura 4.3 – Faixa de utilização de café nas duas opções | 32 |
| Figura 4.1 – VPL analisada em 5 anos | 33 |
| Figura 5.1 – Sinal PWM | 34 |
| Figura 5.2 – Torque no motor Unipolar Vs Bipolar | 35 |
| Figura 5.3 – Ligação elétrica do motor Unipolar vs Bipolar. | 36 |
| Figura 5.4 – Configuração de meia ponte de <i>Wheatstone</i> | 38 |
| Figura 5.5 – Esquemático do circuito eletrônico | 40 |
| Figura 5.6 – Controlador ESP32 | 42 |
| Figura 5.7 – Esquemático do motor de passo NEMA 23 | 43 |
| Figura 5.8 – Esquemático para motor de passo 28BYJ-48 | 44 |
| Figura 5.9 – Motor escovado Old Style | 45 |
| Figura 5.10 – Esquemático da balança | 46 |
| Figura 5.11 – Controle do motor de passo unipolar | 48 |
| Figura 5.12 – Controle do motor de passo bipolar | 50 |
| Figura 5.13 – Controle do motor escovado | 51 |
| Figura 5.14 – Leitura de peso da balança | 52 |
| Figura 5.15 – Esquemático Geral do Moedor | 53 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 – Características dos motores escovados. | 18 |
| Tabela 3.2 – Características dos motores de passo. | 19 |
| Tabela 3.3 – Características das células de carga. | 19 |
| Tabela 3.4 – Características dos microcontroladores. | 19 |
| Tabela 3.5 – Matriz de decisão do motor escovado da concepção 1. | 20 |
| Tabela 3.6 – Matriz de decisão dos motores de passo da concepção 1. | 21 |
| Tabela 3.7 – Matriz de decisão das células de carga da concepção 1. | 21 |
| Tabela 3.8 – Matriz de decisão do microcontrolador da concepção 1. | 21 |
| Tabela 3.9 – Matriz de decisão do motor escovado da concepção 2. | 22 |
| Tabela 3.10 – Matriz de decisão dos motores de passo da concepção 2. | 22 |
| Tabela 3.11 – Matriz de decisão das células de carga da concepção 2. | 23 |
| Tabela 3.12 – Matriz de decisão do microcontrolador da concepção 2. | 23 |
| Tabela 3.13 – Matriz de decisão do motor escovado da concepção 3. | 24 |
| Tabela 3.14 – Matriz de decisão dos motores de passo da concepção 3. | 24 |
| Tabela 3.15 – Matriz de decisão das células de carga da concepção 3. | 24 |
| Tabela 3.16 – Matriz de decisão do microcontrolador da concepção 3. | 25 |
| Tabela 5.1 – Tabela Verdade motor Bipolar. | 36 |
| Tabela 5.2 – Tabela Verdade motor Unipolar. | 37 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

| | |
|---------|---|
| IOT | <i>Internet of things</i> |
| CC | <i>Corrente contínua</i> |
| PWM | <i>Pulse width modulation</i> |
| VPL | <i>Valor presente líquido</i> |
| QtdeAno | <i>Quantidade de xícaras de café por ano</i> |
| N_x | <i>Numero de xícaras consumidas em um ano</i> |
| A_l | <i>Alcance esperado</i> |
| P_l | <i>Percentual esperado</i> |
| x | <i>Característica do componente</i> |
| x_i | <i>Característica de todos os componentes do mesmo tipo</i> |
| p | <i>Peso da característica</i> |
| TIR | <i>Taxa Interna de retorno</i> |
| FC0 | <i>Fluxo de caixa inicial</i> |
| FCj | <i>Fluxo de caixa previsto para cada intervalo de tempo</i> |
| i | <i>Taxa de desconto</i> |
| n | <i>Período de tempo</i> |
| J | <i>Juros desejados</i> |
| I_v | <i>Investimento do projeto</i> |
| D | <i>Depreciação</i> |
| O | <i>Operação</i> |
| M | <i>Manutenção</i> |
| I_s | <i>Insumos para a bebida</i> |
| P_r | <i>Preço de custo da bebida</i> |
| R_s | <i>Valor residual</i> |
| TMA | <i>taxa mínima de atratividades</i> |
| PB | <i>PayBack</i> |

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 13 |
| 1.1 | Descrição do problema | 13 |
| 1.2 | Objetivos do projeto | 14 |
| 1.3 | Abrangências e limitações | 14 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 16 |
| 2.1 | Granulometria | 16 |
| 2.2 | Velocidade de moagem | 16 |
| 3 | DEFINIÇÃO DO PROBLEMA | 18 |
| 3.1 | Estudo de viabilidade preliminar | 18 |
| 3.2 | Soluções propostas | 20 |
| 3.2.1 | Concepção 1 | 20 |
| 3.2.2 | Concepção 2 | 22 |
| 3.2.3 | Concepção 3 | 23 |
| 3.2.4 | Definição da solução com base na Matriz de Decisão | 25 |
| 4 | Análise econômica | 26 |
| 4.1 | Levantamento dos dados | 26 |
| 4.2 | Ferramentas de viabilidade econômica | 28 |
| 4.2.1 | VPL | 28 |
| 4.2.2 | TIR | 29 |
| 4.2.3 | Payback | 30 |
| 4.3 | Análise e decisão | 30 |
| 5 | Implementação do sistema | 34 |
| 5.1 | Estudo dos principais componentes | 34 |
| 5.1.1 | PWM | 34 |
| 5.1.2 | Motor de passo | 34 |
| 5.1.3 | Medição de peso | 37 |
| 5.2 | Esquemático eletrônico | 40 |

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 5.2.1 | Controlador | 41 |
| 5.2.2 | Motor de passo para moagem | 42 |
| 5.2.3 | Motor de passo para cilindro | 43 |
| 5.2.4 | Motor escovado | 44 |
| 5.2.5 | Célula de carga | 45 |
| 5.3 | Software de controle | 46 |
| 5.3.1 | Motor de passo unipolar | 47 |
| 5.3.2 | Motor de passo bipolar | 48 |
| 5.3.3 | Motor escovado | 51 |
| 5.3.4 | Balança | 51 |
| 5.4 | Esquemático mecânico | 52 |
| 6 | Considerações Finais e trabalhos futuros | 55 |
| 6.1 | Considerações Finais | 55 |
| 6.2 | Trabalhos futuros | 55 |
| | REFERÊNCIAS | 57 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Descrição do problema

O presente trabalho estuda a análise de viabilidade técnica e econômica de uma máquina de café expresso do tipo automatizada, visando uma melhoria na qualidade do produto final. Graças ao controle de velocidade de moagem e da granulometria do café pós-moído, é possível controlar a qualidade final da bebida. Para que se tenha uma garantia de que a máquina será um bem durável, é necessário tomar algumas precauções que vão desde tarefas simples, até tarefas mais complexas que devem ser realizadas com orientação de profissionais (TAKECOFFEE, 2019). Tais precauções podem garantir à máquina maior confiabilidade, uma vez que um dos problemas das atuais máquinas de café que atuam no mercado de larga escala, são seus altos custos de operação e manutenção.

A presente proposta tem foco na redução destes custos de manutenção, através da criação de modelos robustos, que suportam mais a carga de trabalho no dia a dia do equipamento, com o correto dimensionamento de materiais. Sabendo, que para se obter uma alta taxa de aceitação no mercado, um equipamento deve possuir elevado padrão de qualidade, associado a um baixo custo.

Sabe-se que a bebida do café tem boa receptividade no mercado, por isso seus grãos são comercializados em todo mundo e o seu cultivo é de grande importância para a economia mundial. Segundo (SANTOS,), entre o período de 2017-2018, sua produção mundial chegou a 59 milhões de sacas.

Durante o processo de produção do café, existem várias etapas intermediárias, as quais interferem no sabor final da bebida. Esse projeto tem como objetivo viabilizar o controle de alguns processos intermediários referentes à moagem, de forma a garantir uma baixa variação na qualidade final do produto.

1.2 Objetivos do projeto

O presente trabalho tem por objetivo desenvolver melhorias das técnicas para o processo de moagem do grão café em uma cafeteira inteligente. Como objetivos específicos, estão descritos:

- Estudo sobre as técnicas de moagem dos grãos, assim como a relevância do tamanho da granulometria do café depois de moído;
- Proposta de um sistema de controle para um moedor;
- Análise de viabilidade técnica e econômica do projeto;
- Utilização de desenhos esquemáticos que poderão servir como base para a implementação de um protótipo no futuro;
- Definição do sistema responsável pelo controle de qualidade, no qual estão inclusos os componentes de hardware e software do projeto proposto;

Uma vez que se detém as causas que dificulta o processo, é possível atuar diretamente na soluções, de forma a garantir um nível aceitável de qualidade.

1.3 Abrangências e limitações

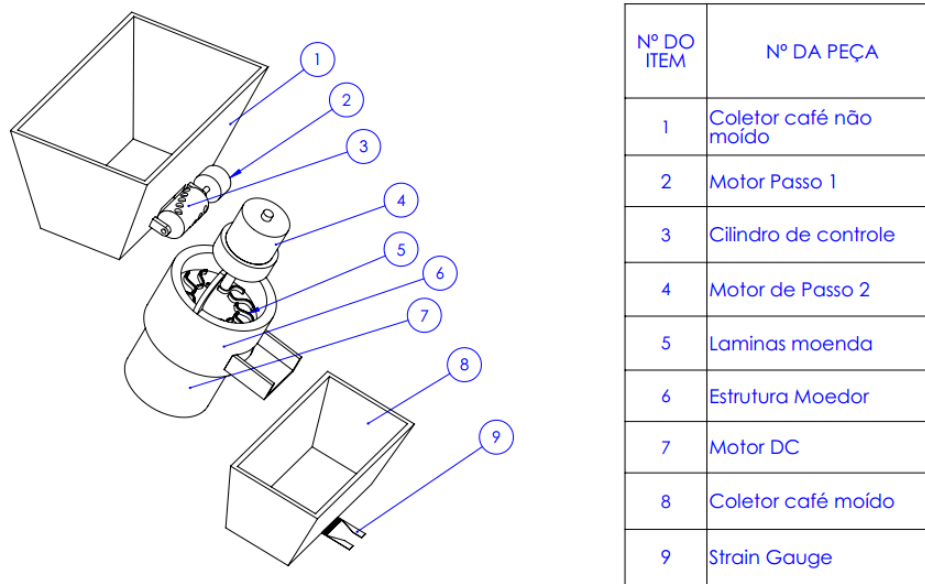
Para garantir uma boa qualidade da bebida, segundo a *Specialty coffe association* (RESOURCE, 2019), a temperatura ideal da água para o café varia entre os 92.2° – 94.4°. O oxigênio da água ajuda a extrair as propriedades do café, em especial daqueles que são caracterizados *gourmet*. Quando a água ferve, ela perde oxigênio e fica muito quente, o que pode influenciar na perda das características sensoriais da bebida, tais como: aroma, doçura, acidez e corpo. Tendo conhecimento destes problemas, o projeto da cafeteira automatizada visa elaborar um sistema com controle térmico, onde a temperatura da água que circula no interior

da máquina será controlada, garantindo assim as condições ideais para uma boa qualidade de bebida.

Como limitação, o projeto consistiu no estudo e no desenvolvimento dos sistemas eletrônicos, mecânicos e computacionais, de forma a propiciar uma base teórica para futuras implementações desse protótipo.

O desenho esquemático da Figura 1.1 apresenta o processo por onde os grãos de café terão que passar para sua moagem. Basicamente, os grãos serão armazenados em um recipiente onde, em sua base, haverá um cilindro seletor de grãos. O café que passa por este cilindro cai direto no moedor, depois é enviado para um outro recipiente no qual realizá a pesagem do pó. Esta medição de peso determinará um sinal de controle para todos os atuadores.

Figura 1.1 – Esquemático Geral do Moedor



Fonte: (AUTOR,)

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Granulometria

De acordo com (MORAES; TRUGO, 2001) a granulometria do café, segundo recomendação dos fabricantes, é subdividida em três tipos: fina, média, e grossa. Porém, o autor ressalta que existe pouco embasamento para associar as características químicas com a qualidade final do produto, relacionando-os com a granulometria. O que geralmente se tem na prática são os métodos de filtração e ou extração, o quais define as características da moagem.

Segundo (URBECAFE, 2018), já se tem conhecimento sobre um outro fator que altera o sabor do café, a infusão de água em contato com as moléculas do café moído. No início do processo de extração são extraídos os sabores mais intensos como azedo e ácido, posteriormente, tais compostos intensos, são suavizados e então são extraídos os sabores mais calmos e suaves. Se a bebida ao final sair com notas ácidas como um doce azedo e não tem um sabor bem definido, possivelmente há uma sub-extração do café. Sendo assim, na próxima moagem, de certo será uma boa escolha uma moagem com ajustes mais finos para que se acelere a extração de todos os sabores e aromas. Por outro lado, se na bebida predominar sabores suaves e uma amargura áspera que arranha a parte de trás da garganta, de certo houve excesso da extração do café, sendo necessário uma moagem um pouco mais grosseira.

2.2 Velocidade de moagem

Segundo (FOLMER, 2016) a velocidade de moagem deve estar, preferencialmente, em uma faixa de 150 - 200 [ft/min]. Utilizando um moedor plano, cujo raio é de 49 [mm], e fazendo as devidas conversões, a velocidade média do moedor é de 1120 [rpm]. O objetivo do presente projeto não envolve cilindros de laminação para o grão, mas sim um moedor que em seu movimento rotacional comprime

os grão contra a estrutura da parede metálica. Sendo assim, o motor deverá ter torque suficiente para conseguir quebrar os grãos na granulometria desejada e estar em uma faixa de velocidade média de 1120 [rpm].

Segundo(LOMBANA; PHILLIPS; GREGG, 1972), outro fator que tem influência significativa na qualidade do café é a temperatura na superfície do moador. Caso sejam desejados grãos com coloração mais clara, a temperatura de superfície deve estar numa faixa de 15°C até 60°C. Se a temperatura estiver na faixa de 60°C e 93°C, a coloração dos mesmos será mais escura. Acima da temperatura de 93°C, o sabor do café pode ser comprometido. Portanto, velocidades muito altas podem gerar atrito demasiado e sobrepujar a temperatura limite de 93°C.

3 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

3.1 Estudo de viabilidade preliminar

Uma etapa primordial desse trabalho, é a escolha de alguns componentes, tais como motores e sensores. O processo de escolha dos melhores componentes para o trabalho será realizado pela ferramenta: Matriz de Decisão (SALOMON, 2002), é um método de apoio à decisão por múltiplos critérios . Para esta matriz são atribuídos pesos sobre cada característica do componente a ser escolhido. Cada componente é analisado em comparação a todos os outros, de modo que um valor numérico é atribuído a cada característica de cada componente, sendo que o componente com a melhor característica possui o valor mais alto. Os pesos são multiplicados pelo valor numérico da característica, sendo que no final é feita a soma de todas as características para cada componente. O maior valor obtido desta soma representa o melhor componente para aquele objetivo.

Tomando como exemplo o motor escovado, ele deve ser escolhido de modo a atender os requisitos do projeto, como: trabalhar em uma determinada faixa de velocidade, possuir um torque adequado, ter o menor preço possível e ser alimentado eletricamente por uma tensão não muito alta. Os motores escovados com suas características se encontram na Tabela 3.1, de analogamente, a Tabela 3.2 apresenta as características dos motores de passo, a Tabela 3.3 apresenta as características das células de carga e a Tabela 3.4 mostra os microcontroladores.

Tabela 3.1 – Características dos motores escovados.

| Características | Dewalt New Style | Dewalt Old Style | F006.B10.066 |
|-------------------------|------------------|------------------|--------------|
| Velocidade máxima [rpm] | 20.250,000 | 22.000,000 | 4.200,000 |
| Torque [Kgf.cm] | 13,330 | 22,030 | 10,500 |
| Tensão [V] | 18,000 | 18,000 | 24,000 |
| Custo [R\$] | 249,000 | 119,000 | 247,230 |
| Peso [Kg] | 0,450 | 0,472 | 0,900 |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.2 – Características dos motores de passo.

| Características | NEMA17.3,5 | NEMA17.7 | NEMA23.9 | NEMA23.15 | 28B |
|--------------------|------------|----------|----------|-----------|-------|
| Torque [Kgf.cm] | 3,500 | 7,000 | 9,000 | 15,000 | 0,340 |
| Custo motor [R\$] | 76,260 | 104,940 | 99,450 | 109,700 | 8,900 |
| Custo Driver [R\$] | 71,910 | 71,910 | 71,910 | 71,910 | 8,000 |
| Peso [Kg] | 0,240 | 0,350 | 0,600 | 0,98- | 0,040 |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.3 – Características das células de carga.

| Características | Célula de 1Kg | Célula de 100 gr | Célula de 350 gr |
|-----------------|---------------|------------------|------------------|
| Custo [R\$] | 29,900 | 19,800 | 189,190 |
| Peso máximo[Kg] | 1,000 | 50,000 | 100,000 |
| Precisão[KG] | 0,001 | 0,001 | 0,020 |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.4 – Características dos microcontroladores.

| Características | ESP32 | Atmega 328P-AU | PIC 18F 4550 |
|---------------------------------|---------|----------------|--------------|
| Custo [R\$] | 40,000 | 16,900 | 39,000 |
| Canais ADC | 18,000 | 6,000 | 10,000 |
| Nº portas PWM | 16,000 | 6,000 | 2,000 |
| Nº núcleos | 2,000 | 1,000 | 1,000 |
| Frequência máxima de clock [Mz] | 240,000 | 20,000 | 40,000 |
| Conectividade IoT | 1,000 | 0,000 | 0,000 |
| Cons. Corrente máx. [mA] | 240,000 | 40,000 | 25,000 |

Fonte: (AUTOR,)

Uma vez que são descritos os possíveis componentes com suas características, é preciso escolhê-los de acordo com o objetivo desejado. Para isso, foi implementada a matriz de tomada de decisão. A metodologia utilizada para montagem desta matriz descrita a seguir: Primeiramente, toma-se uma característica de todas as opções disponíveis, por exemplo o torque de todos os motores de passo, depois decide-se a relevância desta característica do componente no projeto como

positiva ou negativa. O torque do motor de passo é uma característica positiva, caso seja isso que ocorra, deve ser utilizada a Equação 3.1, caso contrário, deve ser utilizada a Equação 3.2 para o cálculo da relevância.

$$relevancia = \frac{(1 + (x - \min(x_i) \cdot 2) \cdot p}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (3.1)$$

$$relevancia = \frac{(3 - (x - \min(x_i) \cdot 2) \cdot p}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (3.2)$$

relevância: relevância da característica no projeto.

3.2 Soluções propostas

3.2.1 Concepção 1

A primeira proposta de projeto tem o objetivo de reduzir os custos, por isso, a característica custo tem um maior peso em relação às outras. As matrizes de decisão são apresentadas conforme a Tabela 3.5, Tabela 3.6, Tabela 3.7, Tabela 3.8.

Tabela 3.5 – Matriz de decisão do motor escovado da concepção 1.

| Nome | Dewalt New Style | Dewalt Old Style | F006.B10.066 | Pesos |
|----------------|------------------|------------------|--------------|-------|
| Velocidade máx | 1,197 | 1,000 | 3,000 | 1 |
| Torque | 1,491 | 3,000 | 1,000 | 1 |
| Tensão | 3,000 | 3,000 | 1,000 | 1 |
| Custo | 4,000 | 12,000 | 4,109 | 4 |
| Peso | 3,000 | 2,902 | 1,000 | 1 |
| Pontuação | 12,688 | 21,902 | 10,109 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.6 – Matriz de decisão dos motores de passo da concepção 1.

| Nome | NEMA17.3,5 | NEMA17.7 | NEMA23.9 | NEMA23.15 | 28B | Pesos |
|--------------|------------|----------|----------|-----------|--------|-------|
| Torque | 1,431 | 1,908 | 2,181 | 3,000 | 1,000 | 1 |
| Custo motor | 6,883 | 4,410 | 4,884 | 4,000 | 12,000 | 4 |
| Custo driver | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 4,000 | 12,000 | 4 |
| Peso | 2,574 | 2,340 | 1,809 | 1,000 | 3,000 | 1 |
| Pontuação | 14,888 | 12,659 | 12,873 | 12,000 | 28,000 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.7 – Matriz de decisão das células de carga da concepção 1.

| Nome | Célula de 1Kg | Célula de 100 gr | Célula de 350 gr | Pesos |
|-------------|---------------|------------------|------------------|-------|
| Custo | 11,523 | 12,000 | 4,000 | 4 |
| Peso máximo | 1,000 | 1,990 | 3,000 | 1 |
| Precisão | 3,000 | 3,000 | 1,000 | 1 |
| Pontuação | 15,523 | 16,99 | 8,000 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.8 – Matriz de decisão do microcontrolador da concepção 1.

| Nome | ESP32 | Atmega328P | PIC18F2550 | Pesos |
|----------------------|--------|------------|------------|-------|
| Custo | 4,000 | 12,000 | 4,346 | 4 |
| Nº portas Analógicas | 3,000 | 1,000 | 1,667 | 1 |
| Nº portas PWM | 3,000 | 1,571 | 1,000 | 1 |
| Nº núcleos | 3,000 | 1,000 | 1,000 | 1 |
| Freq. máx Clock | 3,000 | 1,000 | 1,181 | 1 |
| Conectividade IoT | 3,000 | 1,000 | 1,000 | 1 |
| Pontuação | 20,000 | 21,321 | 13,195 | |

Fonte: (AUTOR,)

Como resultado, a seguinte lista de componentes é gerada:

- 2 motores de passo 28BYJ-48
- 1 motor escovado Dewalt Old Style
- 1 célula de 100 gr

- 1 micro-controlador Atmega 328P

3.2.2 Concepção 2

A segunda proposta de projeto tem o objetivo de garantir uma ótima qualidade técnica por isso, a característica que foram julgadas como importante para o projeto, tem um maior peso em relação às outras. As matrizes de decisão são apresentadas conforme a Tabela 3.9, Tabela 3.10, Tabela 3.11, Tabela 3.12.

Tabela 3.9 – Matriz de decisão do motor escovado da concepção 2.

| Nome | Dewalt New Style | Dewalt Old Style | F006.B10.066 | Pesos |
|----------------|------------------|------------------|--------------|-------|
| Velocidade máx | 3,590 | 3,000 | 9,000 | 3 |
| Torque | 4,473 | 9,000 | 3,000 | 3 |
| Tensão | 3,000 | 3,000 | 1,000 | 1 |
| Custo | 1,000 | 3,000 | 1,027 | 1 |
| Peso | 3,000 | 2,902 | 1,000 | 1 |
| Pontuação | 15,063 | 20,902 | 15,027 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.10 – Matriz de decisão dos motores de passo da concepção 2.

| Nome | NEMA17.3,5 | NEMA17.7 | NEMA23.9 | NEMA23.15 | 28B | Pesos |
|--------------|------------|----------|----------|-----------|--------|-------|
| Torque | 4,292 | 5,725 | 6,544 | 9,000 | 3,000 | 3 |
| Custo motor | 1,721 | 1,103 | 1,221 | 1,000 | 3,000 | 1 |
| Custo driver | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 3,000 | 1 |
| Peso | 2,574 | 2,340 | 1,809 | 1,000 | 3,000 | 1 |
| Pontuação | 9,588 | 10,168 | 10,573 | 12,000 | 12,000 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.11 – Matriz de decisão das células de carga da concepção 2.

| Nome | Célula de 1Kg | Célula de 100 gr | Célula de 350 gr | Pesos |
|-------------|---------------|------------------|------------------|-------|
| Custo | 2,881 | 3,000 | 1,000 | 1 |
| Peso máximo | 3,000 | 5,970 | 9,000 | 3 |
| Precisão | 9,000 | 9,000 | 3,000 | 3 |
| Pontuação | 14,881 | 17,970 | 13,000 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.12 – Matriz de decisão do microcontrolador da concepção 2.

| Nome | ESP32 | Atmega328P | PIC18F2550 | Pesos |
|----------------------|--------|------------|------------|-------|
| Custo | 1,000 | 3,000 | 1,087 | 1 |
| Nº portas Analógicas | 3,000 | 1,000 | 1,667 | 1 |
| Nº portas PWM | 3,000 | 1,571 | 1,000 | 1 |
| Nº núcleos | 3,000 | 1,000 | 1,000 | 1 |
| Freq. máx Clock | 3,000 | 1,000 | 1,181 | 1 |
| Conectividade IoT | 9,000 | 3,000 | 3,000 | 3 |
| Pontuação | 23,000 | 16,099 | 11,935 | |

Fonte: (AUTOR,)

Como resultado, a seguinte lista de componentes é gerada:

- 2 motores de passo NEMA 23 - 15
- 1 motor escovado Dewalt Old Style
- 1 célula de 100 gr
- 1 micro-controlador ESP 32

3.2.3 Concepção 3

A terceira proposta de projeto tem o objetivo de garantir uma boa qualidade a um preço otimizado, por isso, tanto a característica custo, quanto a qualidade tiveram pesos maiores que as demais. As matrizes de decisão são apresentadas conforme a Tabela 3.13, Tabela 3.14, Tabela 3.15 e Tabela 3.16.

Tabela 3.13 – Matriz de decisão do motor escovado da concepção 3.

| Nome | Dewalt New Style | Dewalt Old Style | F006.B10.066 | Pesos |
|----------------|------------------|------------------|--------------|-------|
| Velocidade máx | 3,590 | 3,000 | 9,000 | 3 |
| Torque | 4,473 | 9,000 | 3,000 | 3 |
| Tensão | 3,000 | 3,000 | 1,000 | 1 |
| Custo | 3,000 | 9,000 | 3,081 | 3 |
| Peso | 3,000 | 2,902 | 1,000 | 1 |
| Pontuação | 17,063 | 26,902 | 17,082 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.14 – Matriz de decisão dos motores de passo da concepção 3.

| Nome | NEMA17.3,5 | NEMA17.7 | NEMA23.9 | NEMA23.15 | 28B | Pesos |
|--------------|------------|----------|----------|-----------|--------|-------|
| Torque | 4,292 | 5,725 | 6,544 | 9,000 | 3,000 | 3 |
| Custo motor | 5,162 | 3,308 | 3,663 | 3,000 | 9,000 | 3 |
| Custo driver | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 1,000 | 3,000 | 1 |
| Peso | 2,574 | 2,340 | 1,809 | 1,000 | 3,000 | 1 |
| Pontuação | 13,029 | 12,373 | 13,015 | 14,000 | 18,000 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.15 – Matriz de decisão das células de carga da concepção 3.

| Nome | Célula de 1Kg | Célula de 100 gr | Célula de 350 gr | Pesos |
|-------------|---------------|------------------|------------------|-------|
| Custo | 8,643 | 9,000 | 3,000 | 3 |
| Peso máximo | 3,000 | 5,970 | 9,000 | 3 |
| Precisão | 9,000 | 9,000 | 3,000 | 3 |
| Pontuação | 20,643 | 23,970 | 15,000 | |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 3.16 – Matriz de decisão do microcontrolador da concepção 3.

| Nome | ESP 32 | Atmega 328-P | PIC 18F2550 | Pesos |
|----------------------|--------|--------------|-------------|-------|
| Custo | 3,000 | 9,000 | 3,260 | 3 |
| Nº portas Analógicas | 3,000 | 1,000 | 1,667 | 1 |
| Nº portas PWM | 3,000 | 1,571 | 1,000 | 1 |
| Nº núcleos | 3,000 | 1,000 | 1,000 | 1 |
| Freq. máx Clock | 3,000 | 1,000 | 1,181 | 1 |
| Conectividade IoT | 9,000 | 3,000 | 3,000 | 3 |
| Pontuação | 25,000 | 22,099 | 14,108 | |

Fonte: (AUTOR,)

Sabe-se que um dos motores de passo servirá para liberar os grãos de café para pesagem, por isso não é necessário um torque alto deste motor, por isso, foi escolhido o motor mais barato, o 28BYJ48. Como resultado, a seguinte lista de componentes é gerada:

- 1 motor de passo 28BYJ-48
- 1 motor de passo NEMA 23 - 15
- 1 motor escovado Dewalt Old Style
- 1 célula de 100 gr
- 1 micro-controlador ESP 32

3.2.4 Definição da solução com base na Matriz de Decisão

Com base na viabilidade definida pela matriz, para a melhor solução em quesito de análise de risco e oportunidade, sabe-se, que a alternativa de concepção 3 seja mais coerente ao esperado pelo projeto, pois o total de pontos foi superior às demais alternativas. Portanto, o projeto terá em seu âmbito principal, os componentes listados na seção 3.2.3.

4 ANÁLISE ECONÔMICA

Toda solução nova precisa ser economicamente viável para que possa ser executada, caso contrário, o prejuízo pode ser muito grande e gerar descrédito aos projetistas. Para o presente trabalho, serão utilizadas ferramentas de análise econômica. O VPL, o TIR e o *Payback*. Estas ferramentas mostram indicadores de viabilidade econômica sobre um determinado negócio. Para tal, primeiro coleta-se as informações e em seguida, aplica-se as ferramentas de viabilidade econômica.

4.1 Levantamento dos dados

Todo o estudo econômico foi baseado no fato de que a máquina de café estará presente em empresas de médio a grande porte, de forma que a empresa que contrata o serviço possui estas máquinas de café em seu estabelecimento, mas a máquina pertence a empresa distribuidora, a qual também é responsável pelo abastecimento de insumos, assim como manutenção e higienização da máquina. O estudo foi realizado para um tempo de 5 anos de investimento.

De acordo com (ABIC, 2019), o brasileiro consome em média 839 xícaras de café em 2018. Decidiu-se que o alcance esperado desta máquina fosse de 100 pessoas dentro dessas mesmas empresas. Analisando a rotina dos funcionários, pode-se contabilizar que eles passam em média 8 horas do dia, na empresa, 8 horas realizando outras atividades e 8 horas dormindo. Com isso, estima-se que metade do consumo de café destes funcionários provem da máquina. Portanto, é possível definir o número de xícaras de café previstas por ano conforme a Equação 4.1.

$$QtdeAno = N_x * A_l * P_l \quad (4.1)$$

Conforme dados disponibilizados pela *startup* parceira do projeto, a IN-TELICOFFE, o custo de investimento para o processo de moagem da máquina de café é de R\$ 1.642,26. O orçamento dos equipamentos decididos pela matriz de decisão ficou em R\$441,41. O custo de investimento para a máquina com este projeto adicional fica em R\$2083,67, pois soma os valores de investimento original somado com os componentes necessários para melhoria dos processos.

De acordo com (FEDERAL, 2016), o valor residual é de 10% do valor investido. A depreciação é calculada levando em consideração o valor residual, o custo de investimento e o tempo de vida útil. A Equação 4.2 apresenta como a depreciação é calculada.

$$Depreciacao = \frac{Investimento - ValorResidual}{VidaUtil} \quad (4.2)$$

Outro dado importante nesta análise são os insumos utilizados. O insumo mais importante para o processo é o café. Para isto, foi escolhido um café do tipo três corações *Gourmet*, torrado mas não moído, seu custo é de R\$40 por Kg. Um dos objetivos deste trabalho é levantar os componentes necessários para uma futura implementação do controle de qualidade do café, atuando diretamente no peso de pó que passa para o processo de extração. Sabe-se que o ideal para um café expresso curto, são necessários 7g de pó, ainda assim o máximo valor aceitável é de 9g. Com o intuito de economizar insumos, o projeto deste trabalho irá atuar de forma a garantir o mais próximo de 7g sejam entregues ao processo de extração, ao passo que o sistema anterior poderia entregar em média 8g. Para o sistema inicial, seriam gastos R\$ 13.424 por ano, enquanto o sistema com as modificações teria um custo de R\$ 11.746 por ano.

Outro insumo importante é a energia elétrica. Considerando que a empresa se localiza em Minas Gerais e que a tarifa de energia se encontra com bandeira amarela, o custo de energia elétrica por KWh é de R\$0,59684 (CEMIG, 2018). A máquina completa gasta 1250W, mas estima-se que 30% deste valor é destinado ao

processo de moagem, portanto o processo gasta 375W. Foi estimado que os componentes que seriam adicionados ao processo de moagem gastem 81W, portanto o novo sistema gasta 456W. Sabe-se a previsão de venda para um ano, e também é conhecido que o processo de moagem leva 14 segundos para realizar seu trabalho, com o custo da energia elétrica e a potência utilizada, é possível encontrar os valores anuais. Para o sistema inicial, por ano são gastos R\$36, enquanto o sistema com alterações gasta R\$44.

Para calcular os gastos de operação é preciso considerar os operadores que o sistema possui, entretanto a máquina é automática, não precisa de um operador para a preparação do café, ou mesmo para pagamento. A tarefa que cabe a um funcionário é repor os grãos de café, assim como limpar o reservatório com a borra de café. Para tal função foi designado um profissional que não necessite de muito preparo técnico, ele seria responsável por uma média de 30 máquinas. O custo deste funcionário é de R\$ 2.200. Dividindo este custo por todas as máquinas, cada máquina tem um custo de operação de R\$ 73,33 por mês.

4.2 Ferramentas de viabilidade econômica

4.2.1 VPL

Segundo (OLIVEIRA, 2008) o VPL (Valor Presente líquido) é uma ferramenta fortemente utilizada pela análise de viabilidade econômica, uma vez que tem por objetivo fornecer o ganho monetário de um dado investimento. Seu procedimento é baseado nos fluxos de caixa esperados, levando em conta o investimento inicial, os lucros desejados, os custos de manutenção, operação e outros fatores. Para fins de decisão, a ferramenta VPL gera um resultado, se este resultado for maior que zero, o investimento será compensado, caso contrário, o investimento gerará perdas ao investidor.

Para realizar este tipo de análise econômica, é utilizada a equação 4.3, a qual é a fórmula base para o cálculo do VPL.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(i+1)^j} - FC_0 \quad (4.3)$$

A Equação 4.4 e a Equação 4.5 são fórmulas aplicadas para o trabalho presente, sendo a Equação 4.5 derivada da Equação 4.4.

$$C = \frac{(1+J)^n - 1}{(1+J)^n * J} \quad (4.4)$$

$$VPL = -I_v - D * C - O * C - M * C - I_s * C + P * C + R_s * \frac{1}{(1+J)^n} \quad (4.5)$$

Na seção de análise e resultados será explicado como esta ferramenta financeira foi aplicada no presente projeto, demonstrando sua viabilidade.

4.2.2 TIR

A ferramenta TIR tem como significado taxa interna de retorno. De acordo com (OLIVEIRA, 2008) ela é a taxa de remuneração do capital. Fazendo uma conexão com o VPL, representa a taxa onde o investimento se torna indiferente, ou seja, o ponto onde o VPL gera resultado igual a zero. A taxa interna de retorno pode ser comparada com a taxa mínima de atratividade (TMA) para análise de investimento. Usando como exemplo de aplicação, podemos relacionar a TIR com a taxa Selic. A taxa Selic é a taxa básica de juros da economia no Brasil. Caso a TIR fique abaixo da taxa Selic, que em novembro de 2019 era de 5% de taxa anual (CUSTÓDIA, 2018), é mais viável aplicar o dinheiro no banco com a taxa Selic, do que investir o dinheiro em um projeto, uma vez que o investimento na taxa Selic, é considerado de baixo risco.

4.2.3 *Payback*

Payback é uma ferramenta cuja preocupação é informar o tempo que um investimento leva para ser pago, trazendo assim um complemento à análise econômica, uma vez que os investidores não se preocupam apenas com seu lucro, mas também precisam programar-se para suprir suas outras necessidades e/ou investimentos. A equação 4.6 ilustra a fórmula simples de se calcular o *Payback*:

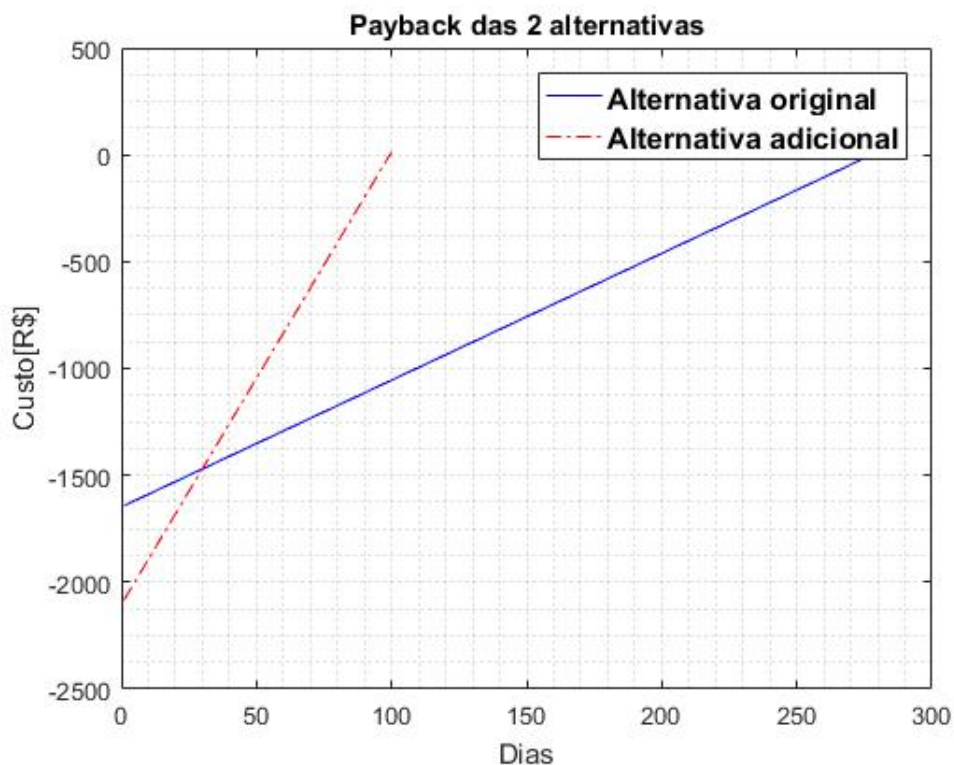
$$PB = \frac{\textit{InvestimentoInicial}}{\textit{Resultadofluxodecaixa}} \quad (4.6)$$

4.3 Análise e decisão

Uma vez que os dados foram obtidos e as ferramentas já foram explicadas, os resultados podem ser apresentados e as análises feitas. Com auxílio de um programa feito no *MatLab*, foi possível identificar o valor presente líquido das duas aplicações analisadas. A Figura 4.1 apresenta este resultado.

Conforme é possível notar na Figura 4.1, o VPL da alternativa com as melhorias sugeridas no trabalho, é maior em relação ao VPL da alternativa original. Na figura também é possível perceber que a TIR da alternativa original é de 170,4%, ao passo que a TIR da alternativa com melhorias é de 405,6%.

O *payback* foi calculado, resultando em 278 dias de retorno para a alternativa original e 100 dias de retorno para a alternativa adicional, conforme mostra a Figura 4.2

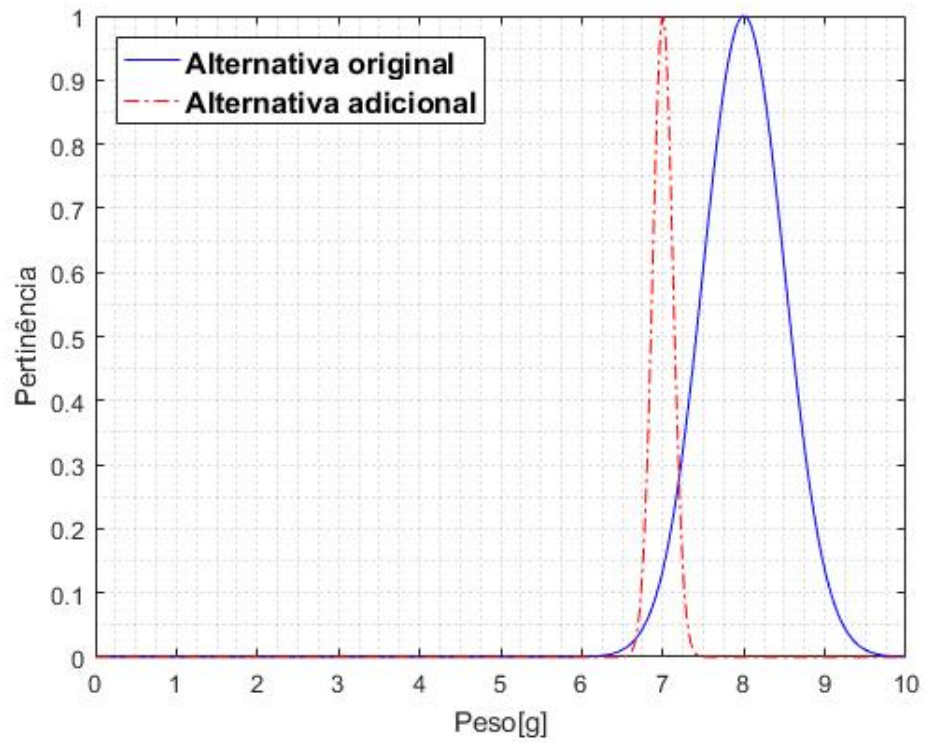
Figura 4.2 – Tempo de *Payback* das alternativas

Fonte: (AUTOR,)

Um outro fator a ser ressaltado desta alternativa com processos adicionais de controle e automação, é a economia do pó de café utilizado. Podem existir duas formas de lucrar em um produto, por um lado aumentar o seu preço, por outro, economizar na mão de obra e matéria prima. A automação neste caso age com intuito de economizar a mão de obra, ao passo que o controle deve economizar a matéria prima, cujo trabalho é principalmente o pó de café. A Figura 4.3 representa a faixa de utilização do pó de café para as alternativas analisadas. Sabe-se que a quantidade ideal de pó para um café expresso varia em torno de 7g a 9g. Como a alternativa original não tinha um sistema de medição e controle para a quantidade tão pouco para a dosagem exata do pó, era estabelecido 8g de pó de café, em

média. O sistema proposto pode reduzir esta média para 7g, visto que possui um sistema de controle mais preciso.

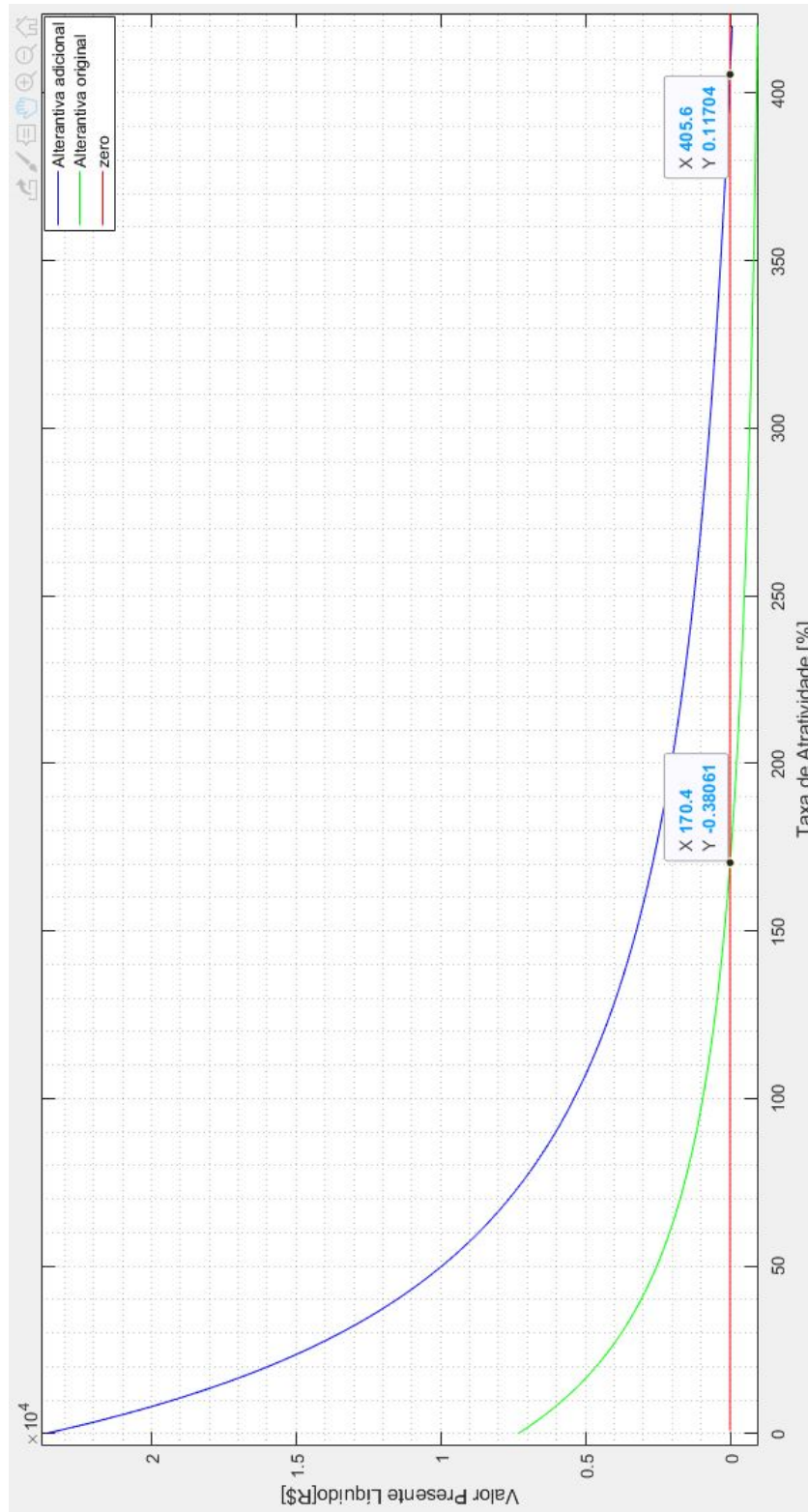
Figura 4.3 – Faixa de utilização de café nas duas opções



Fonte: (AUTOR,)

Tendo analisado todos estes fatores, conclui-se que, economicamente o processo proposto neste trabalho é viável.

Figura 4.1 – VPL analisada em 5 anos



Fonte: (AUTOR,)

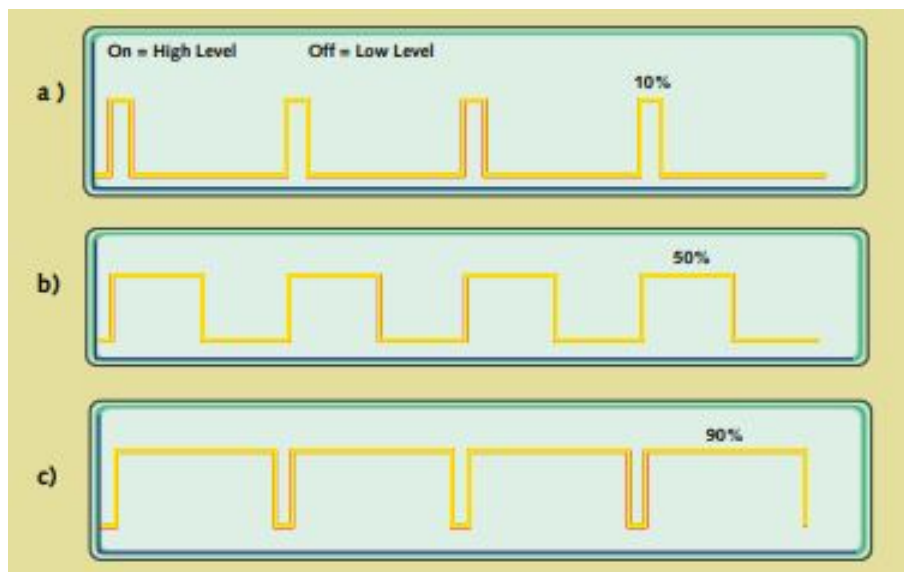
5 IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

5.1 Estudo dos principais componentes

5.1.1 PWM

PWM é uma técnica utilizada para controlar circuitos analógicos por meio de saídas digitais (BARR, 2001). O conceito se baseia na modulação de ondas quadradas, cujas frequências devem ser da ordem de pelo menos 1KHz. O período em que o sinal se mantém em nível lógico alto é chamado de ciclo de trabalho, o qual é apresentado como uma porcentagem do período total de uma onda. A Figura 5.1 representa sinais PWM, cujos ciclos de trabalho são de 10%, 50% e 90%.

Figura 5.1 – Sinal PWM



Fonte: (BARR, 2001)

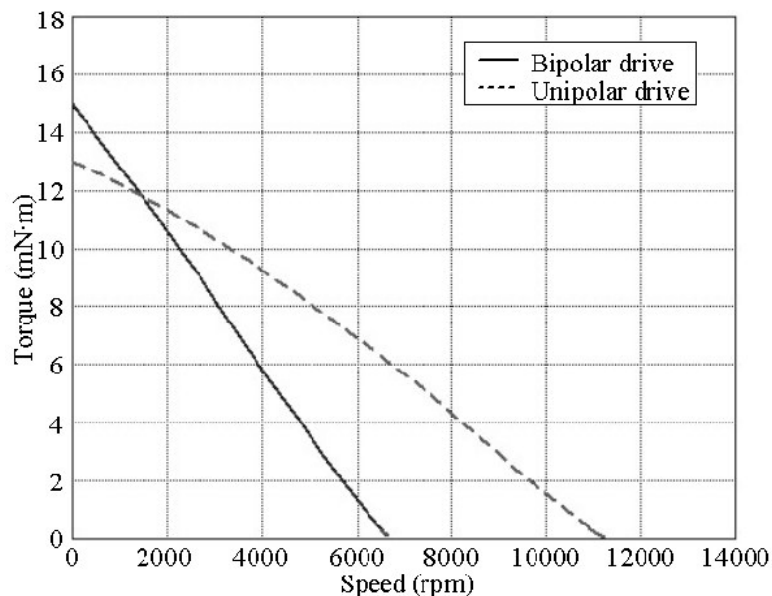
5.1.2 Motor de passo

O motor de passo é um motor de corrente contínua, o qual realiza seus movimentos baseados em passos. É muito utilizado quando se deseja controlar a

posição e a velocidade angular, devido sua alta precisão e controle relativamente simples.

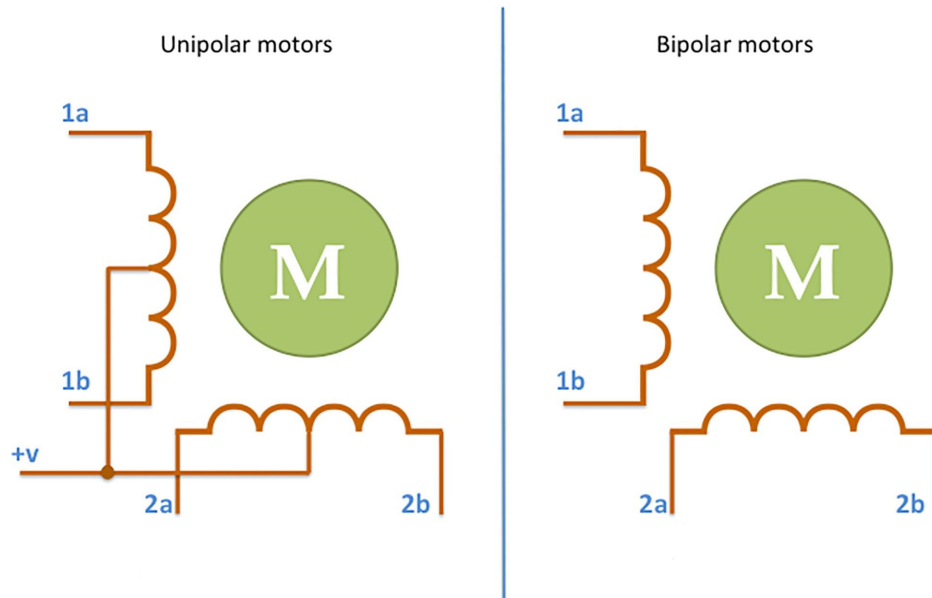
Segundo (KIEBURTZ, 1964) o motor de passo é um motor síncrono de corrente contínua, o qual é uma adaptação vinda do motor de corrente alternada. O mesmo pode ser unipolar ou bipolar, sendo que cada configuração tem suas características e formas de acionamento específicas. Nas 2 configurações, tanto na unipolar, quanto na bipolar, o torque varia de forma contrária à velocidade, entretanto a variação depende da configuração adotada. Nos motores unipolares, o torque inicial é mais baixo e o decaimento do torque, proporcionalmente a velocidade, é alto. Para os motores bipolares o torque inicial é mais baixo, porém se mantém mais constante, como pode ser notado na Figura 5.2. Outra característica que diferencia as configurações é o travamento elétrico, o qual é possível ser feito somente em motores bipolares.

Figura 5.2 – Torque no motor Unipolar Vs Bipolar



Fonte: (JANG; KIM, 2004)

Figura 5.3 – Ligação elétrica do motor Unipolar vs Bipolar.



Fonte: (ROMERO; BARBANO; MISOGUTI, 2019)

A forma de acionamento das duas configurações é diferente, uma vez que nos motores bipolares, a bobina é energizada apenas nas extremidades, enquanto nos motores unipolares a bobina é particionada ao meio, mudando a forma de acionamento. A Figura 5.3 representa as ligações básicas destas 2 configurações, a Tabela 5.1 e a Tabela 5.2, representam as formas de acionamento relacionadas a cada sequência de passos.

Tabela 5.1 – Tabela Verdade motor Bipolar.

| Step | CW Rotation | | CCW Rotation | |
|------|-------------|----------|--------------|----------|
| | Switch A | Switch B | Switch A | Switch B |
| 1 | + | + | + | + |
| 2 | - | + | + | - |
| 3 | - | - | - | - |
| 4 | + | - | - | + |

Fonte: (AUTOR,)

Tabela 5.2 – Tabela Verdade motor Unipolar.

| Step | CW Rotation | | CCW Rotation | |
|------|-------------|----------|--------------|----------|
| | Switch A | Switch B | Switch A | Switch B |
| 1 | A1 | B1 | A1 | B1 |
| 2 | A2 | B1 | A1 | B2 |
| 3 | A2 | B2 | A2 | B2 |
| 4 | A1 | B2 | A2 | B1 |

Fonte: (AUTOR,)

O controle dos motores de passo é realizado com a utilização de *drivers* específicos, onde importa conhecer a configuração do motor, pois motores unipolares são controlados de forma diferente dos bipolares.

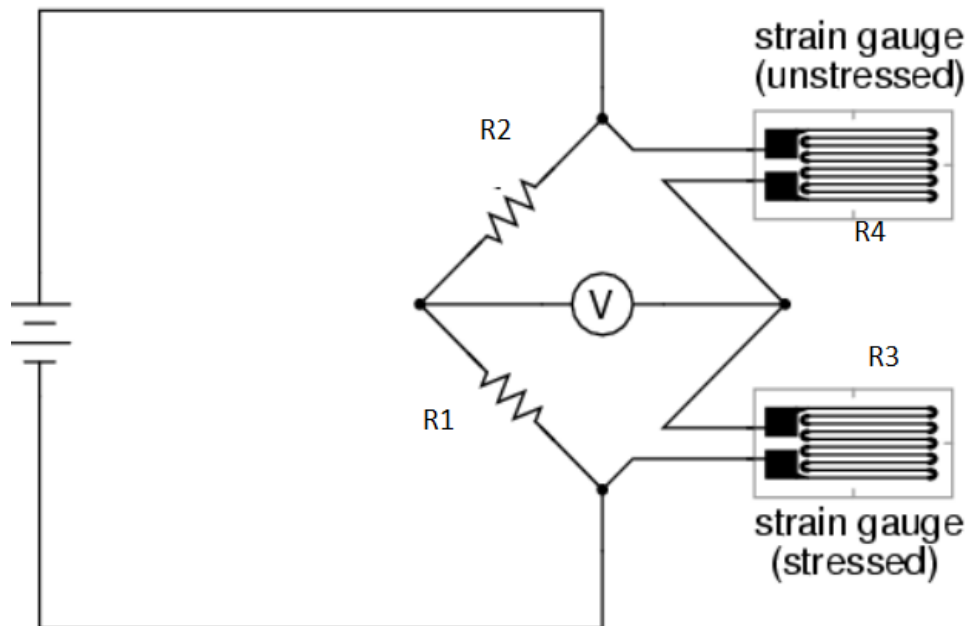
5.1.3 Medição de peso

Para realizar o controle de peso do café, serão utilizadas duas células de carga e um circuito eletrônico de condicionamento de sinal. Cada célula de carga é composta por uma meia ponte de *Wheatstone*, a qual possui uma resistência de referência e um elemento sensor cuja resistência varia conforme a variação de seu comprimento. O elemento sensor recebe o nome de *extensômetro*. As células de carga serão instaladas na balança de modo que uma seja tracionada e outra comprimida. A precisão obtida para esta configuração de ponte é maior se comparada com apenas uma célula de carga. A faixa de medição dos sensores está entre 0 - 490.33 N, e tem uma incerteza máxima de de 9,8 N.

Uma grande dificuldade desse modo de aquisição de dados é que quando aplica-se uma pequena força onde o sensor estará preso, há uma variação muito baixa da resistência, que pode chegar a casa de décimos de ohm's. Logo, para que se tenha um sinal na saída do sensor que poderá ser medido, é necessário utilizar um amplificador de sinal, que para esse trabalho, será o HX711. Tal circuito in-

tegrado, tem uma discretização de 24 bits, que será mais que o suficiente para a aplicação que se busca nesse projeto.

Figura 5.4 – Configuração de meia ponte de *Wheatstone*



Fonte: (NETO et al., 2001)

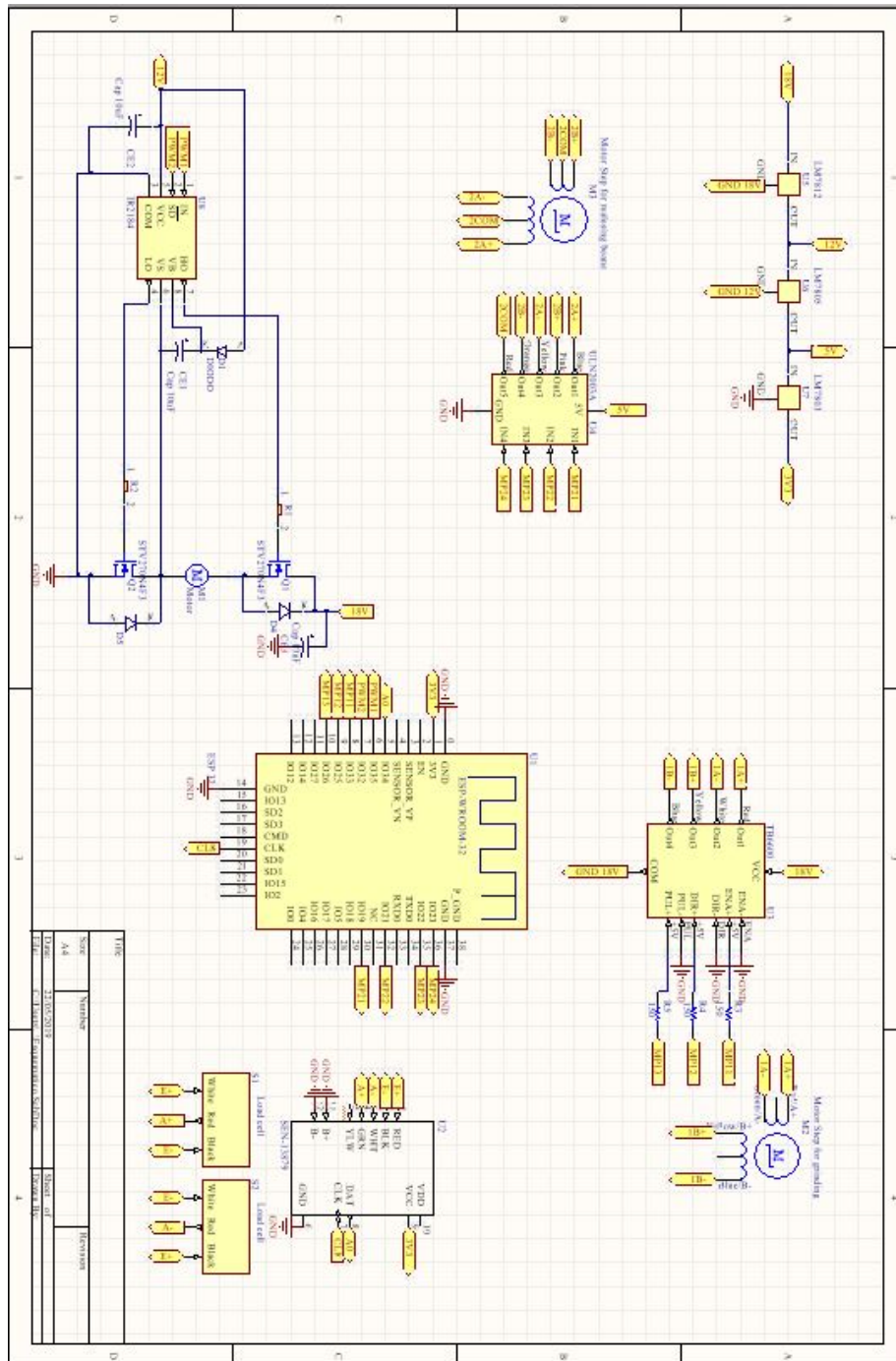
$$\frac{V_0}{V_1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_3}{R_3 + R_4} \quad (5.1)$$

A Figura 5.4, mostra uma figura esquemática da ponte, que constitui dois *extensômetros* localizados em nós intercalados R3 e R4, enquanto dois resistores R1 e R2 de 1Kohm preenchem os espaços restantes, onde será medido a diferença de tensão entre os dois terminais de saída da ponte, que por sua vez estará condicionada a variação da resistência dos sensores. Os extensômetros metálicos são largamente utilizados na engenharia de instrumentação, especialmente na realização de ensaios não destrutivos para medidas de tensões. (GUADAGNINI; RO-

CHA; BARLETTE, 2011). Para calibrar o extensômetro, será necessário utilizar um peso padrão juntamente com o software de calibração do sensor.

5.2 Esquemático eletrônico

Figura 5.5 – Esquemático do circuito eletrônico



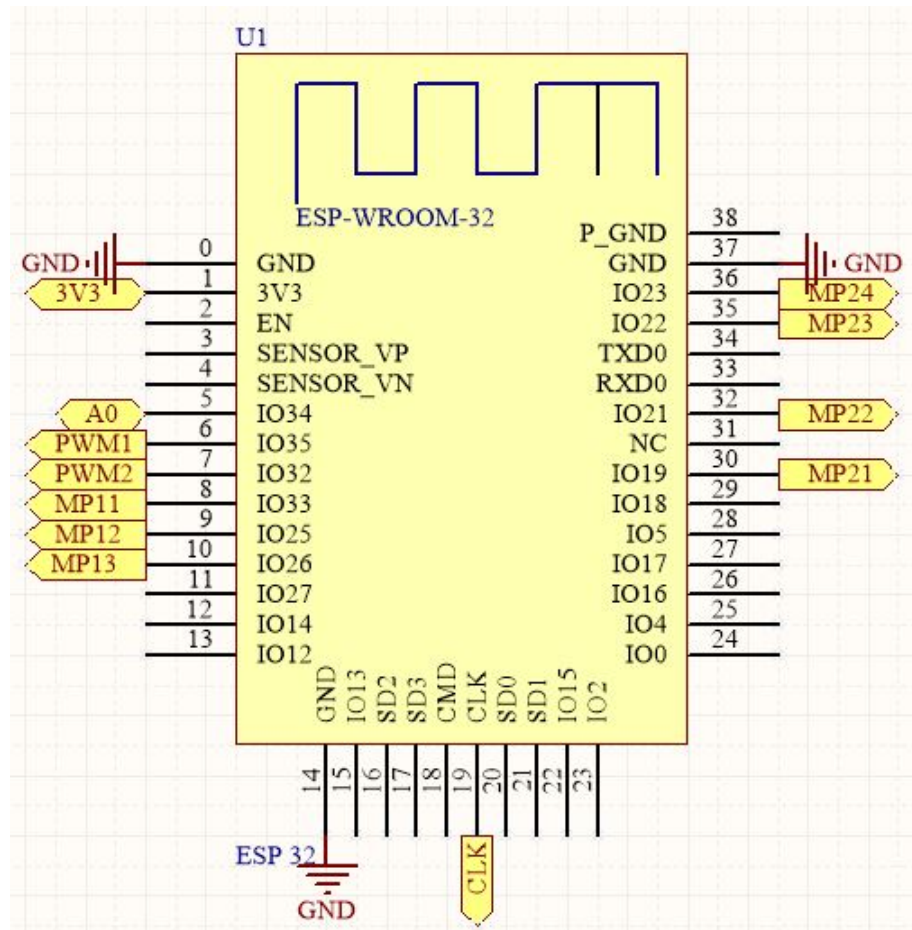
Fonte: (AUTOR,)

O projeto compõe uma placa eletrônica responsável por obter e processar os sinais obtidos pelos sensores e enviar os sinais de controle para os devidos atuadores, que são os motores de passo e o motor escovado. A figura 5.5 representa o diagrama eletrônico do circuito proposto. É importante ressaltar que os retângulos que são ligados aos terminais de cada componente, representam ligações elétricas aos pontos que possuem nome em comum, em outras palavras, as trilhas da placa eletrônica. Este recurso é utilizado para manter uma boa organização do esquemático. Nas próximas subseções, os circuitos são explicados separadamente.

5.2.1 Controlador

O sistema utilizado para processar os dados dos sensores e controlar os motores é o ESP32, um sistema embarcado que possui diversas funcionalidades para comunicação externa, como portas que geram sinais PWM, conversores analógicos digitais, comunicação WiFi, entre outras funções e características que tornam o sistema ideal para ser utilizado. A Figura 5.6 representa o circuito do ESP32.

Figura 5.6 – Controlador ESP32

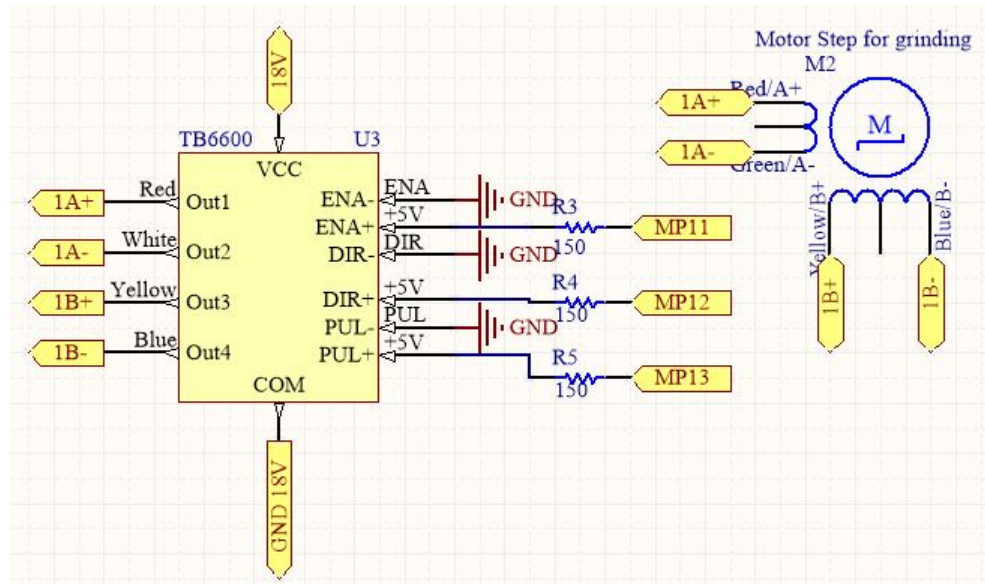


Fonte: (AUTOR,)

5.2.2 Motor de passo para moagem

O motor de passo que realiza o controle de granulometria é o motor NEMA 23, como já foi descrito no tópico de definição do problema Sessão 3. Este motor possui um *driver* chamado TB6600, cuja função é mediar os sinais de controle vindos do ESP32 com as correntes mais altas que devem ser entregues ao motor. A Figura 5.7 apresenta o motor de passo do moedor e seu *driver*.

Figura 5.7 – Esquemático do motor de passo NEMA 23

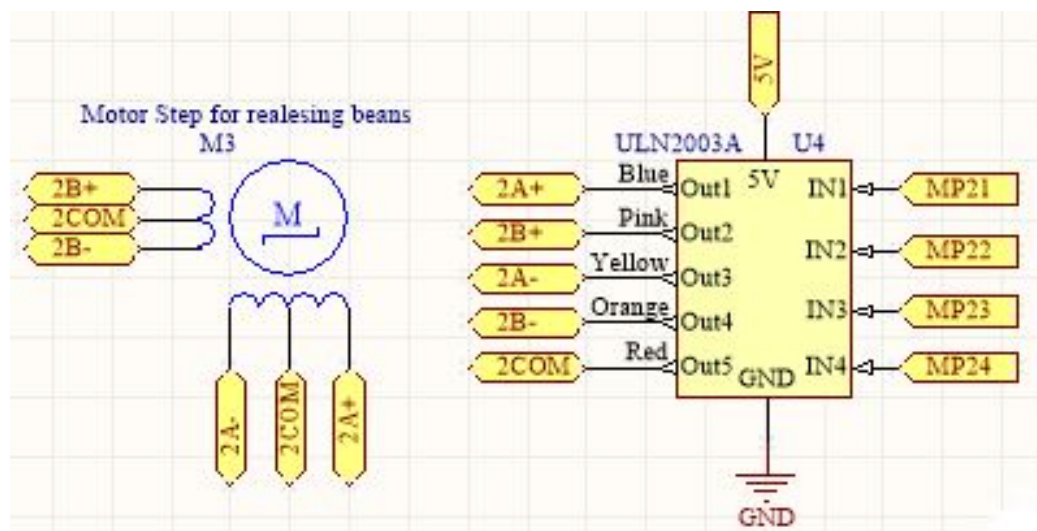


Fonte: (AUTOR,)

5.2.3 Motor de passo para cilindro

Análogo ao tópico anterior, este motor de passo também possui um *driver* específico, ULN2003A, cujo motor permite ou não a passagem dos grãos de café até o moedor, onde o esquemático é apresentado na Figura 5.8.

Figura 5.8 – Esquemático para motor de passo 28BYJ-48

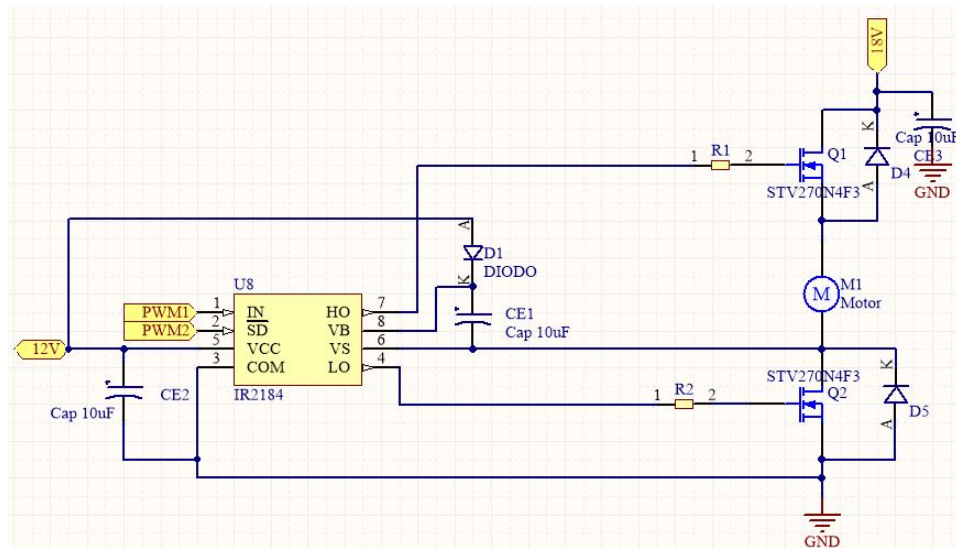


Fonte: do Autor

5.2.4 Motor escovado

O motor escovado é responsável por realizar o movimento rotacional que estará acoplado ao moedor, de forma que o seu controle de velocidade será essencial para a boa qualidade da bebida. O circuito possui dois MOSFETs, que são acionadas eletronicamente e definem quando o motor deverá girar. Junto aos MOSFETs existe o *gate driver*, circuito integrado que impede o acionamento simultâneo dos dois *gate drivers*, gerando um curto-circuito na ponte e também protege os MOSFETs. No terminal central dos MOSFETs, existe um circuito composto por resistor e diodo, que faz com que o fluxo de corrente sentido de entrada seja dificultado pelo resistor. Entre os MOSFETs existe um diodo de roda livre que evita uma sobrecarrega os MOSFETs. A Figura 5.9 apresenta o circuito descrito acima.

Figura 5.9 – Motor escovado Old Style

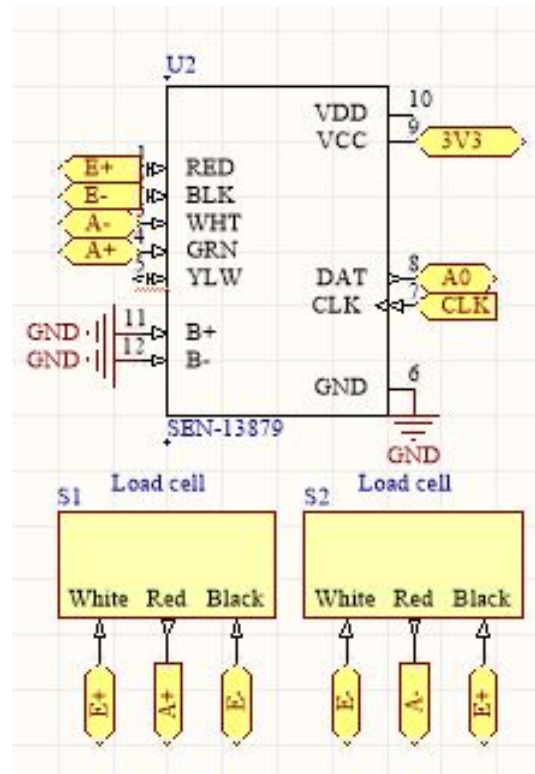


Fonte: (AUTOR,)

5.2.5 Célula de carga

A célula de carga será utilizada para medir o peso do café que será moído, sendo que, dois sensores serão utilizados, um para medir a compressão e outro para medir a tração, essa configuração se faz necessária para que um sensor elimine o erro do outro. Este sensor possui o código SEN-10245 e comunica com o circuito SEN-13879, que possui um circuito integrado responsável por amplificar o sinal obtido pelos sensores da célula de carga, uma vez que o sinal possui uma pequena variação, da ordem de *mohm* (*mili ohms*). A Figura 5.10 representa o diagrama esquemático da balança no sistema.

Figura 5.10 – Esquemático da balança



Fonte: (AUTOR,)

5.3 Software de controle

O Software desenvolvido para o controle do sistema foi desenvolvido na interface de desenvolvimento Arduino. Embora o microcontrolador utilizado seja o ESP32, é possível programá-lo utilizando a IDE do Arduino. Para o desenvolvimento da lógica, é preciso integrar os conhecimentos adquiridos durante o curso de graduação para conseguir implementar a leitura dos sensores, processamento dos dados para a lógica desejada, e enfim executar o controle dos motores. Como o código contempla diversos conceitos, haverá tópicos específicos para cada aplicação, com sua devida explicação e seus respectivos códigos.

5.3.1 Motor de passo unipolar

O motor que utiliza esta configuração é empregado no cilindro que fornece os grãos de café para o moedor. O motor de passo unipolar tem seus movimentos acionados por pulsos elétricos aplicados em suas bobinas. Devido à complexidade desta etapa, já existe uma biblioteca desenvolvida, pela qual é possível chamar métodos para escolher a velocidade do motor e realizar o movimento baseado em passos do motor. A Figura 5.11 apresenta um modelo implementado.

Figura 5.11 – Controle do motor de passo unipolar

```

#include <Stepper.h>
#define pinMP1Port 30
#define pinMP2Port 32
#define pinMP3Port 35
#define pinMP4Port 36

const int stepsPerRevolutionMPPort = 4096;
int passoReferenciaMPPort = 0; //Esta variavel representa o numero
//de passos que foi dado para n o perdermos a referencia
//do quanto preciso voltar, cada vez que o motor de passo rodar,
//devemos incrementar ou decrementar esta referencia,
//inicia com valor zero

Stepper myStepper(stepsPerRevolutionMPPort,
pinMP1Port, pinMP2Port, pinMP3Port, pinMP4Port);

void moverMPPort(int angulo) { //o angulo em graus
    int passo = (stepsPerRevolutionMPPort * angulo) / 360;
    passoReferenciaMPPort = passoReferenciaMPPort + passo;
    myStepper.step(passo);
}

void setup()
{
    pinMode(pinMP1Port, OUTPUT);
    pinMode(pinMP2Port, OUTPUT);
    pinMode(pinMP3Port, OUTPUT);
    pinMode(pinMP4Port, OUTPUT);

    //Determina a velocidade inicial do motor
    myStepper.setSpeed(stepsPerRevolutionMPPort);
}

void loop() {}

```

Fonte: (AUTOR,)

5.3.2 Motor de passo bipolar

Os motores de passo bipolares possuem um funcionamento diferente dos unipolares. Para o acionamento deste motor, será utilizado o *driver* TB6600, contudo, o acionamento deste *driver* deve ser feito pelo microcontrolador com três sinais de controle, são eles: o acionamento do motor, a definição do sentido giro

e o número de pulsos elétricos que é convertido em número de passos do motor. Para este *driver* não existe biblioteca implementada, por isso, as funções serão desenvolvidas manualmente, as quais podem ser vistas na Figura 5.12, onde a função de acionamento deste motor é implementada.

Figura 5.12 – Controle do motor de passo bipolar

```

#define pinMPEnableMoedor 8
#define pinMPDirecaoMoedor 9
#define pinMPPulsoMoedor 10
const double configPassoMPMoedor = 1;
const int stepsPerRevolutionMPMoedor =
200/configPassoMPMoedor;
int passoReferenciaMPMoedor = 0;
void sentidoHorarioMotorBipolar(){
    digitalWrite(pinMPDirecaoMoedor,LOW);
}
void sentidoAntiHorarioMotorBipolar(){
    digitalWrite(pinMPDirecaoMoedor,HIGH);
}
void ligaMotorBipolar(){
    digitalWrite(pinMPEnableMoedor,HIGH);
}
void desligaMotorBipolar(){
    digitalWrite(pinMPEnableMoedor,LOW);
}
void giraMotorBipolar(int angulo, int velocidade){
    ligaMotorBipolar();
    int s = 1;
    if(angulo > 0) sentidoAntiHorarioMotorBipolar();
    else {
        sentidoHorarioMotorBipolar();
        s = -1;
    }
    int passo = (stepsPerRevolutionMPMoedor*abs(angulo))
/360;
    passoReferenciaMPMoedor += s*passo;

    tone(pinMPPulsoMoedor,frequecia,
((passo*1000)/velocidade));
}
void setup(){
    pinMode(pinMPEnableMoedor,OUTPUT);
    pinMode(pinMPDirecaoMoedor,OUTPUT);
    pinMode(pinMPPulsoMoedor,OUTPUT);
}
void loop(){}
```

Fonte: (AUTOR,)

5.3.3 Motor escovado

O motor escovado será utilizado com o intuito de gerar o movimento rotativo do moedor. Para isto, é preciso gerar um sinal PWM que controlam o acionamento dos MOSFETs. O código responsável pelo acionamento deste motor é visto na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Controle do motor escovado

```
#define PWM1 6
#define PWM2 7

void girarMotor(int velocidade){
    int velPWM = 0;
    map(velPWM,0,22000,0,255);
    analogWrite(PWM1,velPWM);
    digitalWrite(PWM2,HIGH);
}

void travarMotor(){
    digitalWrite(PWM1,LOW);
    digitalWrite(PWM2,LOW);
}

void setup() {
    pinMode(PWM1,OUTPUT);
    pinMode(PWM2,OUTPUT);
    digitalWrite(PWM2,LOW)
}

void loop() {}
```

Fonte: (AUTOR,)

5.3.4 Balança

A balança é parte essencial do projeto, pois, por ela serão obtidos os sinais de controle para os demais componentes do sistema. O código que processa os dados obtidos pelos sensores do tipo extensômetro é apresentado na Figura 5.14,

cujo código faz uso de uma biblioteca que é responsável pelo funcionamento do conversor.

Figura 5.14 – Leitura de peso da balança

```
#include "HX711.h"
#define pinoDAT 5;
#define pinoCLK 19;

HX711 balanca;

long ler{
    while((balanca.is_ready())){
    }
    return balanca.read();
}

void setup() {
    //Serial.begin(57600);
    balanca.begin(pinoDAT, pinoCLK);
}

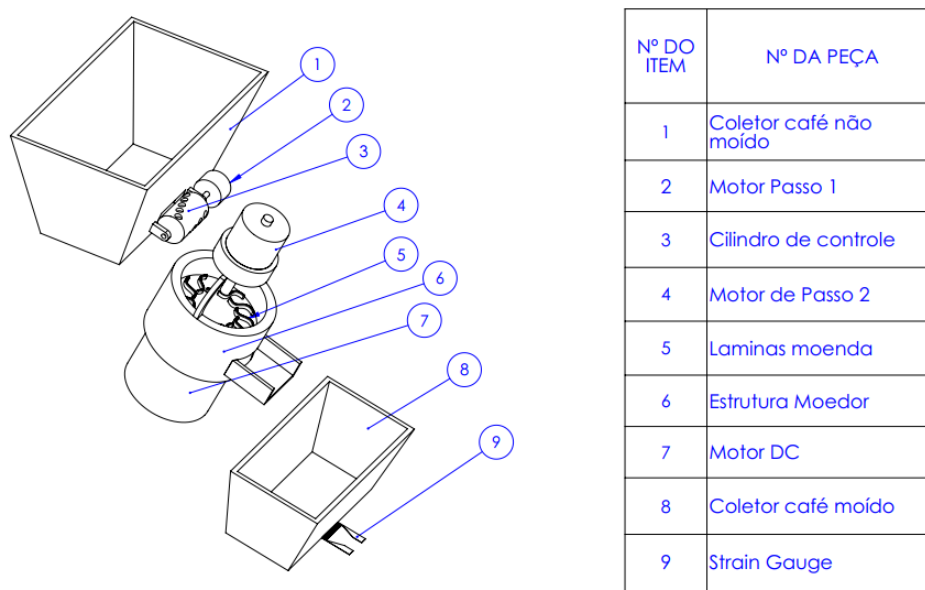
void loop() {
}
```

Fonte: (AUTOR,)

5.4 Esquemático mecânico

O projeto conta com 9 tipos de peças estruturais, que juntas compõem o esquema mecânico do moedor. A Figura 5.15 ilustra a composição, de modo que cada peça é explicado individualmente nesta mesma seção.

Figura 5.15 – Esquemático Geral do Moedor



Fonte: (AUTOR,)

A peça de número 1, é responsável pela armazenagem do grão do café ainda não moído. A de número 2, é o motor de passo responsável por manter o fluxo de café para dentro do moedor. A de número 3 é o controlador que, com auxílio do motor de passo, coleta o grão do tanque de armazenagem e o joga para o moedor. Como pode ser visto, nessa peça, há vários furos suficientemente pequenos para a passagem de apenas um grão por vez, além disso, para cada 30 graus que o motor de passo é rotacionado, cai no máximo um grão, assim, a discretização do esquema se torna mais precisa. Isso garante um ajuste fino, o que elimina a necessidade de uma realimentação do motor responsável pelo depósito do grão de café.

A proposta dessa disposição de componentes se baseia em uma malha de controle fechada desde o final do processo de moagem até o início do mesmo, em outras palavras, o cilindro permite a passagem de café apenas se o pó de café não for suficiente para o preparo da bebida. Contudo, não existe a necessidade

de conhecer a posição em que o motor do cilindro se encontra, uma vez que só é preciso saber a variação de seu movimento, pois a cada 30° um grão de café é depositado no moedor, esta configuração é suficiente para a o objetivo proposto.

Já a peça de número 4 (motor de passo) tem a função de controlar o par de lâminas paralelas e com fio (peça de número 5), responsável por quebrar os grãos de café até a granulometria desejada. Inicialmente, o grão será quebrado a uma distância entre as lâminas maior, até que se tenha uma granulometria média, depois, as lâminas terão sua distância encurtada para que se termine o processo de moagem até que se tenha o tamanho previamente estabelecido. Este processo garante uma menor transferência de calor para o grão, o que mantém uma temperatura baixa, e assim conservar suas características, tais como aroma e sabor.

Já o componente de número 6, garante a montagem e a fixação das peças de número 4,5 e 7.

A peça de número 7, tem a função de girar as lâminas para moer os grãos. Esse motor CC, terá um controle de velocidade que garante uma velocidade de moagem adequada para que não mude a coloração da torra e assim conservar suas características. Para tal, será enviado um sinal de entrada para ligar o motor e definir a velocidade desejada, assim, terá um sinal proporcional a velocidade real, o qual será enviado para o controlador, responsável por calcular o erro e reenviar o sinal corrigido. Já a peça 8 conterá os grãos moídos, resultados da etapa de processo anterior.

O componente de número 9, extensômetro, fará a medição do produto contido no compartimento, e comparará com o valor estabelecido. Assim como o motor CC, esse componente também terá um controle em malha fechada, que após fazer uma leitura, envia o sinal para o controlador que calculará o erro e reenvia o sinal para um possível correção.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações Finais

O desenvolvimento do presente estudo possibilitou uma análise tanto econômica quanto técnica da viabilidade da automação de uma máquina de café expresso do tipo automatizada para uma melhora na qualidade do produto final, bem como a redução de consumo do principal insumo no preparo da bebida.

Dadas as análises da sessão 4 deste trabalho, e tomando como base a concepção 3 descrita na sessão 3.2.4, foram analisadas as viabilidades econômicas com as ferramentas *VPL*, *TIR* e *PayBack*. Todos os 3 parâmetros analisados foram a favor do implementação da automação do sistema, o que corrobora com a tese do trabalho.

Vale ressaltar que os valores para análise levaram em consideração a constante de valor entre os dois sistemas, e não o aumento do preço pelo valor agregado à melhora na qualidade da bebida. Se esse aumento fosse computado, as análises teriam um maior peso para a alternativa adicional.

Além do ganho econômico já mencionado, há também o ganho técnico, com sistemas computadorizados e mecânicos, os quais controlam os mecanismos e funções do processo da moagem do pó de café, conectando todos os processos da operação. Tal ganho técnico resulta em uma bebida mais saborosa e com um controle de qualidade satisfatório, uma vez que o processo será monitorado pela garantir tal qualidade. O aumento da produtividade e da eficiência do processo, também é um diferencial, pois com o maquinário mais autônomo há menos geração de resíduo e um menor tempo de manutenção das máquinas.

6.2 Trabalhos futuros

Esse trabalho teve como limitação a implementação do sistema da conectividade de rede das máquinas, cujo trabalho é apresentado como a internet das

coisas (IOT); bem como o armazenamento dos dados na nuvem, o que ampara o trabalhos futuros a desenvolver novos sistemas e novas tecnologias a partir do esquemático de *hardware* empregado neste trabalho. Tais tecnologias, alinhadas á mineração de dados em Big-Data, e em comunicação com um aplicativo, o qual pode ser responsável por garantir uma comunicação do usuário via *smartphones* com as máquinas. Com isso, será possível dar autonomia ao usuário, para que o mesmo possa preparar o café da forma que mais lhe agrada, além de criar uma interface de simples utilização.

Tais soluções, podem gerar a este projeto vantagens competitivas, o que o põe à frente dos outros concorrentes ao lançar esse produto no mercado, uma vez que o controle desses processos em cafeteiras inteligentes é pouco difundido.

REFERÊNCIAS

- ABIC. **Estatísticas**. 2019. Disponível em: <<http://abic.com.br/estatisticas/>>.
- AUTOR do. **do Autor**.
- BARR, M. Pulse width modulation. **Embedded Systems Programming**, v. 14, n. 10, p. 103–104, 2001.
- CEMIG. **SAIBA MAIS SOBRE TARIFAS E BENEFÍCIOS TARIFÁRIOS**. 2018. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Paginas/valores_de_tarifa_e_servicos.aspx>.
- CUSTÓDIA, S. E. de Liquidação e. **Taxa SELIC**. 2018. Disponível em: <https://portalbrasil.net/2018/indices/indices_selic.htm>.
- FEDERAL, R. **"INSTRUÇÃO NORMATIVA SRF Nº 162, DE 31 DE DEZEMBRO DE 1998"**. 2016.
- FOLMER, B. **The craft and science of coffee**. [S.l.]: Academic Press, 2016.
- GUADAGNINI, P. H.; ROCHA, F. d.; BARLETTE, V. Projeto de um sensor eletrônico baseado em extensometria para medição de força. 2011.
- JANG, G.; KIM, M. G. A bipolar-starting and unipolar-running method to drive an hdd spindle motor at high speed with large starting torque. **APMRC 2004 Asia-Pacific Magnetic Recording Conference, 2004.**, p. 36–37, 2004.
- KIEBURTZ, R. The step motor—the next advance in control systems. **IEEE Transactions on Automatic Control**, IEEE, v. 9, n. 1, p. 98–104, 1964.
- LOMBANA, C. A.; PHILLIPS, R. M.; GREGG, R. **Instant coffee compositions exhibiting a crystalline sheen**. [S.l.]: Google Patents, 1972. US Patent 3,652,293.
- MORAES, R. d. P.; TRUGO, L. C. Efeito da torrefação e da granulometria na composição química do café. 2001.
- NETO, C. D. et al. Desenvolvimento de uma plataforma de força em pedal de ciclismo. **Revista Brasileira de Biomecânica**, v. 2, n. 3, p. 39–44, 2001.
- OLIVEIRA, M. H. d. F. **A avaliação econômico-financeira de investimentos sob condição de incerteza: uma comparação entre o método de Monte Carlo e o VPL fuzzy**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2008.
- RESOURCE, A. S. C. A. **Coffee Standards**. 2019. Disponível em: <<https://sca.coffee/research/coffee-standards/>>.

ROMERO, A. A. L. S.; BARBANO, E. C.; MISOGUTI, L. Sistema computadorizado para deslocamento de amostra com motor de passo utilizando o L298: aplicaÃ§Ã£o de varredura-Z. **Revista Brasileira de Ensino de FÃsica**, scielo, v. 41, 00 2019. ISSN 1806-1117. DisponÃvel em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-11172019000400403&nrm=iso>.

SALOMON, V. A. P. AuxÃlio Ã decisÃo para a adoÃÃo de polÃticas de compras. **Produto & ProduÃo**, v. 6, n. 1, 2002.

SANTOS, J. DisponÃvel em: <encurtador.com.br/cdzC5,year=2019,title=>.

TAKECOFFEE. **Precisamos conversar sobre manutenÃo de mÃquinas de cafÃ**. 2019. DisponÃvel em: <<http://takecoffee.com.br/precisamos-conversar-sobre-manutencao-de-maquinas-de-caffe/>>.

URBECAFE. **"GUIA DE MOAGEM DE CAFÃ"**. 2018. DisponÃvel em: <<https://www.urbecafe.com.br/pages/guia-de-moagem-de-caffe>>.