



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA  
BAHIA (IFBA), CAMPUS JEQUIÉ**

Felipe Soares Mendes

**SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA USO ACADÊMICO**

Jequié-BA  
2024

Felipe Soares Mendes

**SOLDAGEM POR RESISTÊNCIA ELÉTRICA PARA USO ACADÊMICO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC)  
apresentado à disciplina de TCC, aos docen-  
tes Fabiano Borges e Rita Queiroz como re-  
quisito parcial para conclusão do curso.

**Comissão Examinadora**

---

Prof. Dra. Mirella Nagib de Oliveira Boery - IFBA  
(Orientadora)

---

Prof. Me. Luis Fernando Barbosa Brito - IFBA

---

Prof. Esp. Roberto Oliveira Correia de Brito - PETROBRAS  
(Coorientador)

Jequié-BA  
2024

# Resumo

O processo de soldagem por resistência elétrica, inventado por Elihu Thomson, é um dos principais métodos para soldar chapas metálicas em diversos setores industriais. Diante disso, é imprescindível que futuros profissionais tenham conhecimento teórico e prático dessa metodologia, desta forma, foi verificado que o IFBA, *campus* Jequié carece de um equipamento para ensino prático desse método. Este estudo propõe o desenvolver o projeto de um equipamento de soldagem por resistência elétrica para uso acadêmico, através de modelagem tridimensional, que será destinada a unir permanentemente peças metálicas de pequenas espessuras. Os cálculos e a modelagem do equipamento foram desenvolvidos, em sua maior parte, visando utilizar componentes disponíveis no Instituto, a fim de reutilizar materiais, reduzir custos e ter um projeto sustentável. O equipamento será acionado por um pedal elétrico, movendo o atuador que aproxima as faces das peças a serem soldadas e libera uma corrente de curto-circuito para fundir a região. Ele inclui mecanismos de movimentação, acionamento elétrico, controle automático e módulos de segurança para garantir uma operação/manutenção adequada. O projeto detalhado abrange modelagem tridimensional, desenhos técnicos das peças do sistema mecânico, diagramação elétrica e de controle, além de uma lista de materiais. As simulações mecânicas foram realizadas a fim de garantir que o equipamento suporte os esforços mecânicos do processo de soldagem, buscando atingir padrões de eficiência comparáveis aos equipamentos industriais. Por fim, o estudo e irá contribuir significativamente para a formação prática dos estudantes, além de servir de referência para um posterior desenvolvimento de um protótipo, sendo não somente um meio de aprendizado prático, mas inovador.

**Palavras-chave:** Ponteadeira; RSW; Tecnologias de soldagem; Máquina didática; Solda ponto.

# Abstract

The process of electrical resistance welding, invented by Elihu Thomson, is one of the main methods for welding metal sheets in various industrial sectors. Therefore, it is essential that future professionals have both theoretical and practical knowledge of this methodology. It has been noted that the IFBA, Jequié campus lacks equipment for practical teaching of this method. This study proposes the development of a project for an electrical resistance welding machine for academic use, through three-dimensional modeling, intended to permanently join small thickness metal pieces. The calculations and modeling of the equipment were mostly developed to use components available at the Institute, aiming to reuse materials, reduce costs, and create a sustainable project. The equipment will be operated by an electric pedal, moving the actuator that brings the faces of the pieces to be welded together and releases a short-circuit current to fuse the region. It includes movement mechanisms, electric actuation, automatic control, and safety modules to ensure proper operation/maintenance. The detailed project includes three-dimensional modeling, technical drawings of the mechanical system parts, electrical and control diagramming, as well as a material list. Mechanical simulations were performed to ensure that the equipment can withstand the mechanical stresses of the welding process, aiming to achieve efficiency standards comparable to industrial equipment. Finally, the study will significantly contribute to the practical training of students and serve as a reference for the subsequent development of a prototype, serving not only as a means of practical learning but also as an innovative one.

Keywords: Spot welder; RSW; Welding technologies; Didactic machine; Spot welding.

**Keywords:** Spot welder; RSW; Welding technologies; Educational machine; Spot welding.

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>6</b>
<b>1.1</b>	<b>Motivação</b>	<b>6</b>
1.1.1	Objetivo geral	7
1.1.2	Objetivos Específicos	7
<b>1.2</b>	<b>Estrutura do Trabalho</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>Soldagem por resistência elétrica</b>	<b>8</b>
2.1.1	Solda por ponto	9
<b>2.2</b>	<b>Parâmetros de soldagem</b>	<b>9</b>
2.2.1	Corrente elétrica	10
2.2.2	Tempo	10
2.2.3	Pressão	10
<b>2.3</b>	<b>Geração de calor</b>	<b>11</b>
2.3.1	Lei de Joule	11
<b>2.4</b>	<b>Equipamento de soldagem</b>	<b>11</b>
2.4.1	Eletrodos	13
2.4.2	Atuador linear elétrico	13
<b>2.5</b>	<b>Manufatura aditiva</b>	<b>14</b>
<b>2.6</b>	<b>Transformadores</b>	<b>14</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>17</b>
<b>3.1</b>	<b>Plano de trabalho</b>	<b>17</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>19</b>
<b>4.1</b>	<b>Projeto conceitual</b>	<b>19</b>
<b>4.2</b>	<b>Estrutura e carcaça</b>	<b>21</b>
<b>4.3</b>	<b>Sistema de acionamento</b>	<b>23</b>
<b>4.4</b>	<b>Sistema elétrico</b>	<b>31</b>
<b>4.5</b>	<b>Sistema de controle</b>	<b>35</b>
<b>4.6</b>	<b>Sistema de refrigeração</b>	<b>37</b>
<b>4.7</b>	<b>Eletrodos</b>	<b>38</b>
<b>4.8</b>	<b>Lista de materiais</b>	<b>40</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>42</b>

**REFERÊNCIAS . . . . . 44**

# 1 Introdução

A soldagem por resistência, inventada por Elihu Thomson em 1877, é o principal método de unir chapas metálicas em diversas indústrias, inicialmente era utilizado para unir apenas fios de cobre, Thomson logo percebeu que essa técnica poderia ser estendida a outros materiais. Desde a introdução da primeira chapa automotiva soldada em 1933, a soldagem por resistência tem experimentado um significativo crescimento (BRANCO, 2004). De acordo com Christofolletti (2013), atualmente, mais de 90% do processo de montagem em uma carroceria de veículo são feitos por meio da operação de *resistance spot welding* ou RSW, o que equivale a aproximadamente 3.000-6.000 soldas por pontos.

Segundo Branco (2004), a soldagem por ponto é uma subclassificação da soldagem por resistência elétrica, é o processo de soldagem mais utilizado na montagem de carrocerias automotivas, pelo seu baixo custo, ótima qualidade superficial e zonas térmicas menores em relação a outros processos de soldagem. Em contrapartida, de acordo com Christofolletti (2013), esse processo demanda um alto custo, devido ao equipamento de soldagem, eletrodos e o elevado uso de energia elétrica, além de ser difícil definir os parâmetros para realizar uma solda com uma boa qualidade.

Para um engenheiro mecânico é de fundamental importância ter conhecimento teórico e prático sobre este processo de soldagem, sendo um diferencial para o mercado de trabalho, pois mesmo que sua maior aplicabilidade seja no setor automotivo, esse método de soldagem pode ser empregado em qualquer indústria, pela vantagem de soldar diferentes materiais e diversos tipos de peças.

Pereira et al. (2016) efetuaram algumas pesquisas de campo com os discentes de uma determinada universidade que aponta que 95% dos entrevistados concordam que as aulas práticas de soldagem são importantes, enquanto 2% disseram que não eram importantes e 3% abstiveram-se. Em outra pesquisa, evidenciou-se que quase todos entrevistados (cerca de 94%) achavam que a máquina contribuía para o aprendizado.

Deste modo, é notório que este processo de soldagem vem ganhando força a cada dia, desta forma, foi observada a necessidade de se ter um equipamento como esse no campus para as aulas do curso de engenharia mecânica. Portanto, o presente estudo propôs a desenvolver o projeto de um equipamento de soldagem por ponto para uso acadêmico para auxiliar em aulas de processo de fabricação por soldagem.

## 1.1 Motivação

O atual cenário industrial necessita de profissionais altamente capacitados, capazes de enfrentar desafios e buscar soluções criativas. Neste contexto, a soldagem por resistência

elétrica desempenha um papel importantíssimo, sendo uma técnica vital para unir peças metálicas com eficiência e precisão.

Pelas crescentes necessidades da indústria, em especial no setor automobilístico, a iniciativa de desenvolver o estudo para simulação de um equipamento de soldagem por resistência elétrica surge como resposta a uma demanda crucial e até então não atendida, a ausência de um equipamento de soldagem por resistência elétrica nos laboratórios do *campus*.

Ao abordar a simulação desse equipamento sob uma perspectiva mais ampla, visa-se não apenas suprir uma lacuna educacional no âmbito acadêmico, mas também endereçar uma necessidade urgente das indústrias.

Assim, este projeto não é apenas uma resposta às carências educacionais, mas também um investimento na capacitação de profissionais que serão peças-chave na indústria, impulsionando a inovação e a competitividade regional. O estudo e simulação dessa máquina não é apenas um avanço acadêmico, mas uma contribuição tangível para o desenvolvimento industrial e a formação de uma mão de obra qualificada no setor automobilístico e em outras indústrias afins.

### 1.1.1 Objetivo geral

Desenvolver o projeto de um equipamento de soldagem por resistência elétrica por ponto para uso acadêmico.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

1. Elaborar o projeto conceitual do protótipo;
2. Formular o projeto detalhado do equipamento;
3. Executar simulações mecânicas dos componentes;

## 1.2 Estrutura do Trabalho

O presente estudo foi organizado em capítulos, começando pelo Capítulo 1, que trata da introdução ao tema, dos objetivos, das hipóteses e da justificativa do estudo.

No Capítulo 2, foi abordado a fundamentação teórica de conceitos e temas relevantes. O Capítulo 3 detalha os procedimentos metodológicos adotados para o desenvolvimento do trabalho. No Capítulo 4 apresenta os resultados encontrados, incluindo todo projeto e simulações mecânicas.

Por fim, o Capítulo 5 abrange as considerações finais do projeto, juntamente com as sugestões do autor para futuros estudos.

## 2 Referencial Teórico

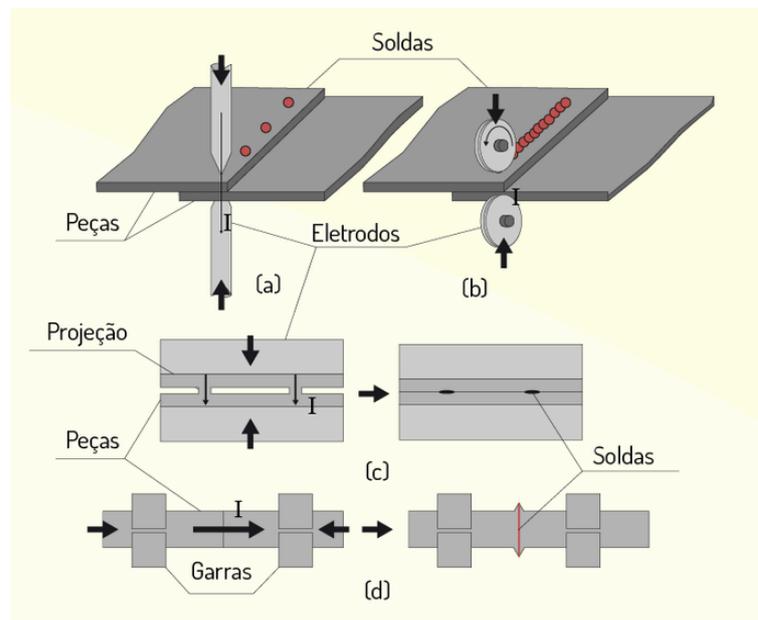
### 2.1 Soldagem por resistência elétrica

A soldagem por resistência elétrica é o principal método de união de peças sobrepostas em diversos ramos industriais. Pela sua boa qualidade, baixo custo e geração de um aquecimento localizado, que resulta em uma menor distorção da peça, esse método de soldagem está muito presente na indústria, principalmente na automobilística, para montagem de carrocerias por exemplo (BRANCO, 2004).

De acordo com Marimax (2004), esse método de soldagem consegue realizar a união de diversos materiais metálicos, como alumínio, níquel, zinco, cobre, prata, ouro, platina, ligas como a de latão, entre outros. Essa vantagem se dá pela possibilidade de controlar seus parâmetros, como a corrente elétrica do sistema, a pressão entre os eletrodos e o tempo que a corrente passará pelo material, assim pode-se aumentar ou reduzir o calor que será fornecido para a superfície da peça, conseguindo assim soldar materiais de diferentes pontos de fusão.

Existem quatro processos principais de soldagem por resistência: (A) soldagem por ponto (Resistance Spot Welding, RSW), (B) soldagem por costura (Resistance Seam Welding, RSEW), (C) soldagem de projeção (Resistance Projection Welding, RPW) e (D) soldagem de topo por resistência (Upset Welding, UW).

Figura 1 – Principais tipos de soldagem por resistência elétrica.

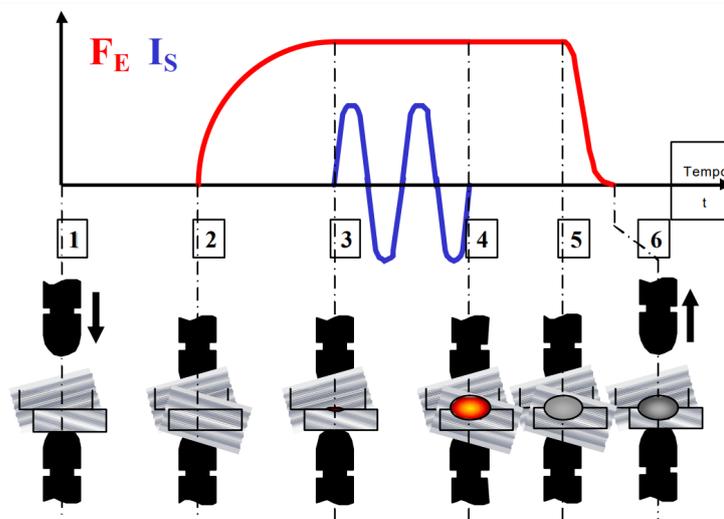


Fonte: Branco (2004).

### 2.1.1 Solda por ponto

Segundo Bracarense (2000), o processo de soldagem por ponto envolve a aplicação de uma pressão entre as peças a serem unidas, utilizando eletrodos que não se consomem. Através desses eletrodos, uma corrente elétrica de alta intensidade é conduzida, de acordo com a Lei de Joule, gerando uma quantidade de calor diretamente proporcional ao tempo, à resistência elétrica e à intensidade da corrente. Essa quantidade de calor fará com que a região de contato das peças alcancem o ponto de fusão.

Figura 2 – Processo de soldagem por ponto.



Fonte: Branco (2004).

Conforme Branco (2004), no começo do processo, etapa 1, é iniciada a descida dos eletrodos, pressionando as chapas. O objetivo é assegurar um assentamento adequado, evitando problemas como a expulsão de metal fundido da zona de solda, que é tratado na Etapa 2. Na Etapa 3, os eletrodos permanecem sob pressão, enquanto a corrente de soldagem é ativada, dando início à formação do ponto de solda. Com o ponto de solda formado na Etapa 4, a corrente de soldagem é desligada, mas a pressão dos eletrodos é mantida para solidificar o ponto de solda. Após a completa solidificação do ponto de solda, a força de soldagem exercida pelos eletrodos é desativada, o que acontece nas Etapas 5 e 6, permitindo o levantamento dos eletrodos.

## 2.2 Parâmetros de soldagem

De acordo com Christofolletti (2013), os parâmetros de soldagem são as variáveis do procedimento que asseguram a realização da soldagem com eficácia, qualidade e resistência, influenciando assim a características mecânicas da junta soldada. Na técnica de

soldagem por resistência elétrica, destacam-se três parâmetros fundamentais: a corrente de soldagem, a pressão aplicada aos eletrodos e o tempo que a corrente flui entre as peças.

Além disso, é importante destacar que outros fatores podem influenciar na qualidade e resistência do ponto de solda, como por exemplo a superfície de contato (irregularidades, corrosão, porosidade), intempéries, geometria e espessuras das peças entre outros fatores.

### 2.2.1 Corrente elétrica

A geração de calor é principalmente influenciada pela corrente de soldagem, sendo este o fator de maior impacto. A magnitude da corrente tem um efeito significativo sobre a qualidade da solda. No processo de soldagem, a corrente pode ser alternada ou contínua. Existem diversos defeitos provenientes do uso de uma corrente elétrica não adequada, dentro eles: rebarbas no ponto, ponto solto e ponto profundo. A escolha da corrente elétrica ideal depende de diversos fatores, principalmente do material que será soldado, geometria e espessura das peças (SOARES et al., 2021).

### 2.2.2 Tempo

O parâmetro "tempo" é dividido, principalmente, em: tempo de acostamento, tempo de pré-pressão, tempo de subida da corrente e tempo de corrente.

Deste modo, o mais importante para a qualidade do ponto de solda é o tempo de corrente. Sendo o tempo necessário para que a corrente flua e realize a soldagem. a duração da corrente afeta diretamente a quantidade de calor gerada. Basicamente, utiliza-se o tempo para controlar a formação do botão de solda, que é essencial para alcançar a resistência mecânica requerida na junta soldada. Quanto mais longo for o período em que a corrente flui, maior será o tamanho do botão de solda, até atingir o limite do diâmetro do eletrodo utilizado. À medida que o tempo de soldagem diminui, o tamanho do botão de solda reduz-se rapidamente (BRACARENSE, 2000).

### 2.2.3 Pressão

De acordo com Soares et al. (2021), a força aplicada tem o propósito de unir as chapas a serem soldadas, estabilizando sua posição e estabelecendo o contato necessária para a corrente elétrica fluir pelas peças. Assim, a tensão mecânica gerada por essa força atua antes, durante e após a aplicação da corrente de soldagem. Este é um parâmetro crítico para a qualidade da junta soldada. A força pode ser gerada por meio de sistemas hidráulicos, pneumáticos ou mecânicos.

## 2.3 Geração de calor

### 2.3.1 Lei de Joule

O calor necessário para o processo de soldagem por resistência resulta da resistência oferecida pelo material base à passagem da corrente elétrica, conhecida como efeito Joule. Devido ao percurso elétrico reduzido no material base e ao tempo limitado disponível para a soldagem, é preciso empregar correntes de soldagem relativamente elevadas para alcançar a quantidade de calor de soldagem necessária (BRANCO, 2004).

Ainda segundo Branco (2004), a lei de Joule é dada por;

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I^2 R dt \quad (2.1)$$

Onde:

- $Q$  = Calor gerado ( $J$ ).
- $t$  = Tempo de duração da corrente ( $s$ ).
- $I$  = Corrente elétrica ( $A$ ).
- $R$  = Resistência elétrica do material ( $\Omega$ ).

Uma parte da energia gerada durante o processo de soldagem é usada para fundir os materiais e criar o “botão de solda”, enquanto outra parte é dissipada devido à condução, convecção e radiação, se perdendo no material de base e no eletrodo. A quantidade exata dessas perdas geralmente não é mensurada.

Embora a corrente elétrica usada na soldagem seja consistente em todas as partes do circuito, a quantidade de calor produzida varia dependendo da resistência do local em questão. Na máquina de soldagem, o circuito secundário compreende várias resistências, sendo a maior delas encontrada na interface entre os materiais que estão sendo soldados, seguida pela resistência do material de base. As outras resistências no circuito são relativamente insignificantes em comparação com essas duas principais.

## 2.4 Equipamento de soldagem

Os equipamentos utilizados para realizar os pontos de solda são chamados de máquinas de soldagem por resistência elétrica. Todas as máquinas de soldagem por resistência apresentam, basicamente, três componentes fundamentais: sistema mecânico, circuito primário e sistema de controle (BRANCO, 2004).

- O sistema mecânico é aquele no qual a peça é fixada e a força do eletrodo é aplicada;

- O circuito primário consiste de um transformador, cuja função é regular a corrente de soldagem;
- O sistema de controle pode atuar somente sobre o tempo de soldagem ou também sobre a ação mecânica da aplicação da força do eletrodo;

Esses três componentes regulam as variáveis mais importantes na soldagem por resistência, isto é, a força do eletrodo, a intensidade da corrente e o tempo de passagem da corrente de soldagem (WAINER et al., 1992).

De acordo com MFG (2023), existem diversas categorias de equipamentos de soldagem por pontos, as principais e mais impactantes nas características do aparelho de soldagem são:

1. De acordo com o número de pontos de soldagem feitos ao mesmo tempo:
  - Ponto único;
  - Ponto duplo;
  - Multipontos;
2. De acordo com o modo de transmissão do mecanismo de pressão:
  - Acionamento manual;
  - Pneumáticos;
  - Hidráulicos;
  - Eletromecânico;
3. De acordo com as características de funcionamento:
  - Não automatizado;
  - Automatizado;
4. De acordo com o método de instalação, podem ser divididas em:
  - Estacionárias;
  - Móveis;
  - Suspensas;
5. De acordo com a direção do movimento do eletrodo móvel (geralmente o eletrodo superior), eles podem ser divididos em:
  - Curso vertical (ou linear);
  - Curso circular (ou balancim);

Cada classificação atende a um tipo de aplicação, é imprescindível analisar as características do processo que o equipamento será submetido e dimensionar a máquina para atender as necessidades impostas pelo projeto. Parâmetros como: material a ser soldado, geometria das peças, produtividade requerida, custo, devem ser levados em conta no processo de escolha da soldadora.

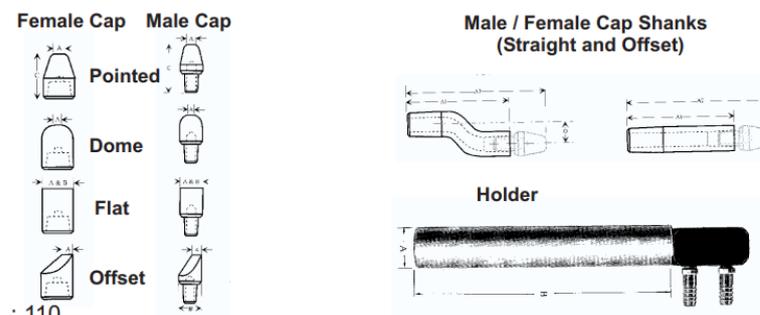
### 2.4.1 Eletrodos

De acordo com Wainer et al. (1992), os eletrodos mantêm um contato direto com a peça a ser soldada, conduzem a corrente de soldagem, aplicam pressão na região a ser unida e dissipam parte do calor gerado durante o processo de soldagem. Portanto, é essencial que esses eletrodos sejam projetados para suportar densidades de corrente variando de 800 a 10.000 A/cm<sup>2</sup> e pressões entre 70 a 400 MPa, tudo isso sem deformação, mantendo propriedades mecânicas excepcionais, especialmente em elevadas temperaturas. Além disso, é importante que não ocorra formação de liga com o metal a ser soldado.

“As ligas para os eletrodos devem ter temperatura de recozimento elevada, grande resistência à compressão e boa resistência ao atrito. Esses requisitos são conseguidos com ligas cobre-cromo, cobre-cromo-zircônio, cobre-cadmio, cobre-berilo etc.” (WAINER et al., 1992)

Existem diversos tipos de eletrodos que podem ser usados nesse processo, cada um com sua aplicabilidade, Correia (2017) ilustra os comumente usados nesse processo:

Figura 3 – Tipos de eletrodos.



Fonte: Correia (2017).

### 2.4.2 Atuador linear elétrico

De acordo com Martins (2016), um atuador elétrico converte energia elétrica em energia mecânica e é usado em conjunto com dispositivos de controle e posicionamento. Ele recebe comandos e envia dados de funcionamento ao sistema, podendo ser controlado manualmente ou remotamente. São empregados em diversas indústrias para automatizar processos e podem ser aplicados em dumpers, fornos, válvulas, entre outros.

A função principal é realizar movimentação mecânica, podendo ser horizontal, vertical, oscilatória ou giratória, e são úteis para automatizar portões, poltronas, camas hospitalares, entre outros. Podem abrir ou fechar válvulas em locais de difícil acesso, sendo indicados para funções como bloqueio, compressão, ejeção, aperto, entre outros. Os atuadores lineares elétricos convertem movimento rotacional em movimento linear e são compostos por fuso trapezoidal, engrenagens, chaves fim de curso e uma haste (MARTINS, 2016).

São eficientes energeticamente, integráveis com controladores programáveis e mais econômicos que modelos hidráulicos e pneumáticos. Podem ser utilizados em uma ampla gama de aplicações industriais e domésticas, como equipamentos agrícolas, máquinas de mineração e construção, assentos, portas, válvulas, entre outros.

## 2.5 Manufatura aditiva

A tecnologia de fabricação tridimensional, também chamada de manufatura aditiva, está presente há muitos anos, em 1984 a primeira impressora 3D funcional foi desenvolvida por Charles W. Hull, da 3-D Systems Corp (G.HARSHAVARDHAN et al., 2014) Ela opera depositando material em camadas sucessivas até que a peça desejada seja formada. Esse método difere de outros processos de fabricação, como perfuração, forjamento e soldagem, onde o material é removido para moldar a peça (SILVA et al., 2018).

Ainda segundo Silva et al. (2018), a relevância da manufatura aditiva é notável nos últimos anos, pois introduz um novo paradigma de produção, baseado na adição de material em vez da sua subtração. Isso possibilita um alto grau de personalização dos objetos. Quatro características cruciais podem ser destacadas:

- Utilização de uma tecnologia de fabricação universal baseada em modelos;
- Ausência de custos adicionais associados à complexidade do design;
- Customização e flexibilidade são inerentes ao processo;
- Produtos integrados funcionalmente têm o potencial de reduzir significativamente a necessidade de montagem;

## 2.6 Transformadores

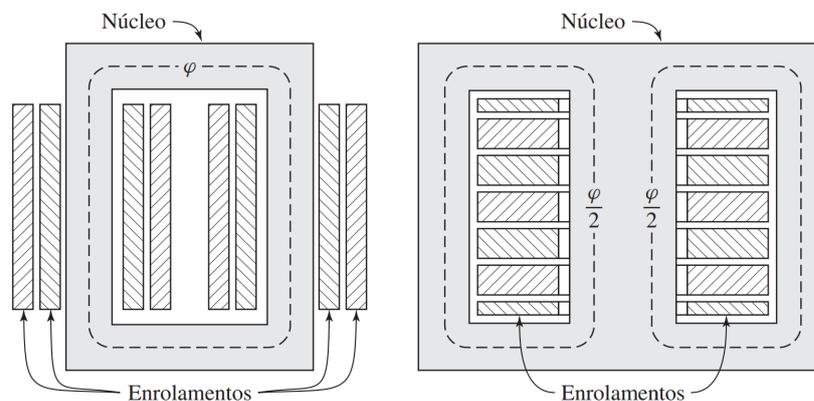
A ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) define transformador como: “Um dispositivo que por meio da indução eletromagnética, transfere, energia elétrica de um ou mais circuitos (primário) para outro ou outros circuitos (secundário), usando a mesma frequência, mas geralmente, tensões e intensidades de correntes diferentes.”.

Em essência, um transformador é composto por dois ou mais enrolamentos interligados por um fluxo magnético compartilhado. Se um desses enrolamentos, chamado de

primário, for conectado a uma fonte de tensão alternada, será gerado um fluxo alternado cuja intensidade dependerá da tensão aplicada no primário, da frequência dessa tensão e do número de espiras. Parte desse fluxo, conhecido como fluxo mútuo, passa por um segundo enrolamento, o secundário, induzindo nele uma tensão que depende do número de espiras do secundário, bem como da magnitude do fluxo compartilhado e da frequência. Estabelecendo-se uma proporção adequada entre o número de espiras do primário e do secundário, é possível obter praticamente qualquer relação de tensões, ou relação de transformação (UMANS, 2014).

Ainda de acordo com (UMANS, 2014), para diminuir as perdas no núcleo, o circuito magnético é geralmente composto por uma pilha de chapas finas. Existe dois tipos mais comuns de construção, no tipo de núcleo com envolvimento, os enrolamentos envolvem duas pernas de um núcleo magnético retangular. Já no tipo de núcleo envolvente, os enrolamentos envolvem a perna central de um núcleo com três pernas. Chapas de aço-silício com espessura de 0,014" (0,35 mm) são frequentemente utilizadas em transformadores. Geralmente, usa-se o aço-silício por seu baixo custo e baixas perdas no núcleo, além de possuir alta permeabilidade em densidades de fluxo elevadas. Em alguns casos, os núcleos de pequenos transformadores, usados em circuitos de comunicação de altas frequências e baixos níveis de energia, são feitos de ligas ferromagnéticas pulverizadas e compactadas conhecidas como ferrites.

Figura 4 – Vistas esquemáticas de transformadores de (a) núcleo envolvido e (b) núcleo envolvente.



Fonte: Umans (2014).

Segundo (KRUGER, 2016), em termos teóricos, temos o transformador ideal, que representa um modelo que assume condições perfeitas para facilitar a análise e a compreensão dos princípios básicos de funcionamento dos transformadores. Suas principais características incluem a ausência de perdas de energia por aquecimento nos enrolamentos (resistência elétrica) e no núcleo (perdas magnéticas ou correntes parasitas), resultando em uma eficiência de 100%, onde toda a potência elétrica no enrolamento primário é transferida ao enrolamento secundário sem qualquer dissipação de energia. Além disso, no transformador ideal, há um acoplamento magnético perfeito, no qual todo o fluxo

magnético gerado no enrolamento primário é completamente transferido ao enrolamento secundário, sem dispersão. Os enrolamentos possuem resistência elétrica e reatância indutiva desprezíveis. A relação de transformação é linear, ou seja, a tensão e a corrente nos enrolamentos primário e secundário estão relacionadas apenas pelo número de espiras de cada enrolamento,

$$R = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ou

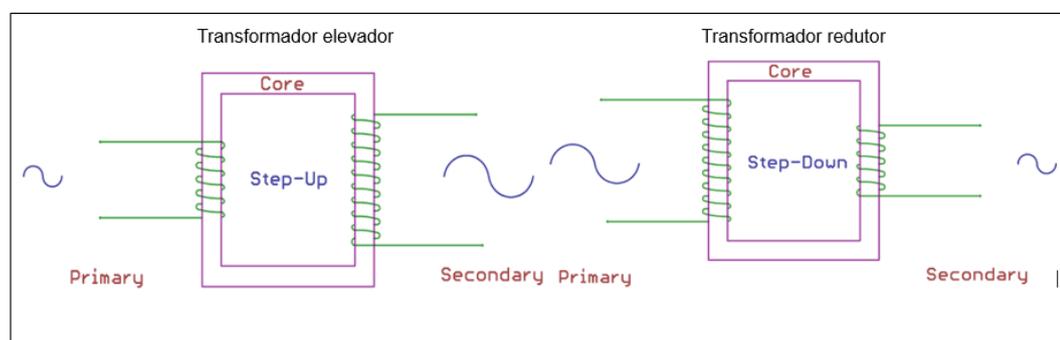
$$R = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Sendo,  $V_1$  a tensão no enrolamento primário,  $V_2$  a tensão no enrolamento secundário,  $I_1$  a corrente no enrolamento primário,  $I_2$  a corrente no enrolamento secundário e  $R$  a relação de transformação. Deste modo, temos que:

- Se  $A > 1$ , o trafo é redutor de tensão;
- Se  $A < 1$ , o trafo é elevador de tensão;
- Se  $A = 1$ , o trafo é isolador;

Em termos práticos, temos que o um transformador redutor, seu circuito tem sempre menos enrolamentos no circuito secundário, do que no primário, causando uma redução na tensão de saída e um aumento na corrente de saída. No entanto, o transformador elevador tem sempre mais enrolamentos no circuito secundário do que no primário, resultando em um aumento na tensão de saída e uma redução na corrente de saída.

Figura 5 – Relação esquemática dos enrolamento em cada tipo de transformador.



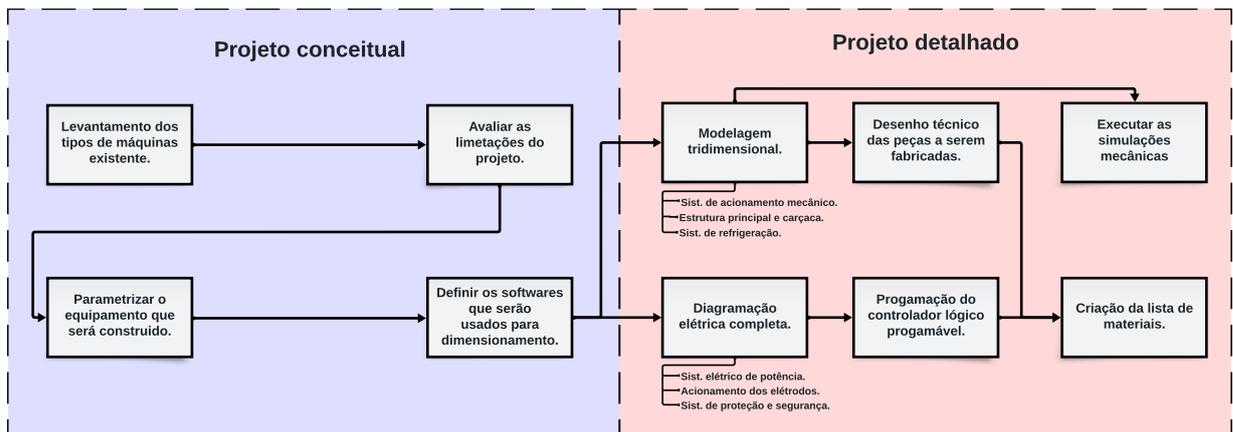
Fonte: <https://capsistema.com.br/index.php/2021/12/15/diferentes-tipos-de-transformadores-e-suas-aplicacoes/>

## 3 Metodologia

### 3.1 Plano de trabalho

Segundo Awari (2023), as metodologias para desenvolvimento de produtos têm demonstrado um alto grau de eficácia, uma metodologia apropriada resulta em uma ampla gama de benefícios, como: melhor gestão de tempo e recursos, redução de riscos, melhoria contínua e *feedback* constantes. Diante disso, o presente estudo será dividido em duas etapas principais; Projeto conceitual e o Projeto detalhado. Cada etapa do processo será imprescindível para o sucesso do protótipo, a Figura 6 traz um diagrama que ilustra cada etapa e suas subdivisões.

Figura 6 – Diagrama das etapas da metodologia do projeto.



Fonte: Autoria própria (2024).

Desempenhando um papel crucial na mitigação de riscos e no controle de custos, o estágio inicial do desenvolvimento de um projeto, conhecido como projeto conceitual, é basicamente a etapa de coletar os objetivos a serem alcançados, as principais ideias, limitações gerais, componentes indispensáveis, parâmetros do equipamento e outros fatores. Sendo assim, o projeto conceitual é o ponto de partida para desenvolvimento do projeto.

Outrossim, a próxima etapa do desenvolvimento de um projeto é o projeto detalhado. Consiste na elaboração de todos aspectos do que será construído, visando fornecer todas informações de planejamento e execução. Geralmente um projeto detalhado inclui: arquivos técnicos em geral, como desenhos técnicos, diagramas elétricos e de controle, lista de materiais, custo, simulações e qualquer outra coisa que envolva o projeto. Essa etapa é fundamental para guiar todo processo, evitando desvios e problemas.

Para auxiliar na elaboração do projeto detalhado serão necessários diversos *software* de modelagem, programação do controlador e diagramação elétrica:

- *SolidWorks™* : Software para executar a modelagem tridimensional do equipamento que será construído, a fim de ter uma visualização clara dos componentes, criação de lista de peças e desenhos bidimensionais, detecção antecipada de erros, e possibilidade de simulações mecânicas.
- *CADe Simu™* : Para criação do circuito elétrico e de controle, o mesmo foi escolhido por sua interface gráfica simplificada, contando com uma variedade de componentes elétricos, eletrônicos e de automação, podendo simular controladores lógico regomáveis e afins.
- *Clic02™* : Escolhido seguindo o modelo de controlador Lógico programável (CLP) que será usado no equipamento, sendo assim, o software é o exclusivo do modelo, sendo usado para programar o mesmo.
- *Falstad™* : *Falstad* é um simulador de circuitos elétricos que será usado para dimensionar, principalmente, o par de transformadores, assim, podendo ter uma visão mais clara dos parâmetros elétricos necessários.

# 4 Resultados

## 4.1 Projeto conceitual

O equipamento que será projetado tem por finalidade aumentar a compreensão do processo de soldagem por resistência elétrica dos discentes de um *Campus*, deste modo, deve-se planejar o aparato visando principalmente: a segurança dos usuários, a qualidade da solda, facilidade de uso, espaço a ser usado, durabilidade e manutenção. O processo de soldagem por resistência elétrica é um dos mais produtivos existentes, sendo muito rápido o processo de soldagem e tendo a possibilidade de ser melhorado com sistemas de automação, no entanto, por ser um projeto de um protótipo educacional, essa característica será menos priorizada, em comparação a máquinas industriais.

Será construída uma máquina de ponto estacionária, de ponto único e cursor linear, com acionamento manual por pedal. Desta forma, para aprimorar a precisão e a clareza no planejamento do protótipo, é possível segmentar o dispositivo nos sistemas:

- Sistema mecânico;
- Sistema elétrico;
- Sistema de controle;
- Sistema de refrigeração;

O sistema elétrico de equipamentos como esse são compostos, principalmente, por um ou mais transformadores de corrente, que fornece a energia necessária para o processo. Por ser o sistema que mais influencia na qualidade da solda, o dimensionamento deste componente se torna uma tarefa muito complexa. Deste modo, para o presente estudo serão usados dois transformadores modelo gal-900e-4 de 1kW de potência e classe 200, os quais devem ser modificados seus circuitos secundários para aumentar a potência do sistema elétrico. Além disso, tem-se uma fonte de alimentação chaveada (12V CC 10,0 A Bivolt) para alimentação dos componentes de controle e do atuador elétrico, o sistema será explicado no subcapítulo "Sistema elétrico".

O sistema mecânico é dividido em duas partes, uma delas é a estrutura de sustentação do protótipo, que em sua grande parte foi desenvolvida de tubos quadrados de aço SAE-1020, material que pode ser encontrado no instituto. A outra parte do sistema mecânico é responsável por executar o movimento do eletrodo móvel até o contato das chapas e pressiona-las, de acordo com a força necessária para o processo, após isso, o mecanismo deve fazer o movimento parar retirar a pressão e afastar os eletrodos um do outro. O principal componente nesse sistema será um atuador elétrico de 100N de força, o conjunto

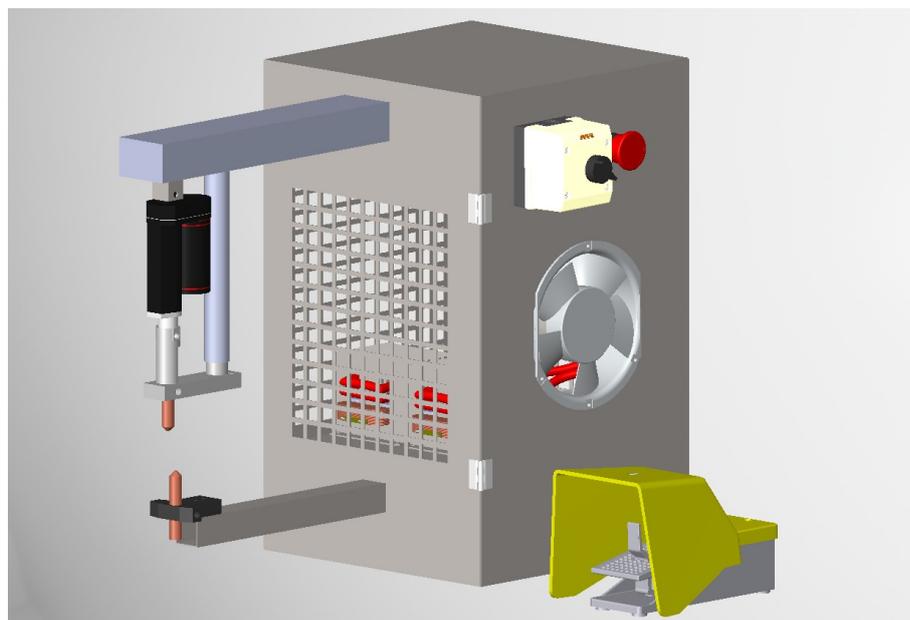
será acionado por um pedal, que iniciará o processo de soldagem, portanto, o sistema de controle controlará, também, o movimento do pistão.

O sistema de controle, que pode-se dizer que é o “cérebro” do equipamento, será responsável por controlar o tempo que a corrente elétrica flui entre as chapas, o movimento dos eletrodos e o também por coordenar o conjunto de segurança. Deste modo, será empregado um Controlador lógico programável (CLP) de modelo: WEG - Clic02 - CLW-02 10HR-A 3RD, com auxílio de outros diversos tipos de componentes eletrônicos e elétricos, como fonte de alimentação, chave seletora, sinaleiro LED, botão de emergência com intertravamento, contator tripolar, entre outros. O sistema será detalhado mais a frente.

Por fim, o sistema de refrigeração desempenha um papel fundamental para o bom funcionamento do equipamento, conservando os componentes e reduzindo o número de possíveis manutenções, sendo indispensável para o aumento da vida útil da máquina. Sendo composto, principalmente, por uma ventoinha de aproximadamente 3000 rpm, que dissipará o calor gerado pelos componentes elétricos, principalmente o calor gerado pelos transformadores, para fora da área interna do equipamento, pelas aberturas laterais.

Também é importante considerar as medidas de segurança para proteger os discentes de qualquer risco na operação do equipamento, visto que maioria pode não ter prática ou treinamento para operar o equipamento e visualizar todos os perigos da operação. Deste modo, será projetado um botão de emergência com bloqueio, que fará o intertravamento e a desenergização se necessário, além disso, será também instalado um disjuntor para possíveis curtos circuitos não planejados, além de um botão “liga-desliga”, que será uma chave seletora de 2 posições.

Figura 7 – Visão geral da modelagem tridimensional do equipamento



Fonte: Autoria própria (2024).

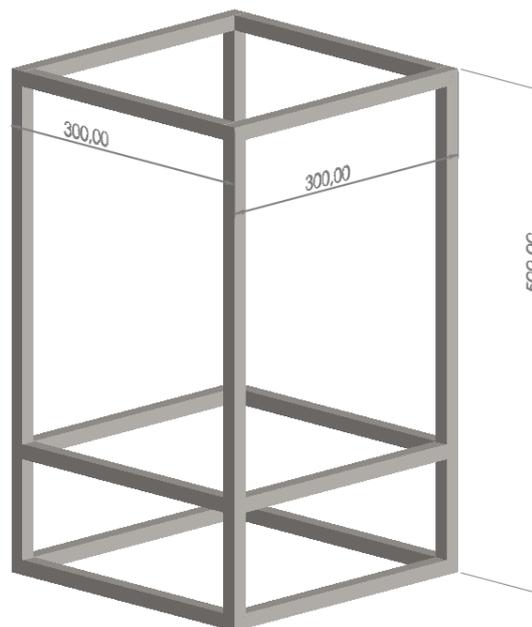
Como salientado da metodologia do trabalho, todo projeto foi modelado em *software*, deste modo, de acordo com a Figura 7 podemos ter um visão ampla do equipamento com um todo, os componentes elétricos também foram incluídos na modelagem.

A operação para realização do ponto de solda será feita pelo usuário, o mesmo irá segurar as peças entre o par de eletrodos e acionar por um pedal o início do processo de solda, é imprescindível que durante a execução o operador use todos EPI's necessários para sua proteção, sendo luva, óculos de proteção, botina de segurança e qualquer outro acessório necessário.

## 4.2 Estrutura e carcaça

O ponto de partida para a elaboração do projeto do equipamento é dimensionar a estrutura metálica principal, que dará sustentação aos componentes e irá assegurar a segurança aos discentes que usarão o equipamento, os impedindo de terem contato com qualquer componente elétrico que possa causar acidentes. Em virtude disso, foi idealizada uma carcaça retangular de 300mm x 300mm x 500mm, com duas hastes onde são fixados os eletrodos. Toda estrutura de sustentação da carcaça foi projetada com tubos quadrados (Aço SAE-1020) de 20mm x 20mm e espessura de 1.2 mm, a geometria do equipamento foi projetada para dar sustentação e estabilidade no processo de soldagem. Todos os tubos foram únicos por soldas, sendo projetada soldas de topo e de vértices, abaixo pode-se ver a estrutura de sustentação metálica:

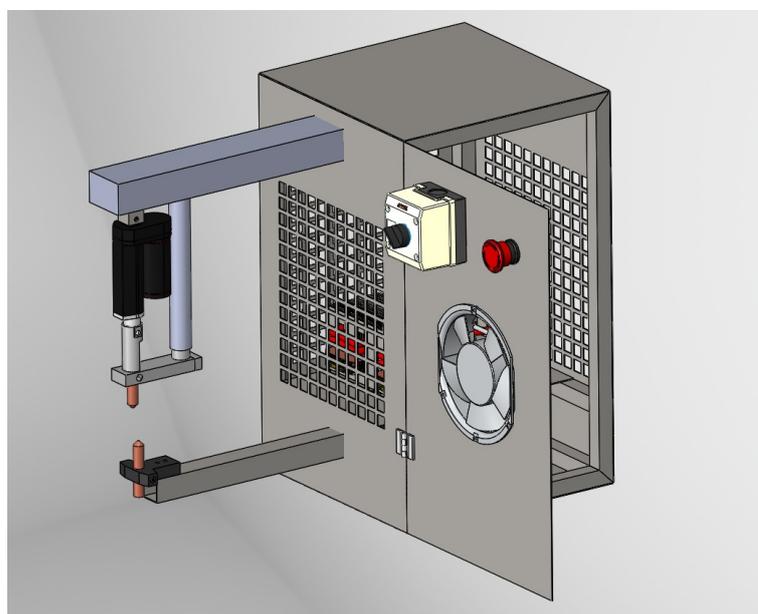
Figura 8 – Modelagem da estrutura de sustentação da carcaça.



Fonte: Autoria própria (2024).

A escolha de tubos quadrados de aço SAE-1020 se deu pela facilidade de trabalhar, além de ser facilmente encontrado, reduzindo possíveis custos caso optasse por usar outro tipo de material. A estrutura é revestida lateralmente com chapas metálicas de aço SAE-1020, com 1.2 mm de espessura, tendo rasgos laterais para circulação de ar e dissipação de calor. As chapas laterais também são importantes para segurança dos usuários, os impedindo de ter contato com o par de transformadores, o controlador lógico e a fonte de alimentação. Para facilitar manutenções e ajustes no controlador, uma das laterais foi projetada para se abrir, por meio de duas dobradiças e um fecho lingueta, muito comum em painéis elétricos, por exemplo.

Figura 9 – Porta de acesso aos transformadores e ao controlador lógico.

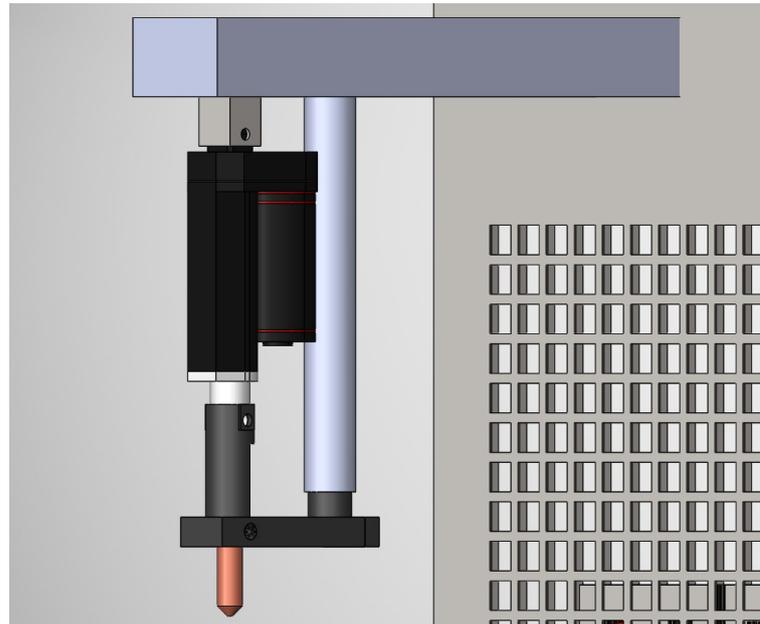


Fonte: Autoria própria (2024).

O conjunto de sustentação do acionamento é composto por um tubo metálico retangular de aço carbono de 60 x 40 mm, sendo soldado diretamente na estrutura metálica, além disso, um tubo de 3/4", também de aço carbono, que funciona como um alinhador para o movimento do cursor, garantindo o paralelismo do par de eletrodo no processo de soldagem. O atuador é fixação por meio de uma peça metálica e um parafuso sextavado de rosca inteira (M6 1,00 Ma X 30 DIN 933 Inox A2) com porca (M6 1,00 Ma X Chave 10 DIN 6923 Inox A2), por fim, a peça de fixação do eletrodo móvel é presa no cursor do atuador por meio de um parafuso sextavado de rosca inteira (M6 1,00 Ma X 30 DIN 933 Inox A2) com porca (M5 0,80 Ma X Chave 8 DIN 6923 Inox A2).

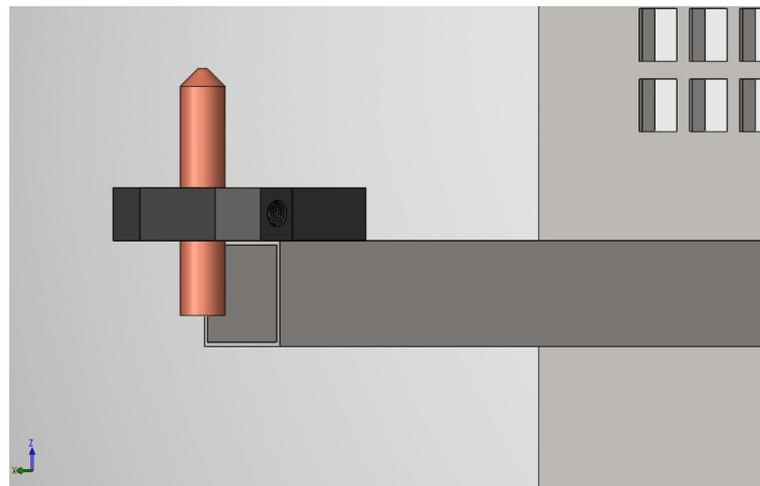
O conjunto de fixação do eletrodo fixo é composto por um tubo quadrado de aço carbono de 30x30 mm, cujo é diretamente soldado na estrutura metálica, e em sua ponta, tem-se a peça de fixação do eletrodo que é presa por meio de dois parafusos sextavados de rosca inteira (M5 0,80 Ma X 25 DIN 933 Inox A2) com porcas (M5 1,00 Ma X Chave 10 DIN 6923 Inox A2).

Figura 10 – Modelagem da haste superior do eletrodo móvel.



Fonte: Autoria própria (2024).

Figura 11 – Modelagem da haste inferior do eletrodo fixo.



Fonte: Autoria própria (2024).

### 4.3 Sistema de acionamento

O sistema de acionamento foi idealizado buscando reduzir ao máximo o contato do usuário com partes que podem causar acidentes, além de disso, tem-se o fato de que quanto mais etapas o usuário necessitar realizar, mais difícil é assegurar padrões de qualidade, pois os mesmos podem variar de usuário e de suas habilidades com o equipamento. Diante disso, o processo de soldagem foi projetado para ser automático, uma vez que o operador só precisa iniciar o processo pelo acionamento de um pedal, logo após todo acionamento/desacionamento será feito por um atuador elétrico linear, reduzindo assim riscos de acidentes e aumentando também a precisão e qualidade do ponto de solda.

O atuador elétrico linear dará a pressão necessária para o processo de soldagem, uma vez que é um parâmetro indispensável, o pistão fará o movimento do eletrodo superior (móvel) em direção ao eletrodo inferior (fixo) ao encostar nas peças soldadas, o mesmo exercerá uma força entre as chapas, é importante avaliar a espessura das chapa que serão soldadas, para fazer o ajuste de altura dos eletrodos. O atuador especificado no projeto tem as seguintes características:

- Fabricante: *CNMAWAY*;
- Força: 100 N;
- Cursor: 50 mm;
- Velocidade: 60 mm/s;
- Voltagem: 12 V;

Ainda sobre as características do atuador, por ser alimentado com corrente contínua de 12 V, quando é energizado com a sua polaridade normal, o cursor se estende, já para retrair-se, deve-se inverter a polaridade, deste modo, o atuador poderá executar todos movimentos necessários no processo de soldagem.

Figura 12 – Atuador projetado para ser usado no equipamento.



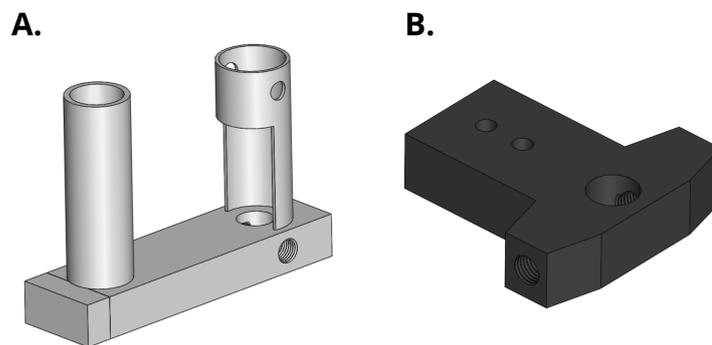
Fonte: Autoria própria (2024).

É importante também salientar que o sistema de acionamento está intrinsecamente ligado ao sistema de controle, já que todo processo de soldagem será condizido pelo mesmo, toda lógica e parâmetros usados no sistema de controle serão apresentados no subcapítulo “Sistema de controle”.

Ainda sobre o sistema de acionamento, mais precisamente sobre o conjunto de fixação dos eletrodos, temos as duas peças que fazer a fixação dos eletrodos, as mesmas tem características parecias, mesmo que suas geometrias sejam muito diferentes. As peças tem por objetivo fixar os eletrodos, garantindo um travamento ideal, ou seja, elas devem impedir

qualquer movimento vertical dos eletrodos, uma vez que essa irregularidade causaria uma redução na pressão do atuador e inevitavelmente reduziria a resistência do ponto de solda. Além disso, eles desempenham um papel fundamental para a segurança dos discentes, na medida que é imprescindível que ambos eletrodos estejam isolados eletricamente do resto da estrutura, para que a corrente elétrica, proveniente do par de transformadores, não percorram para toda estrutura, para isso, ambas peças de fixação dos eletrodos foram projetadas com material isolante.

Figura 13 – Peças de fixação do par de eletrodos feitas por manufatura aditiva.



Fonte: Autoria própria (2024).

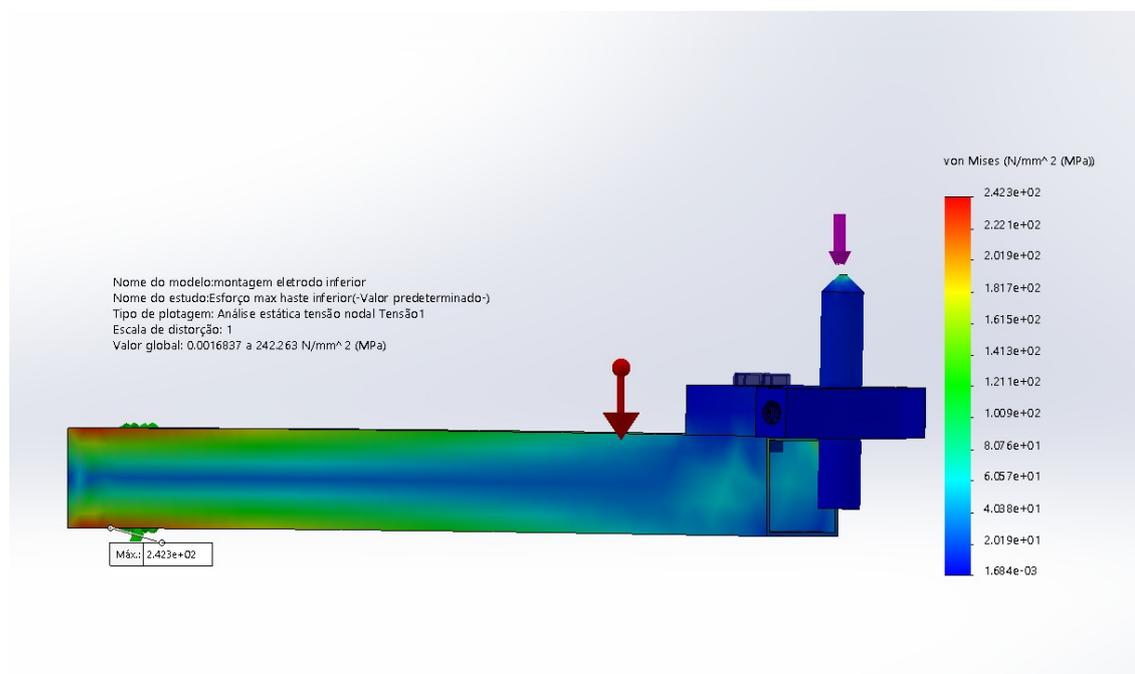
Por suas geometrias complexas de serem fabricadas e a necessidade de se usar um material isolante, as peças foram projetadas para serem fabricadas por manufatura aditiva, utilizando *poliácido láctico*, ou mais conhecido como PLA. Como evidenciado no Apêndice E e F, ao centro das peças há um furo (com 1/2" de diâmetro) onde é posicionado o eletrodo, em suas laterais existem dois furos rosqueados, que com dois parafuso sextavado de rosca inteira (M6 1,00 Ma X 30 DIN 933 Inox A2) é efetuada a fixação do eletrodo na posição, esse modo de travamento dos eletrodos permite que ajustes de distancia possam ser feitos com facilidade, de acordo com a espessura das chapas a serem soldadas, por exemplo.

As peças ainda desempenham um último papel no conjunto de acionamento, materiais poliméricos tem elevada ductibilidade, fazendo com que possam se deformar e compensar possíveis esforços excessivos que o atuador pode exercer sobre as hastes de sustentação, caso não seja feito um ajuste correto da altura dos eletrodos, por exemplo.

Para evidenciar a situação que foi mostrada, foi efetuada uma simulação mecânica no software *SolidWorks™*, a haste inferior está fixada em sua ponta, na ponta do eletrodo fixo foi inserido uma carga pontal de 100N (mesma carga do atuador), além da gravidade (aproximadamente  $9,81m/s^2$ ). Tal simulação ilustra a pior situação possível cuja haste inferior pode estar sujeita, ou seja, todos os 100N sejam completamente direcionados para o conjunto inferior, situação essa que é muito difícil ocorrer, já que no sistema, mesmo

que a altura do eletrodo esteja incorreta, os esforços são dissipados para as peças a serem soldadas e também para a haste superior.

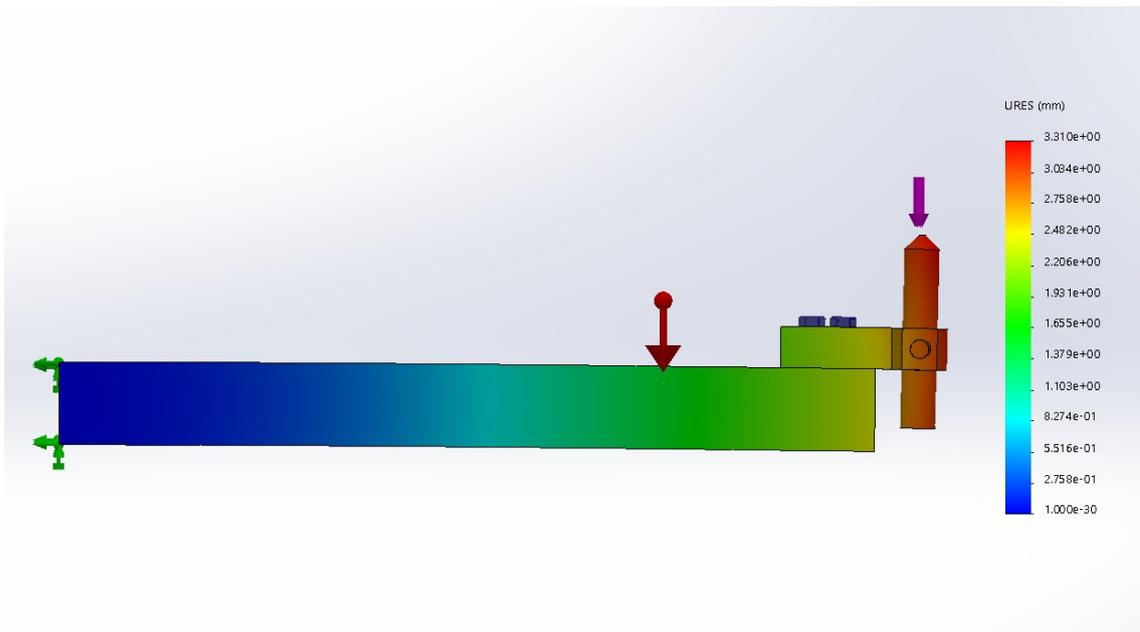
Figura 14 – Simulação da tensão máxima do conjunto inferior.



Fonte: Autoria própria (2024).

Segundo a Figura 14, é notório que, pela simulação, a haste inferior suportará os esforços no processo de soldagem sem danificar nenhum componente, nem exceder o limite de escoamento das peças, pois o valor do ponto de maior esforço é aproximadamente  $242\text{MPa}$ , sendo no tubo quadrado, cujo limite de escoamento é de aproximadamente  $350\text{MPa}$ .

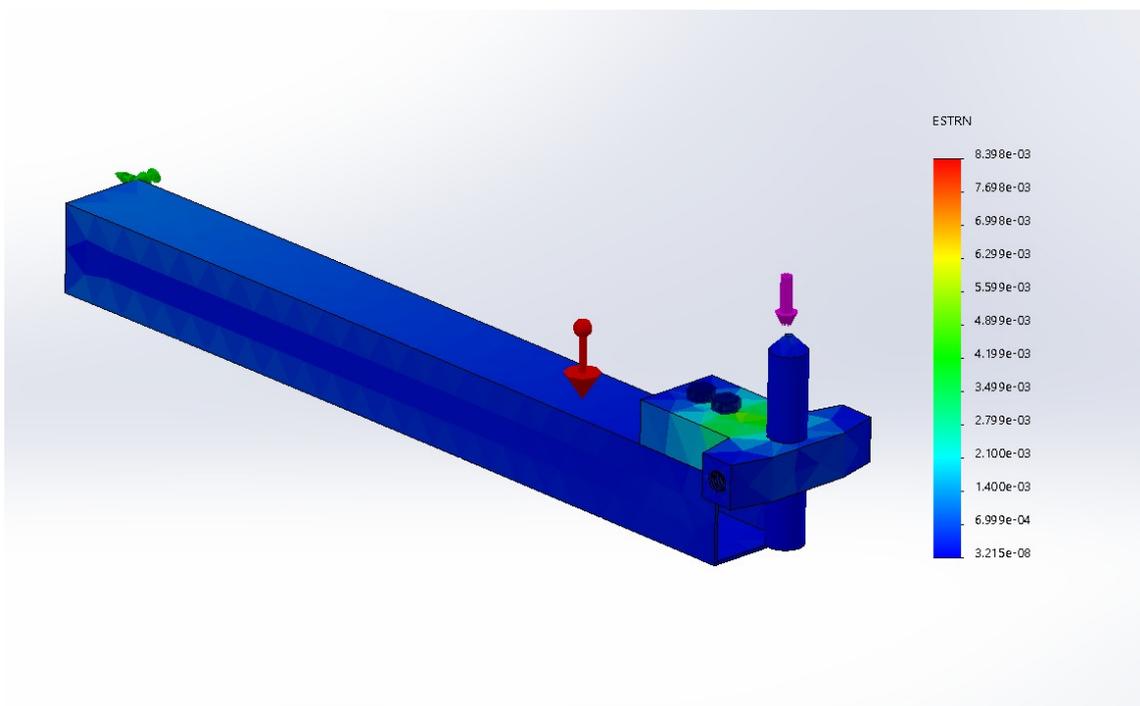
Figura 15 – Simulação do deslocamento máximo do conjunto inferior.



Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com a Figura 15, o conjunto teve um deslocamento vertical de aproximadamente 3 mm, diante disso, esse valor não é suficiente para implicar em um desalinhamento entre os eletrodos, logo não reduzirá a qualidade do ponto de solda.

Figura 16 – Simulação da deformação máxima do conjunto inferior.



Fonte: Autoria própria (2024).

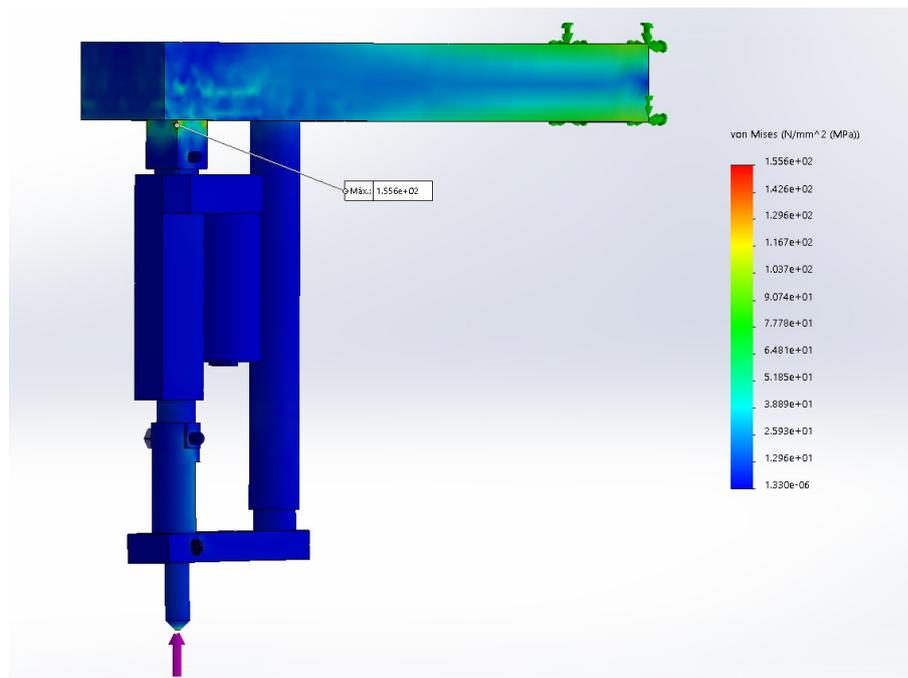
Por fim, a Figura 16 demonstra a máxima deformação, onde a grande parte da deformação do sistema é proveniente da peça de fixação do eletrodo deforma e alivia parte dos

esforços das cargas aplicadas, reduzindo as tensões, principalmente no tubo metálico.

Seguindo a teoria da terceira lei de Newton, temos que o valor da força exercida pelo atuador para baixo, também causa uma reação contrária para todo conjunto superior, pensando nisso, foi realizado uma simulação mecânica, também, para o conjunto superior, o sistema foi submetido a pior situação possível, onde uma carga de  $100N$  foi aplicada sobre o eletrodo, buscando o comportamento dos componentes no decorrer do processo de soldagem.

Como pode-se visualizar na Figura 17, o valor do maior ponto de tensão do conjunto é, aproximadamente,  $155MPa$  no tubo quadrado (aço SAE-1020), que funciona como a peça de fixação do atuador, sendo o limite de escoamento de aproximadamente  $350MPa$ , desse modo, pode-se garantir que o conjunto projetado conseguirá suportar os esforços provenientes do processo de soldagem sem danificar nenhum componente.

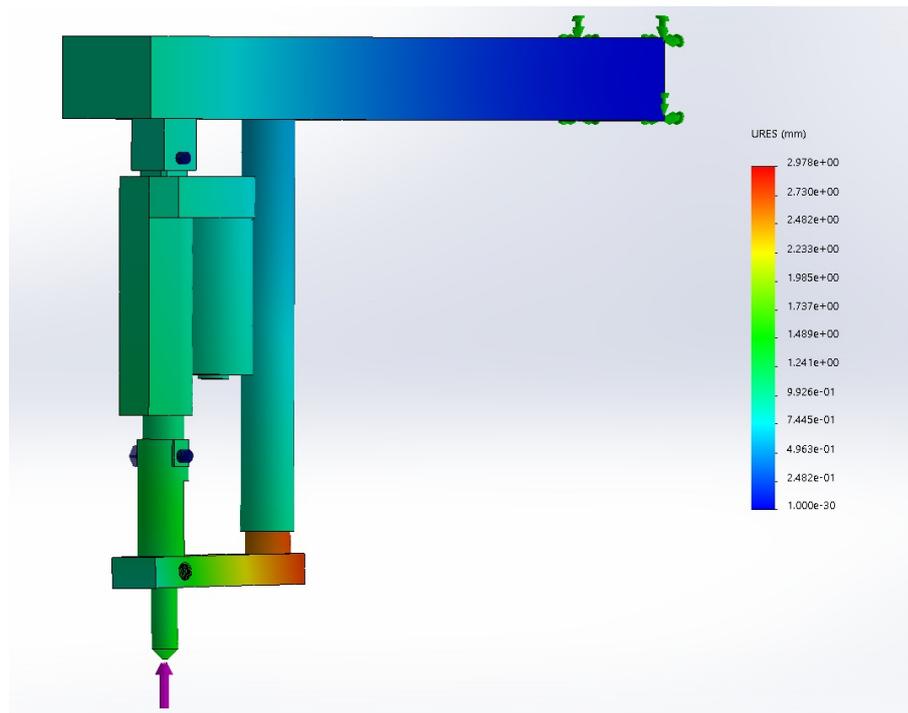
Figura 17 – Simulação da tensão máxima do conjunto superior.



Fonte: Autoria própria (2024).

Além disso, é possível verificar também o deslocamento máximo, a peça de fixação do eletrodo variou, aproximadamente, entre  $1,24$  mm e  $3,00$  mm.

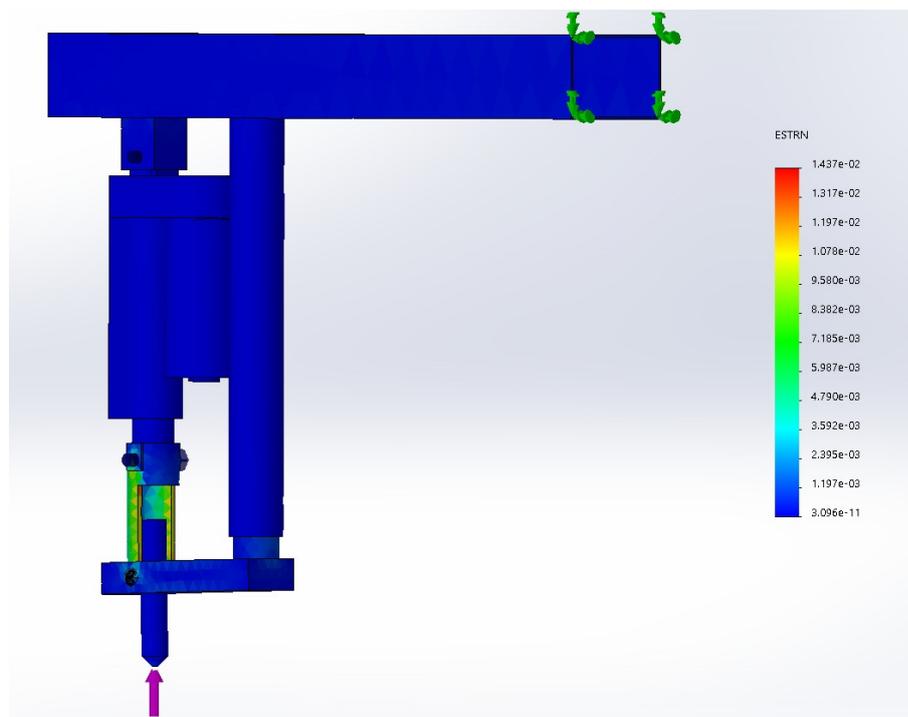
Figura 18 – Simulação do deslocamento máximo do conjunto superior.



Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, de acordo com a Figura 19, pode-se observar que o local de maior deformação é na peça de fixação do eletrodo, por ser fabricado com material polimérico.

Figura 19 – Simulação da deformação máxima do conjunto superior.



Fonte: Autoria própria (2024).

Por fim, de acordo com a Figura 19, pode-se observar que o local de maior deformação

é na peça de fixação do eletrodo, por ser fabricado com material polimérico

## 4.4 Sistema elétrico

Pode-se dizer que o sistema elétrico é o conjunto mais importante do equipamento, é dele que sairá a corrente elétrica que fluirá pelas peças, diante disso, é imprescindível que seu projeto tenha parâmetros como, segurança, potência elevada, versatilidade e manutenção.

Foi projetado um sistema elétrico de potência com dois transformadores iguais, abaixo tem-se as especificações técnicas (originais) dos mesmos;

- Modelo: gal-900e-4;
- Classe: 200;
- Potência: 1000 W;
- Tensão de entrada: 220;
- Tensão de saída: 2200;
- Razão: 10

Originalmente, o transformador em questão é do tipo elevador, ou seja, a tensão de entrada ( $V_1$ ) será elevada, diante disso, tem-se que quanto maior a tensão, menor é a corrente elétrica do circuito, assim, todo transformador elevador reduz a corrente de saída.

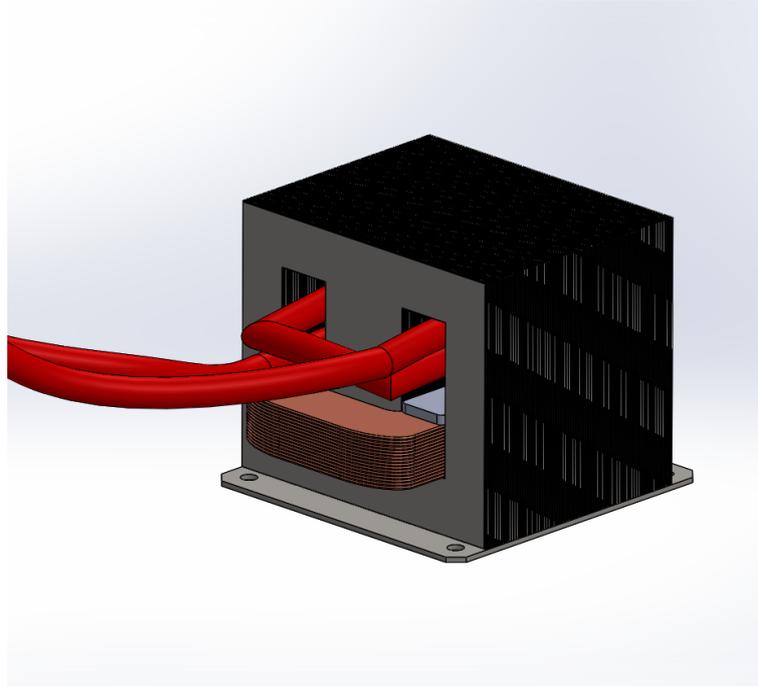
Em um equipamento onde necessita-se de um alto valor de corrente, deve-se usar um transformador do tipo redutor, sendo assim, a tensão de saída será maior que a de entrada, no entanto, a corrente elétrica será menor que a corrente de saída. Diante disso, é imprescindível conhecer o valor da razão entre os espiras para dimensionar sua tensão e corrente de saída;

$$R = \frac{N_1}{N_2}$$

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{I_1}{I_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Como já foi salientado, os transformadores originalmente são do tipo elevador, deste modo, existem mais espiras no seu circuito secundário do que no primário, para mudá-los para um transformador redutor, deve-se retirar todo seu circuito secundário e substituí-lo por outro com menos espiras, ou seja, quanto menos espiras for adicionado no circuito secundário, mais a tensão irá reduzir. Para isso, foi modelado a configuração do transformador com 2 espiras no seu circuito secundário, o mesmo sendo substituído por um cabo semi-rígido de 25mm como ilustrado abaixo:

Figura 20 – Transformador alterado para funcionar como redutor usando um cabo semi-rígido de 25 mm.



Fonte: Autoria própria (2024).

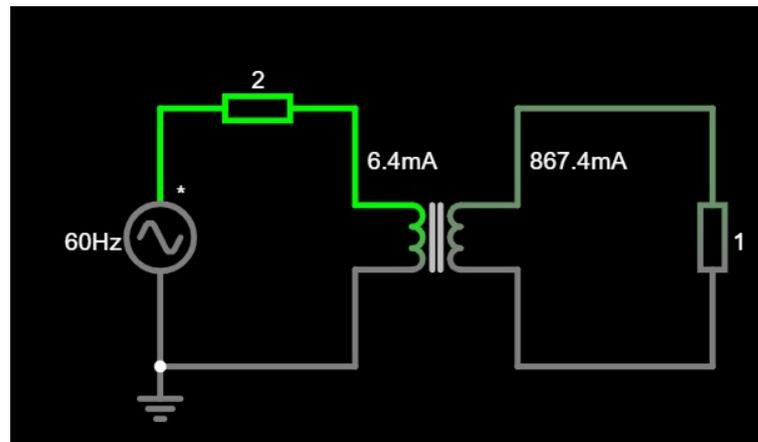
Deste modo, temos um transformador redutor ideal para ser usado no projeto. A modelagem foi desenvolvida usando medidas reais do transformador em questão, deste modo, por não ter sido encontrado o *Data Sheet* do componente, foi desenvolvida uma aproximação da quantidade de espiras no seu circuito secundário, que foi mensurado um valor de aproximadamente 250 espiras, com esse valor, temos a nova razão:

$$R = \frac{N_1}{N_2}$$

$$R = \frac{250}{2} = 125$$

Sendo,  $R$  a razão entre os circuitos,  $N_1$  a quantidade de espiras no circuito primário, e  $N_2$  a quantidade de espiras no circuito secundário.

Figura 21 – Circuito ilustrativo com um transformador redutor.



Fonte: Autoria própria (2024).

Como evidenciado na Figura 21, foi desenvolvida, no *software Falstad*, uma simulação para ilustrar o funcionamento do transformador redutor em um circuito ilustrativo, sendo a tensão de entrada ( $V_1$ ) 220 V, a razão ( $R$ ) igual á 125 e levando em consideração que em um processo de soldagem temos uma resistência elétrica relativamente pequena entre as peças, temos que:

Figura 22 – Simulação de um transformador redutor com razão 125.

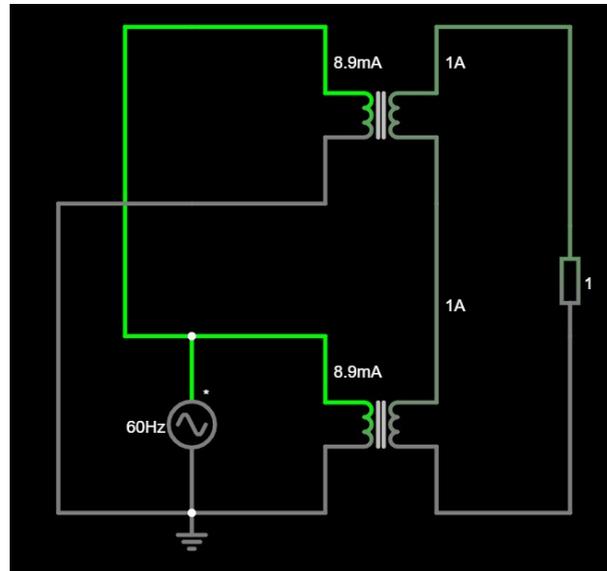


Fonte: Autoria própria (2024).

Deste modo, temos que a tensão de entrada foi reduzida, aproximadamente, em 125 vezes, de modo contrário, a corrente de entrada foi amplificada em 125 vezes, por fim,

temos que a potência de saída ( $P_2$ ) do transformador é  $P_2 = V_2 * I_2$ , diante disso temos que a máxima potência obtida pelo transformador no circuito ilustrado é  $3,083W$ .

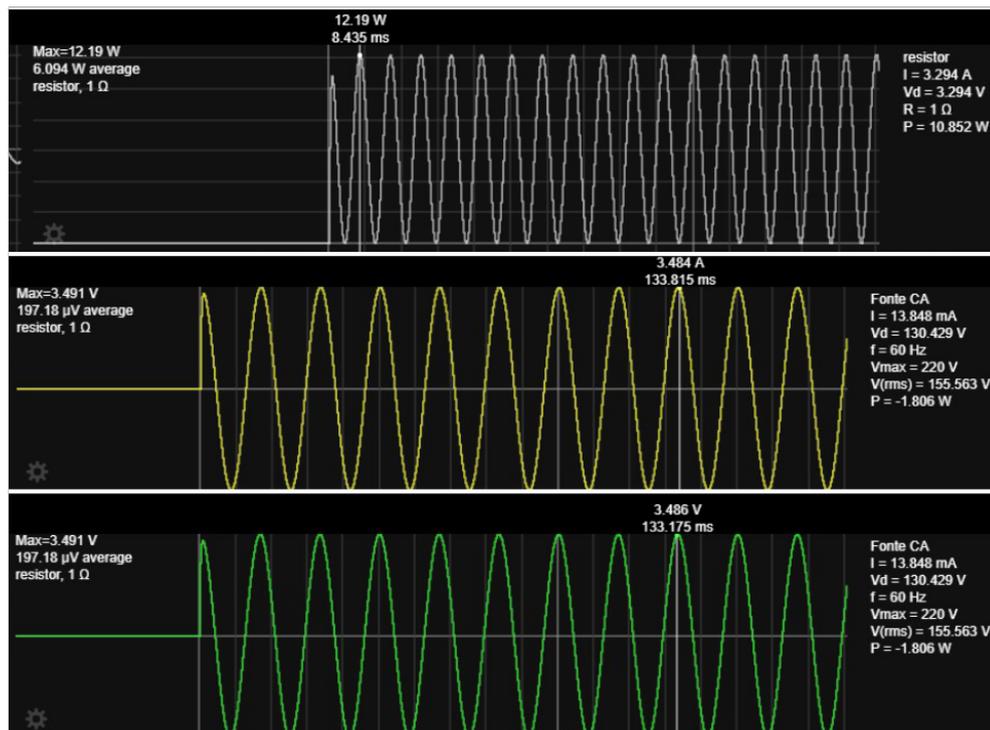
Figura 23 – Circuito ilustrativo com dois transformadores redutores.



Fonte: Autoria própria (2024).

Além disso, foi simulado também o funcionamento dos dois transformadores usados no processo simultaneamente (Figura 24), sendo que, o circuito secundário de um é interligado no outro, dessa forma, usando o mesmo circuito da simulação anterior, temos que:

Figura 24 – Simulação de dois transformadores redutores com razão 125.



Fonte: Autoria própria (2024).

De acordo com a Figura 24, pode-se ver que um sistema elétrico com dois transformadores é mais efetivo, desempenhando uma potência 4 vezes mais do que um conjunto com apenas um transformador.

$$P_2 = V_2 * I_2$$

$$P_2 = 3,491 * 3,484$$

$$P_2 \approx 12,20W$$

## 4.5 Sistema de controle

O sistema de controle é responsável por gerenciar todo curso de soldagem, a partir do acionamento manual por parte do operador, até o final do processo. Seu componente principal é um controlador lógico programável, popularmente conhecido como “CLP” que está disponível na instituição de ensino. Abaixo tem-se algumas informações sobre o componente:

- Modelo: WEG - Clic02 - CLW-02 10HR-A 3RD
- Alimentação: AC 100-240 V
- Corrente: 8 A
- Entradas: 6
- Saídas: 4

A preferência pelo uso de um CLP e não outro equipamento de controle se deu pela facilidade de modificar padrões na programação, além de estar acessível na instituição para uso. Como já salientado, para realizar a programação foi usado o software *Clic02™*, cujo é apropriado para se usar neste modelo de CLP.

Figura 25 – Controlador lógico programável disponível na instituição.

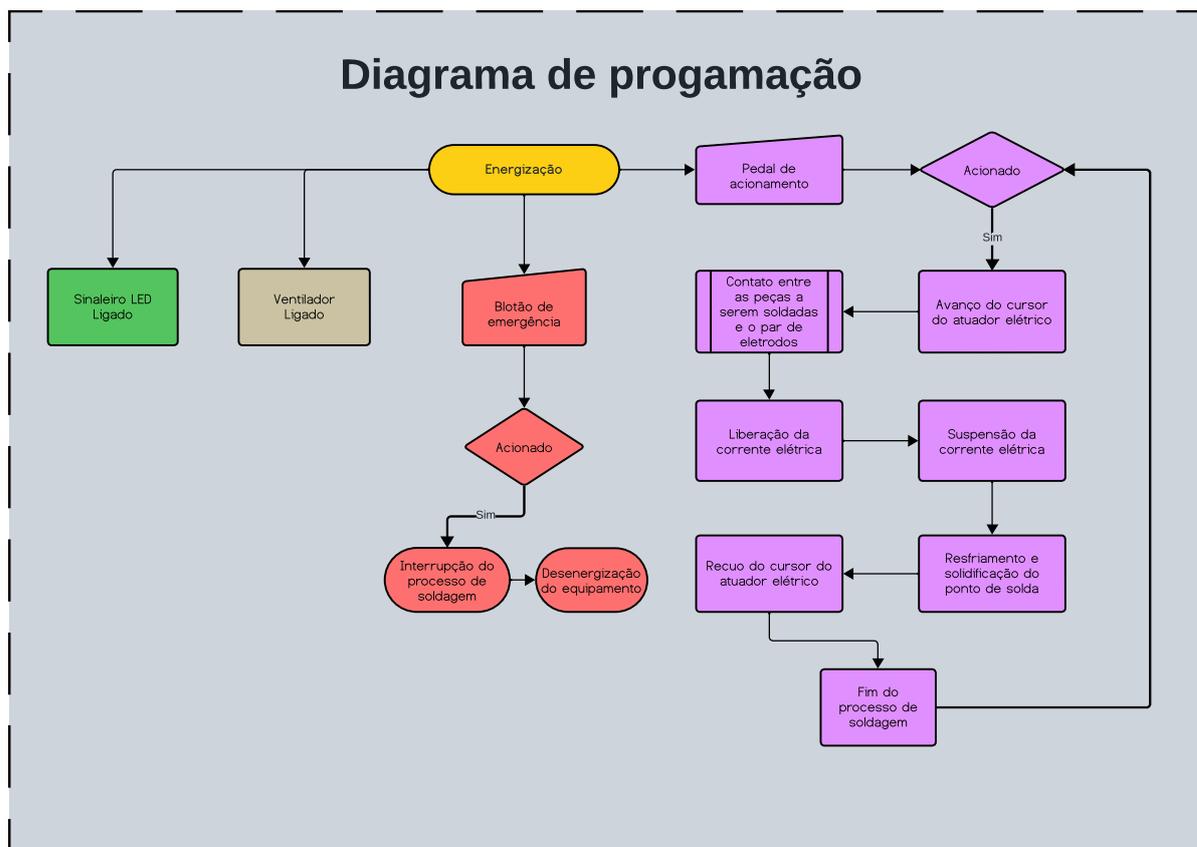


Fonte: A autoria própria (2024).

Iniciando o processo de soldagem, temos o acionamento manual do operador através de um pedal, logo após é iniciado o processo de soldagem, em seguida o atuador é energizado, fazendo o seu cursor se mover verticalmente em direção ao eletrodo fixo, pela velocidade do atuador ser conhecida ( $60\text{mm/s}$ ), temos o tempo dessa etapa. Em seguida, após ambos eletrodos estarem em contato com as peças a serem soldadas, é acionado a corrente elétrica, o tempo desse processo é variável, segundo a geometria das peças, material, superfície de contato, entre outros fatores.

Continuando o processo, temos o tempo de resfriamento do ponto de solda, esse fator também é variável e deve ser ajustado segundo os parâmetros citados anteriormente. Por fim temos o afastamento dos eletrodos, esse movimento vertical do atuador também segue um tempo pre-definido.

Figura 26 – Diagramação da programação desenvolvida.



Fonte: Autoria própria (2024).

Um contator não é um componente obrigatório, já que, pela simulação feita do par de transformadores, a corrente de entrada não ultrapassa o limite da porta do CLP, logo o contator se torna um item flexível.

É importante salientar que o protótipo tem por principal finalidade o aprendizado e, principalmente, a segurança dos discentes que irão manusear o equipamento, por esse motivo as etapas do processo tem um tempo maior, para evitar acidentes, como prensamento de membros ao cursor se movimentar verticalmente, por exemplo. No entanto, é possível fazer ajustes no tempo de cada etapa, se for julgado necessário e seguro.

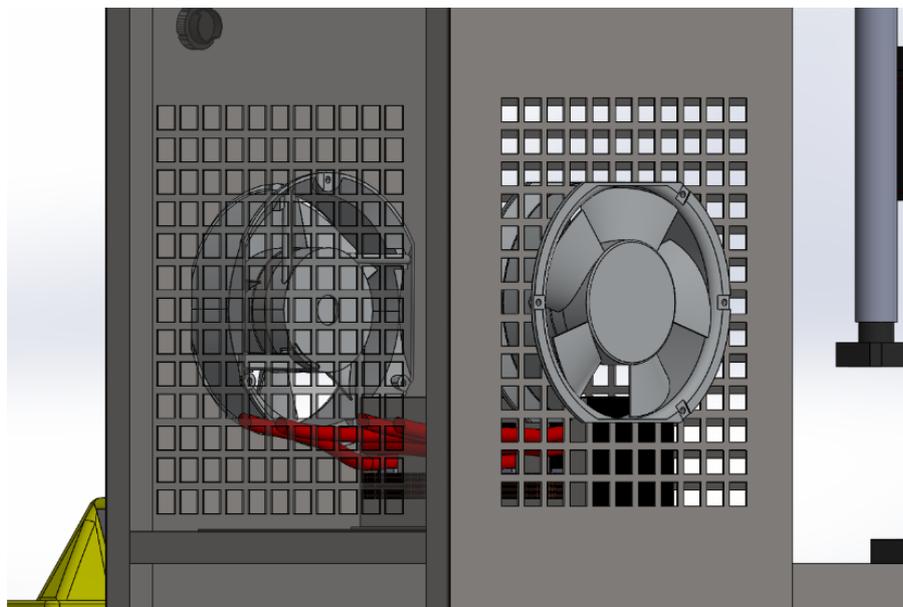
## 4.6 Sistema de refrigeração

O sistema de refrigeração, como já salientado, é responsável por dissipar o calor gerado pelo par de transformadores no processo de soldagem, ele conta com uma ventoinha de aproximadamente 17,00 cm de diâmetro, desempenhando 3000 rpm. Além disso, a chapas da carcaça tem aberturas em suas laterais, muito importantes para circulação de ar, tais aberturas foram modeladas em vários quadrados, mas também funcionaria se fosse em outro formato que conseguisse circular o ar interno para fora.

Em uma eventual montagem do equipamento, possa ser que, apenas um ventilador

não consiga dissipar todo calor, nesse caso, é possível colocar mais uma ventoinha no equipamento, mas nesse caso funcionando como um exaustor, sendo posicionado paralelo ao ventilador, assim seria possível compensar a grande quantidade de calor produzida pela operação do equipamento. Abaixo pode-se visualizar como ficaria tal sistema:

Figura 27 – Modelagem do sistema de refrigeração com duas ventoinhas em paralelo



Fonte: Autoria própria (2024).

## 4.7 Eletrodos

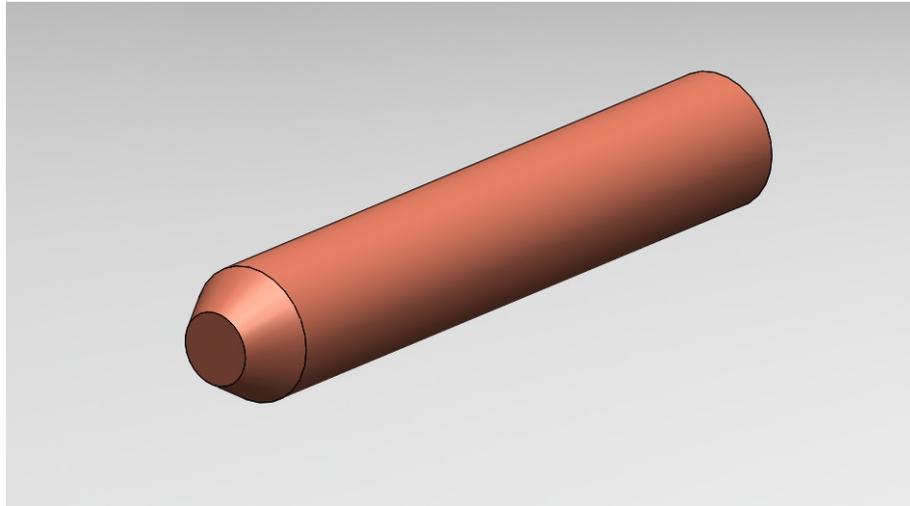
Os eletrodos desempenham um papel fundamental na geração de calor ao conduzirem a corrente de soldagem para o material. Na solda ponto, a área de contato do eletrodo influencia significativamente a densidade da corrente de soldagem e o tamanho da solda resultante. O par de eletrodos devem ter uma ótima condutividade elétrica e também dureza elevada, para suportar as deformações causadas pela força de aplicação do atuador.

Deste modo, os eletrodos foram projetados de liga de cobre eletrolítico (99,9% puro) pela sua alta condutividade térmica e elétrica, baixa resistência de contato, elevada resistência mecânica e também boa resistência ao desgaste nas temperaturas de trabalho (RIGHI, 2022).

Ademais, outro parâmetro importante que deve ser levado em conta é a geometria do eletrodo. Um eletrodo, para desempenhar sua função com excelência, deve ter um corpo com massa suficiente para suportar a força aplicada e a corrente elétrica que passa pelo mesmo, deste modo, um eletrodo com uma ponta muito afilada tem uma área de contato menor, conduzindo assim mais corrente pela ponta do eletrodo, causando um aumento de temperatura, algumas vezes pode até sobreaquecer além do ponto aceitável, interferindo na qualidade do ponto de solda. De modo contrário, um eletrodo com uma ponta com pouco

chanfro tem uma área de contato maior, reduzindo a densidade da corrente elétrica, o ideal é que o valor do chanfro do eletrodo esteja em um valor aceitável, para não superaquecer e danificar o componente, nem reduzir muito a corrente elétrica do processo.

Figura 28 – Modelagem do eletrodo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Para a escolha das especificações do eletrodo que será usado (como bitola, comprimento, material), deve-se levar em conta a facilidade de encontrar um tarugo com as devidas especificações ao qual não implicará em um custo muito elevado para o projeto, já que o mesmo deve ser comprado (não tem disponível no instituto). O eletrodo projetado tem dimensões de 70 mm de comprimento, 1/2" de diâmetro e com chanfro de 30° em sua ponta, sua área de contato é de aproximadamente 37,68mm<sup>2</sup>. Tendo o valor da área de contato do eletrodo e o valor da força que será aplicada, pode-se encontrar a pressão de soldagem, temos que:

Força: 100 N

Área: 37.68 mm<sup>2</sup>

$$Pressao(P) = \frac{\text{Força (F)}}{\text{Área (A)}}$$

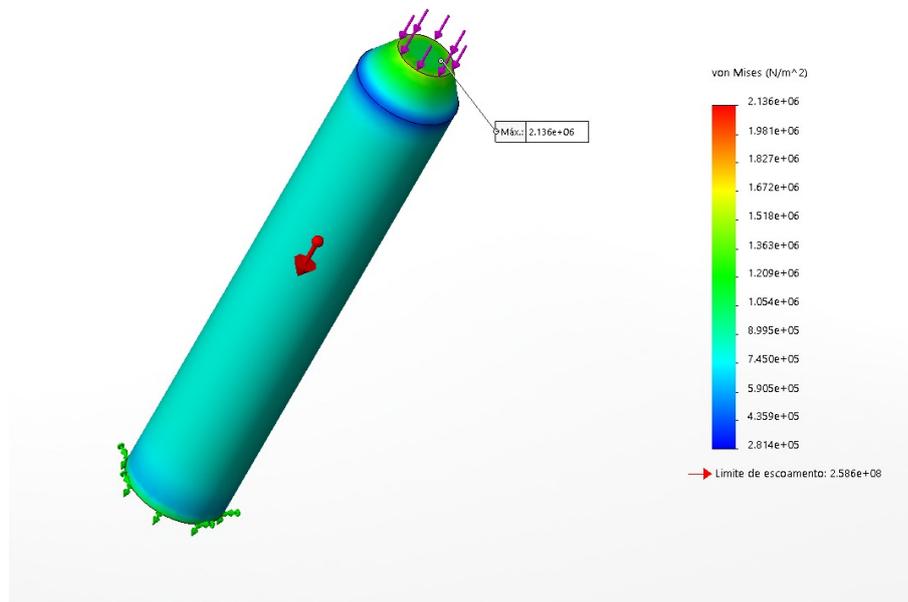
$$P = \frac{100N}{37,68mm^2}$$

$$P = 2.645N/mm^2$$

Ou:

$$P = 2.645MPa$$

Figura 29 – Simulação mecânica da tensão máxima do eletrodo.



Fonte: Autoria própria (2024).

Para evidenciar o que foi salientado acima, foi elaborada uma simulação dos esforços que o eletrodo sofre com a pressão calculada acima.

Segundo a Figura 29, temos que o valor do ponto de tensão máxima é, aproximadamente,  $2130000\text{MPa}$ , deste modo, muito longe do limite de escoamento da liga de cobre, como indica na figura.

## 4.8 Lista de materiais

Após a modelagem tridimensional do equipamento e a elaboração da diagramação elétrica, foi feito o levantamento dos materiais, tanto mecânicos, como elétricos e de controle. No Apêndice B está a lista completa dos materiais que serão usados na confecção da máquina, ela contém o nome do material, suas respectivas dimensões, descrição detalhada, quantidades e seus respectivos preços.

Todos componentes elétricos e de controle, exceto o pedal, estão a disposição na instituição para ser usados em uma eventual montagem do equipamento, além disso ambas peças de fixação dos eletrodos, que foram projetadas para serem fabricadas por manufatura aditiva, pode ser confeccionada na instituição com o equipamento e filamento próprio, reduzindo também custos.

Os tubos quadrados usados na estrutura metálica podem ser conseguidos na instituição, no entanto, por se tratar de um número muito grande de peças, talvez exista a necessidade de adquirir através de compra, o custo indicado na tabela se refere a uma peça de 6000 mm de comprimento, o mesmo se dá para as chapas laterais, o preço refere-se a

uma peça de 1000mm x 1000mm.

O atuador elétrico linear será necessário adquirir comprando, visto que é um modelo com características técnicas específicas, desse modo, pode ser adquirido por aproximadamente 140,00 reais, sendo encontrado em algumas lojas online, além do atuador, o pedal é outro item que precisa ser adquirido, tendo variados modelos no mercado, o modelo escolhido está custando 63,90 R\$ aproximadamente. Por fim, outro componente que teria a necessidade de comprar é o par de eletrodos, cujo cada eletrodo tem 12,70 mm aproximadamente de diâmetro e 70 mm de comprimento, um tarugo de 150 mm de comprimento e mesma bitola está custando aproximadamente 37,00 - 40,00 reais.

Considerando que os alunos podem realizar a montagem sem custo de mão de obra externa, e que todo maquinário necessário para fabricação e montagem das peças estão disponíveis na instituição, o custo do equipamento se resume apenas aos materiais que não estão presentes no *campus*. Portanto, temos uma ótima relação custo-benefício, já que um equipamento similar no mercado custa em média dez vezes mais.

## 5 Conclusão

O desenvolvimento do projeto de um equipamento de soldagem por resistência elétrica para uso acadêmico no IFBA *Campus* Jequié representou um desafio significativo e uma oportunidade de inovação. Este trabalho teve como objetivo desenvolver o projeto de um equipamento de soldagem por resistência elétrica por ponto para uso acadêmico, mas além disso, preencher uma lacuna na formação prática dos alunos de engenharia mecânica, proporcionando um recurso essencial para o aprendizado das técnicas de soldagem.

A partir da análise teórica e da pesquisa sobre soldagem por resistência elétrica, foi possível elaborar um projeto detalhado de uma máquina de solda a ponto. O processo de desenvolvimento incluiu a modelagem tridimensional, a elaboração de desenhos técnicos, a definição de um sistema elétrico e de controle, e a seleção criteriosa dos materiais disponíveis no Instituto para garantir a viabilidade econômica do projeto.

Nas simulações foi possível observar que o atendeu as expectativas, por sua robustez, pelo sistema de acionamento eficiente e mecanismos de segurança adequados para o ambiente acadêmico. A operação do equipamento será simples, utilizando um pedal elétrico para acionar o atuador e iniciar o processo de soldagem, garantindo a fusão adequada das peças metálicas de diversas espessuras. A integração de um sistema de controle automático assegura a precisão e a repetibilidade das soldas, características fundamentais para o aprendizado técnico dos estudantes.

Os resultados obtidos com as simulações foi positivos o que nos leva a crer que o protótipo terá uma eficácia tanto em termos de funcionalidade quanto de segurança. Foi possível verificar que a máquina atenderá aos objetivos de realização de soldas com boa qualidade e com segurança para os usuários, comparáveis à alguns equipamentos industriais, bem como proporcionará uma experiência prática valiosa, preparando os alunos para os desafios do mercado de trabalho.

Além disso, o projeto do protótipo contempla o uso de componentes disponíveis no Instituto, demonstrou que é possível desenvolver soluções de alta qualidade de maneira econômica e sustentável. Este projeto também destacou a importância de uma abordagem interdisciplinar, combinando conhecimentos de mecânica, eletrônica e controle automático. A colaboração entre diferentes áreas do conhecimento foi essencial para o sucesso do desenvolvimento desse estudo, mostrando que soluções complexas requerem a integração de múltiplas disciplinas.

Com os resultados positivos alcançados, este trabalho abre espaço para diversos desenvolvimentos futuros. Algumas direções promissoras incluem:

- Fabricação das peças e montagem do protótipo do equipamento;
- Projetar um sistema de refrigeração para os eletrodos;

- Criação de plano de manutenções preventivas para manter a integridade do protótipo;

Em suma, o desenvolvimento deste estudo não apenas atingiu seus objetivos iniciais, mas também abriu novas possibilidades para melhorias contínuas e inovações futuras. O sucesso deste projeto demonstra o potencial de soluções criativas e colaborativas no enfrentamento de desafios educacionais e industriais, e reforça a importância de uma formação prática sólida para os futuros profissionais de engenharia.

# Referências

- AWARI. Metodologias de desenvolvimento de produtos: Escolhendo o método certo para o seu produto. 2023. Disponível em: <<https://awari.com.br/metodologias-de-desenvolvimento-de-produtos-escolhendo-o-metodo-certo-para-o-seu-produto/#:~:text=1.-,Melhor%20gestÃo%20de%20tempo%20e%20recursos%3A,recursos%20e%20evitar%20atrasos%20desnecessÃrios.>>
- BRACARENSE, A. Q. Processo de soldagem por resistência. 2000. Disponível em: <<https://infosolda.com.br/510-processo-de-soldagem-resistencia/>>.
- BRANCO, H. L. O. Avaliação de capas de eletrodos utilizadas na soldagem por resistência de chapas galvanizadas automotivas. 2004. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/33534/R%20-%20D%20-%20HIDERALDO%20LUIZ%20OSORIO%20BRANCO.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>.
- CHRISTOFOLETTI, G. M. Soldagem por pontos: Avaliação dos parâmetros de soldagem e das propriedades mecânicas da junta soldada. 2013. Disponível em: <[https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII\\_1Ãž\\_2013\\_Guilherme-Mendes-Christofoletti\\_Prof.Ivan\\_.pdf](https://www.demat.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/25/2018/06/TCCII_1Ãž_2013_Guilherme-Mendes-Christofoletti_Prof.Ivan_.pdf)>.
- CORREIA, A. L. G. Soldagem por resistência. 2017. Disponível em: <[https://docente.ifsc.edu.br/anderson.correia/MaterialDidatico/Eletromecanica/Modulo\\_2/Processos\\_de\\_Soldagem/Soldagem%20por%20ResistÃncia.pdf](https://docente.ifsc.edu.br/anderson.correia/MaterialDidatico/Eletromecanica/Modulo_2/Processos_de_Soldagem/Soldagem%20por%20ResistÃncia.pdf)>.
- G.HARSHAVARDHAN; G.HARICHARAN; P.V.SUBBAREDDY; K.SAMPATHKUMAR. 3d printing:the dawn of a new era in manufacturing. 2014. Disponível em: <<https://www.ijritcc.org/index.php/ijritcc/article/view/3713/3713>>.
- KRUGER, T. P. Transformadores, disciplina de eletromagnetismo. 2016. Disponível em: <[http://wiki.itajai.ifsc.edu.br/images/5/5a/ELM18702\\_-\\_Transformadores.pdf](http://wiki.itajai.ifsc.edu.br/images/5/5a/ELM18702_-_Transformadores.pdf)>.
- MARIMAX. Solda por resistência- apostila. 2004. Disponível em: <[https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos\\_solda/apostila-solda-por-resistencia.pdf](https://infosolda.com.br/wp-content/uploads/Downloads/Artigos/processos_solda/apostila-solda-por-resistencia.pdf)>.
- MARTINS, G. C. P. Modelagem e simulação de um atuador elétrico linear. 2016. Disponível em: <<https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/29781/29781.PDF>>.
- MFG, M. Máquinas de solda por pontos: um guia completo. 2023. Disponível em: <[https://www.machinemfg.com/spot-welding-machines-guide/?expand\\_article=1](https://www.machinemfg.com/spot-welding-machines-guide/?expand_article=1)>.
- PEREIRA, B. D. J.; SANTOS, F. G. D.; SANTOS, L. D.; RIBEIRO, V. T. T. Protótipo de uma máquina de solda ponteadeira. 2016. Disponível em: <<http://www.ifba.edu.br/professores/elvio/tcc/tcc-solda-ponteadeira.pdf>>.
- RIGHI, I. B. Análise dos parâmetros de processo de uma solda por resistência entre um lead faixa e uma caneca de alumínio. 2022. Disponível em: <<https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/251655/001153121.pdf?sequence=1>>.

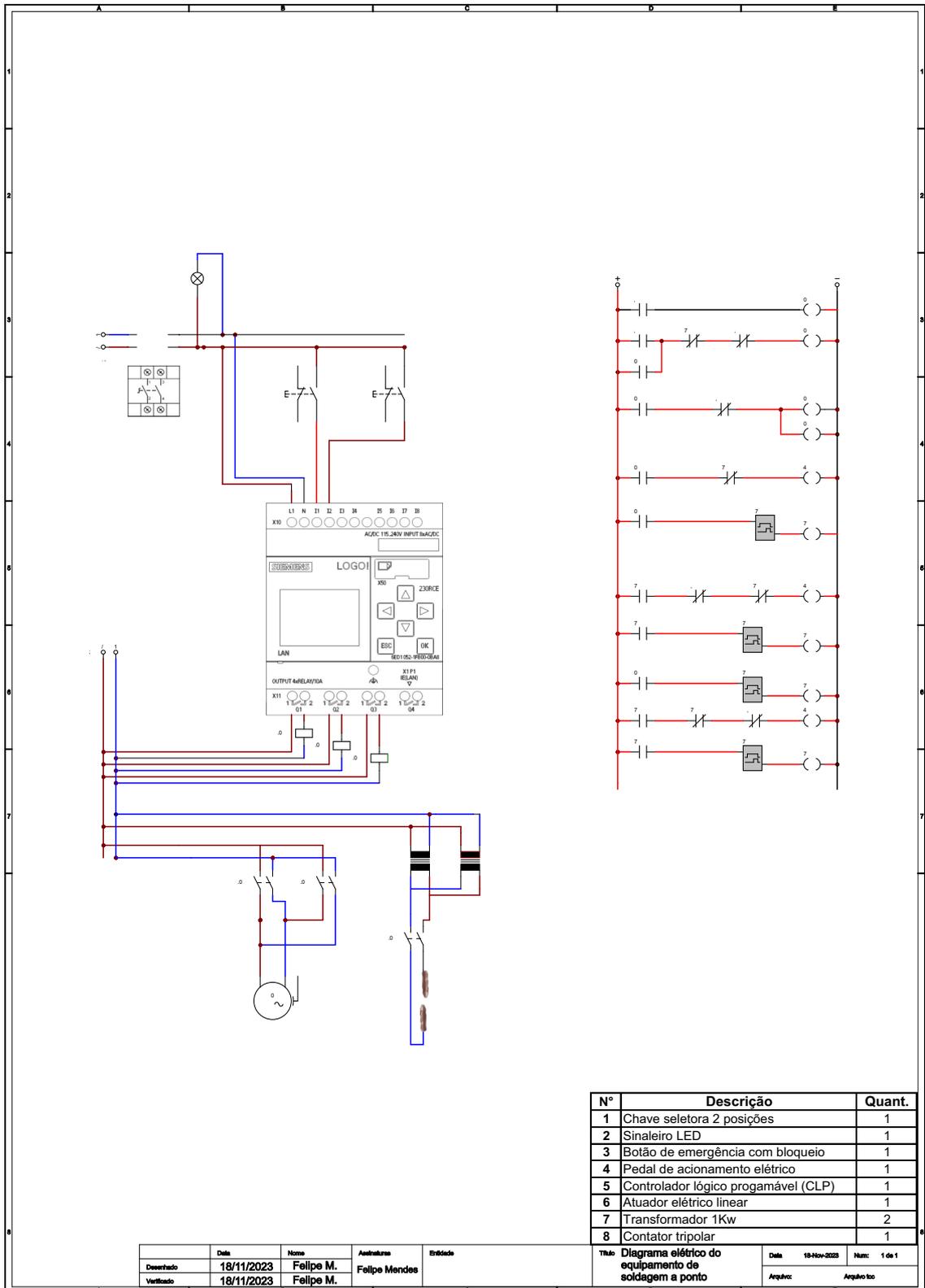
SILVA, A. L. A.; FEITOSA, A. D.; ALBUQUERQUE, R. M. de; XAVIER, A. da S. Manufatura aditiva: Caracterização e comparação com os processos de produção existentes. 2018. Disponível em: <[https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN\\_WIC\\_264\\_516\\_35268.pdf](https://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_WIC_264_516_35268.pdf)>.

SOARES, E. F.; SANTOS, J. P.; SILVA, L. M.; FERNANDES, E. F. Influência da corrente elétrica no processo de soldagem a resistência por pontos aplicados na montagem de carrocerias em uma indústria automotiva. 2021. Disponível em: <<https://repositorio.animaeducacao.com.br/handle/ANIMA/18832>>.

UMANS, S. D. Máquinas elétricas de fitzgerald e kingsley. 2014. Disponível em: <<https://www.drb-m.org/mqeletr/Maquinas-Eletricas-Livro.pdf>>.

WAINER, E.; BRANDI, S. D.; MELLO, F. D. H. de. Soldagem processos e metalurgia. 1992.

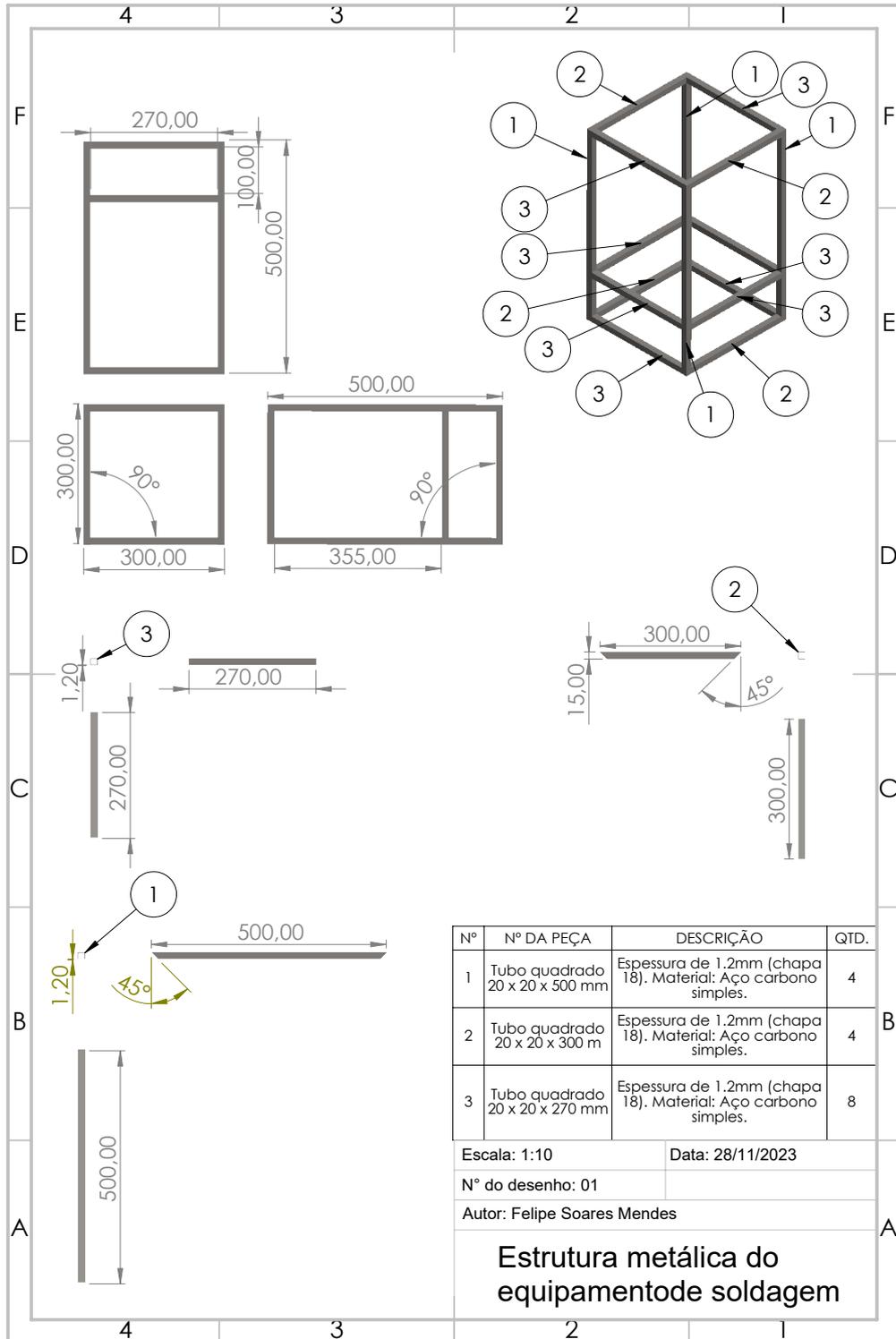
# Apêndice A



# Apêndice B

Nº	Componente	Descrição	Material	QTD.	Disp. no Campus?	Custo (R\$)
1	Tubo de sustentação	Tubo Quadrado 20mm x 20mm x 1,20mm (Chapa 16) x 500mm; Laminado a frio; Peso: 0,717 Kg por metro;	Aço SAE-1020	4	Sim	48,73
2	Tubo de sustentação	Tubo Quadrado 20mm x 20mm x 1,20mm (Chapa 16) x 300mm; Laminado a frio; Peso: 0,717 Kg por metro;	Aço SAE-1020	4	Sim	
3	Tubo de sustentação	Tubo Quadrado 20mm x 20mm x 1,20mm (Chapa 16) x 260mm; Laminado a frio; Peso: 0,717 Kg por metro;	Aço SAE-1020	8	Sim	
6	Tubo de fixação do atuador	Tubo Quadrado 20mm x 20mm x 1,20mm (Chapa 16) x 25mm; Laminado a frio; Peso: 0,717 Kg por metro;	Aço SAE-1020	1	Sim	
4	Tubo da haste inferior	Tubo Quadrado 30mm x 30mm x 1,20mm (Chapa 16) x 300mm; Laminado a frio; Peso: 1,09 Kg por metro;	Aço SAE-1020	1	Sim	23,90
5	Tubo da haste superior	Tubo Quadrado 60mm x 40mm x 1,20mm (Chapa 16) x 350mm; Laminado a frio; Peso: 1,84 Kg por metro;	Aço SAE-1020	1	Sim	42,90
7	Tubo circular da haste superior	Tubo Redondo 15,88 mm (5/8") x 1,20mm (Chapa 16) x 200mm; Laminado a quente; Peso: 0,45 Kg por metro;	Aço SAE-1020	1	Sim	39,70
8	Base de fixação do eletrodo fixo.	Fabricação por manufatura aditiva, equipamento para impressão no campus.	Poliácido láctico	1	Sim	12,90
9	Base de fixação do eletrodo móvel.	Fabricação por manufatura aditiva, equipamento para impressão no campus.	Poliácido láctico	1	Sim	7,10
10	Eletrodo cilíndrico ponteadado	Eletrodo de 70mm x 12,7 mm de diâmetro; Ponta com chanfro de 30°;	Cobre eletrolítico (99, 9% puro)	2	Não	37,90
11	Atuador linear elétrico	Atuador elétrico DC 12v; Força 100N; Distancia do cursor 50mm; Amperagem: 1,0-2,0 A; Vel.60mm/s.	-	1	Não	137,90
12	Chapa (superior, inferior e interna)	Chapa de 1,20mm (Chapa 16) x 300mm x 300mm; Laminado a frio; Peso: Aprox. 0,850 Kg	Aço SAE-1020	3	Sim	89,75
13	Chapas laterais	Chapa de 1,20mm (Chapa 18) x 500mm x 300mm; Laminado a frio; Peso: Aprox. 1,422 Kg	Aço SAE-1020	4	Sim	
14	Botão de emergência	Botão de emergência com trava Metaltex M20AKR-R-1B	-	1	Sim	17,90
15	Chave seletora	Chave seletora 2 posições com caixa de proteção	-	1	Sim	33,17
16	Sinaleiro redondo	Sinaleiro LED redondo Verde 22Mm 12V Led Schneider	-	1	Sim	12,90
17	Interruptor Tipo Pedal	Interruptor Tipo Pedal Ci-14ay ( Md-14h )	-	1	Não	63,90
18	Controlador Lógico programável	CLP WEG - Clic02 - CLW-02 10HR-A 3RD; AC 100-240 V	-	1	Sim	1270,00
20	Ventilador	Ventilador 172x150x51 Biv Rol. 3000rpm - 1722a Asa-17251b	-	1	Similar	35,90
21	Fonte de alimentação	Fonte de alimentação chaveada 12 V CC 10,0 A Bivolt	-	1	Similar	27,50
22	Cabo de alimentação	Cabo PP flexível 2 vias 1,50 mm; 3,00 metros	-	1	Sim	10,17
	Transformador	Modelo: gal-900e-4	-	2	Sim	70,56
23	Cabo do circuito secundário	Cabo Rígido 7 Pernas 25mm	-	1	Sim	22,12
Total:						2004,9

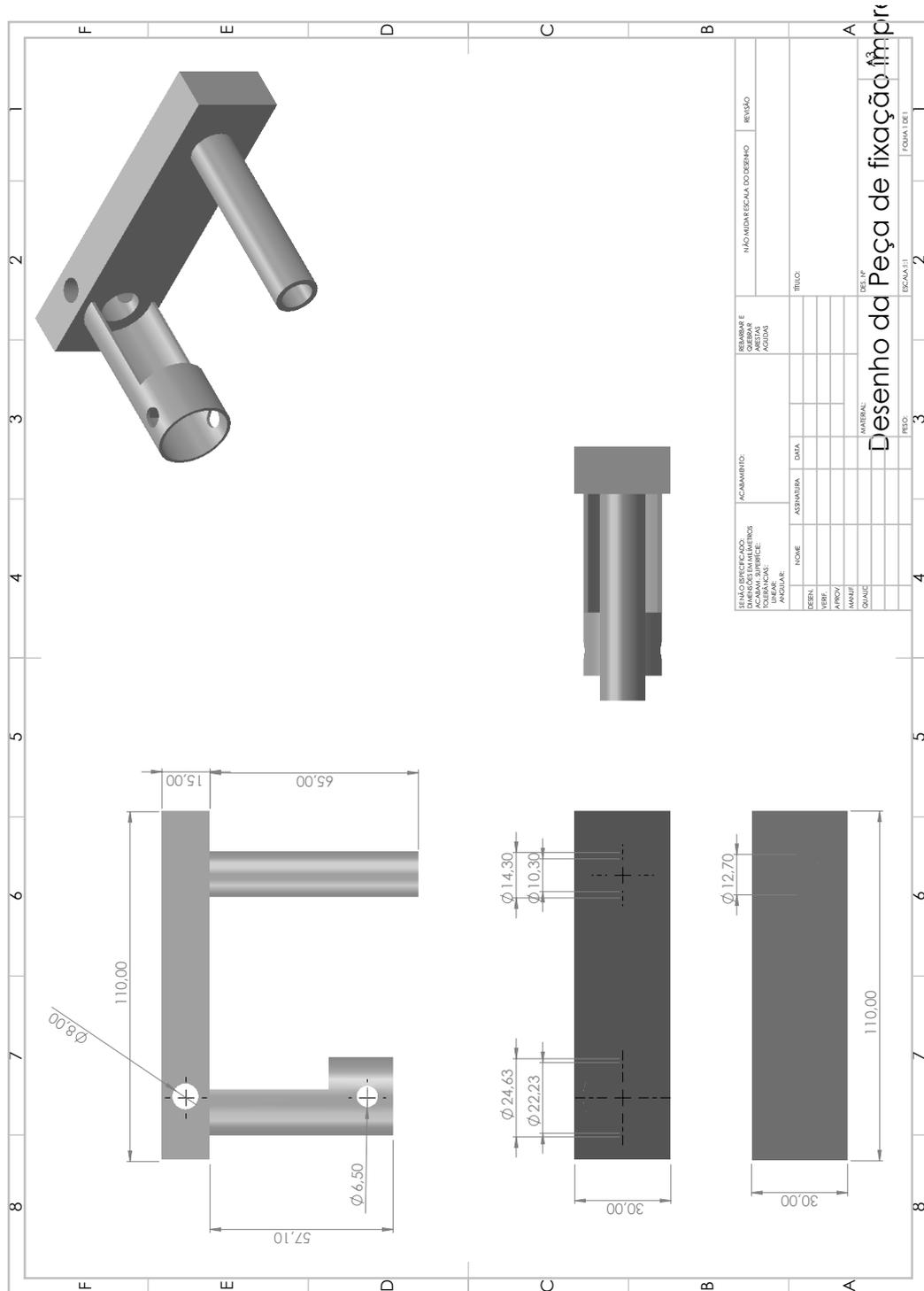
# Apêndice C



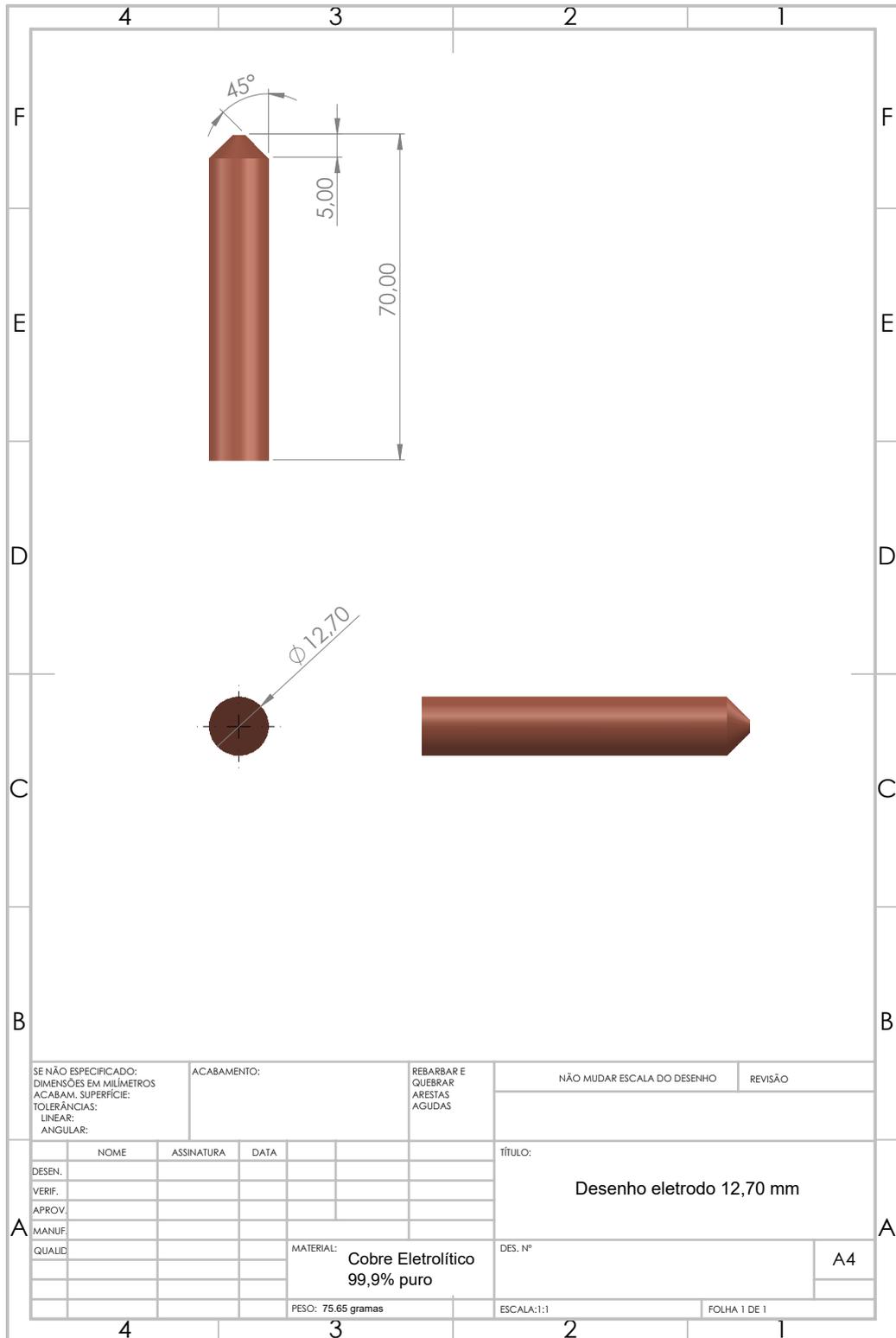




# Apêndice F



# Apêndice G



SE NÃO ESPECIFICADO: DIMENSÕES EM MILÍMETROS ACABAM. SUPERFÍCIE: TOLERÂNCIAS: LINEAR: ANGULAR:		ACABAMENTO:	REBARBAR E QUEBRAR ARESTAS AGUDAS	NÃO MUDAR ESCALA DO DESENHO	REVISÃO
DESEN.	NOME	ASSINATURA	DATA	TÍTULO: <b>Desenho eletrodo 12,70 mm</b>	
VERIF.				DES. Nº	
APROV.				A4	
MANUF.				MATERIAL: <b>Cobre Eletrolítico 99,9% puro</b>	
QUALID.				PESO: 75,65 gramas	ESCALA:1:1
					FOLHA 1 DE 1