

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM**  
**ENGENHARIA MECÂNICA**

Estimação do Aporte de Calor em Processo  
de Soldagem por Descarga Capacitiva  
Usando Técnica de Problema Inverso

**Fábio Silva Faria**

Itajubá, 16 de Fevereiro de 2022

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA**

**Fábio Silva Faria**

**Estimação do Aporte de Calor em Processo  
de Soldagem por Descarga Capacitiva  
Usando Técnica de Problema Inverso.**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

**Área de Concentração: Fluido-Térmica e Máquinas de fluxo**

**Orientador: Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva**

**Coorientador: Prof. Dr. Bruno de Campos Salles Anselmo**

**16 de Fevereiro de 2022**

**Itajubá**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ - UNIFEI  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

Estimação do Aporte de Calor em Processo  
de Soldagem por Descarga Capacitiva  
Usando Técnica de Problema Inverso.

**Fábio Silva Faria**

Dissertação aprovada por banca examinadora em  
16 de Fevereiro de 2022, conferindo ao autor o  
título de **Mestre em Ciências em Engenharia  
Mecânica.**

***Banca Examinadora:***

Prof. Dr. André Guimarães Ferreira - CEFET-MG

Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa - UNIFEI

Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e  
Silva (Orientador) - UNIFEI

Prof. Dr. Bruno de Campos Salles Anselmo (Coo-  
orientador) - UFR

**Itajubá**

**2022**

---

Fábio Silva Faria

Estimação do Aporte de Calor em Processo de Soldagem por Descarga Capacitiva Usando Técnica de Problema Inverso/ Fábio Silva Faria. – Itajubá, 16 de Fevereiro de 2022-

75 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva

Dissertação (Mestrado)

Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI

Programa de pós-graduação em engenharia mecânica, 16 de Fevereiro de 2022.

1. Descarga Capacitiva. 2. Técnica da Função Especificada. 3. Comsol. I. Prof. Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Estimação do Aporte de Calor em Processo de Soldagem por Descarga Capacitiva Usando Técnica de Problema Inverso

CDU 07:181:009.3

---

Fábio Silva Faria

# **Estimação do Aporte de Calor em Processo de Soldagem por Descarga Capacitiva Usando Técnica de Problema Inverso**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica.

Trabalho aprovado. Itajubá, 16 de Fevereiro de 2022:

---

**Prof. Dr. Sandro Metrevelle  
Marcondes de Lima e Silva- UNIFEI**  
Orientador

---

**Prof. Dr. Bruno de Campos Salles  
Anselmo- UFR**  
Coorientador

---

**Prof. Dr. André Guimarães Ferreira -  
CEFET-MG**

---

**Prof. Dr. Edmilson Otoni Corrêa -  
UNIFEI**

Itajubá  
16 de Fevereiro de 2022

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, que é bom o tempo todo, pela vida, pela sabedoria e pelo amor.

Aos meus pais Guilherme e Lourdes que sempre estiveram ao meu lado e deram o apoio necessário para que mais uma etapa fosse concluída.

À minha namorada, Karina Silva Rodrigues, pela paciência e incentivo durante todo o processo.

Ao professor Dr. Sandro Metrevelle Marcondes de Lima e Silva, pela oportunidade e confiança em meu trabalho, pelo apoio e pela orientação ao longo do curso.

Ao meu amigo e coorientador Dr. Bruno de Campos Salles Anselmo, pela amizade, ajuda e conselhos durante todo o curso.

Aos colegas do Laboratório de Transferência de Calor, em especial àqueles que participaram diretamente no trabalho: Rodrigo Gustavo Dourado da Silva por todo auxílio na elaboração do trabalho, Thiago Crabi de Freitas pelo suporte no desenvolvimento eletrônico do trabalho.

Ao Conselho Nacional do desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro através da concessão de bolsa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), ao Conselho de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo suporte financeiro e também ao Instituto de Engenharia Mecânica – IEM pela estrutura fornecida para o desenvolvimento desse trabalho.

*“A persistência é o caminho do êxito”  
(Charlie Chaplin)*

# Resumo

Apresenta-se neste trabalho um procedimento experimental e numérico para estimação do aporte térmico no processo de soldagem por descarga capacitiva de termopares. O objetivo do trabalho é promover melhorias em um dispositivo importante na medição de temperaturas, o termopar. O trabalho propõe melhoria na fixação desse dispositivo em metais e propõe também a estimação da energia necessária para soldá-lo com eficácia. O modelo térmico utilizado é baseado na equação da difusão de calor tridimensional transiente com mudança de fase, modelada em função da entalpia. As propriedades térmicas do cromel e alumel, materiais que compõem os dois fios dos termopares tipo K, foram consideradas dependentes da temperatura. O modelo foi resolvido usando o programa COMSOL *Multiphysics*. A equação da curva de potência em relação ao tempo foi definida a partir de conceitos teóricos de descarga de capacitores. A técnica de problema inverso não linear usada para resolver o problema de condução de calor foi o Método da Função Especificada iterativa. Esta técnica estima o fluxo de calor que minimiza uma função objetivo, definida como o quadrado da diferença da temperatura experimental e numérica para cada intervalo de tempo. Um código numérico foi usado no MATLAB em conjunto com o *software* COMSOL *Multiphysics* para a aplicação da técnica de problema inverso. O método experimental foi utilizado para obter temperaturas próximas da região de soldagem, as quais foram utilizadas na execução da técnica de problema inverso. Para calcular a eficiência do processo foram utilizados a integral da potência estimada pelo tempo, a qual define a energia em forma de calor utilizada na fusão dos fios dos termopares, e a energia armazenada no BC (*Banco de Capacitores*) do equipamento, definido por conceitos de eletricidade. A metodologia proposta foi viável para a estimação do aporte térmico e eficiência para o processo de soldagem por descarga capacitiva. A taxa de calor foi estimada a partir de dados experimentais de temperaturas, as temperaturas calculadas computacionalmente, a partir da taxa de calor estimada, apresentaram baixa divergência em relação aos dados experimentais. Além disso, apresenta-se o desenvolvimento de um equipamento de soldagem por descarga capacitiva. O equipamento consiste em um BC que armazena a energia fornecida por uma fonte chaveada. A quantidade de energia armazenada no BC é controlada por um microcontrolador Arduíno. A interface do equipamento conta com um *display* de cristal líquido e uma botoeira, os quais possibilitam que o operador selecione o tipo de termopar que deseja soldar. Este equipamento foi capaz de soldar termopares com bitolas de até 24 AWG, correspondente ao diâmetro de 0,511 mm.

**Palavras-chaves:** Transferência de Calor. Problemas Inversos. Técnica da Função Especificada. Descarga Capacitiva. Termopares. Comsol.

# Abstract

This work presents an experimental and numerical procedure for estimating the thermal input in the capacitive discharge welding process of K-type thermocouples wire. The objective of the work is to promote improvements in a device at the important temperature, the thermocouple. The work of proposed improvement in the solution of this in metals and also of possible energy solution of risk solution. The thermal model used is based on the equation of transient three-dimensional heat diffusion with phase change, modeled as a function of enthalpy. The thermal properties of chromel and alumel, materials that make up the two wires of k-type thermocouples, were considered temperature-dependent. The model was solved using the program COMSOL Multiphysics. The equation of the power curve in relation to time was defined from theoretical concepts of capacitor discharge. The nonlinear inverse problem technique used to solve the heat conduction problem was the iterative Function Specification Method. This technique estimates the heat rate that minimizes an objective function, defined as the square of the experimental and numerical temperature difference for each time interval. A numerical code was used in MATLAB together with software COMSOL Multiphysics to applied the inverse problem technique. The experimental method was used to obtain temperatures close to the welding region, which were used to apply the inverse problem technique. To calculate the efficiency of the process, the integral of the power estimated by time was used, and the energy stored in the capacitors bank of the equipment, defined by concepts of electricity. The proposed methodology was able for estimating the thermal input and efficiency for the capacitive discharge welding process. The heat rate was estimated from experimental temperature data, the temperatures calculated computationally, from the estimated heat rate, showed low divergence in relation to the experimental data. In addition, the development of a capacitive discharge welding equipment is presented. The equipment consists of a capacitors bank that stores the energy supplied by a switched source. The amount of energy stored in capacitors bank is controlled by an Arduino microcontroller. The equipment interface has a liquid crystal display and a button, which allow the operator to select the type of thermocouple he wants to weld. This equipment was able to weld thermocouples wire thicker than 24 AWG.

**Key-words:** Heat transfer. Inverse Problems. Function Specification Technique. Capacitive Discharge. Thermocouples.

# Lista de ilustrações

Figura 3.1 – Conversor AC/DC. . . . .	26
Figura 3.2 – Diagrama Circuito RC. . . . .	27
Figura 3.3 – Carga e Descarga do capacitor. . . . .	28
Figura 3.4 – Associação de capacitores em paralelo. . . . .	28
Figura 3.5 – Associação de capacitores em série. . . . .	29
Figura 3.6 – Diagrama de Blocos de uma fonte chaveada. . . . .	30
Figura 3.7 – Estrutura relé eletromecânico. . . . .	31
Figura 3.8 – Relé com o circuito fechado. . . . .	32
Figura 3.9 – Relé com o circuito normalmente fechado. . . . .	32
Figura 3.10–Relé com contato reversível. . . . .	32
Figura 3.11–Módulo relé. . . . .	33
Figura 3.12–Divisor de tensão simples. . . . .	34
Figura 4.1 – Fluxograma de operação. . . . .	35
Figura 4.2 – Diagrama de blocos da montagem do equipamento. . . . .	36
Figura 4.3 – Esquema elétrico. . . . .	37
Figura 4.4 – Capacitores Associados. . . . .	39
Figura 4.5 – Fonte Chaveada. . . . .	40
Figura 4.6 – Vista inferior da placa de circuito impresso. . . . .	41
Figura 4.7 – Vista superior da placa de circuito impresso. . . . .	41
Figura 4.8 – Placa de circuito impressa montada. . . . .	41
Figura 4.9 – Montagem do banco de capacitores. . . . .	42
Figura 4.10–Montagem geral do equipamento. . . . .	42
Figura 4.11–Interior do equipamento. . . . .	43
Figura 4.12–Equipamento final. . . . .	43
Figura 4.13–Solda realizada pelo equipamento. . . . .	44
Figura 4.14–Esquema de montagem da bancada experimental. . . . .	45
Figura 4.15–Montagem para a execução do experimento. . . . .	45
Figura 4.16–Termopar após a execução do experimento. . . . .	46
Figura 5.1 – Modelo Térmico. . . . .	47
Figura 5.2 – Variação do calor específico do cromel e alumel. . . . .	50
Figura 5.3 – Variação da condutividade térmica do cromel e alumel . . . . .	50
Figura 5.4 – Variação da emissividade total hemisférica do cromel. . . . .	51
Figura 5.5 – Variação da emissividade total hemisférica do Alumel. . . . .	51
Figura 6.1 – Diâmetro das esferas de solda. . . . .	57
Figura 6.2 – Curva de Temperatura Experimental 1. . . . .	58
Figura 6.3 – Curva de Temperatura Experimental 2. . . . .	58

Figura 6.4 – Perfil de temperatura medido experimentalmente . . . . .	59
Figura 6.5 – Potência estimada x Tempo . . . . .	60
Figura 6.6 – Comparação entre temperatura experimental e estimada. . . . .	60
Figura 6.7 – Erro relativo em a cada passo de Tempo. . . . .	61

# Lista de abreviaturas e siglas

AWG	<i>American Wire Gauge</i>	35
BC	<i>Banco de Capacitores</i>	8
BFGS	<i>Broyden-Fletcher-Goldforb-Shanno</i>	24
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>	19
CHT	<i>Conjugate Heat Transfer</i>	19
DDP	<i>Diferença de Potencial</i>	31
GTAW	<i>Gas Tungsten Arch welding</i>	23
LCD	<i>Liquid Cristal Display</i>	37
LED	<i>Light-emitting diode</i>	38
RANS	<i>Reynolds Averaged Navier–Stokes</i>	19
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>	20
TTR	<i>Time Traveling Regularization</i>	23

# Lista de símbolos

$C$	Capacitância	27
$C_{\text{eq}}$	Capacitância equivalente	28
$L$	Calor latente	48
$Nu_D$	Número de Nusselt	49
$Pr$	Número de Prandtl	49
$R$	Resistência	27
$RC$	Resistor Capacitor	27
$Ra_D$	Número de Rayleigh	49
$T$	Temperatura	48
$T_0$	Temperatura inicial	47
$T_m$	Temperatura de Fusão	48
$T_\infty$	Temperatura Ambiente	48
$U$	Energia potencial elétrica	29
$V$	Tensão	28
$V_0$	Tensão no circuito	27
$V_c$	Tensão de Carga	27
$V_d$	Tensão de Descarga	27
$\epsilon$	Emissividade Térmica	48
$\rho$	massa específica [ $kg/m^3$ ]	48
$\sigma$	Coeficiente de Stefan-Boltzmann	48
$c_p$	Calor específico a pressão constante [ $J/(kg \times ^\circ C)$ ]	48
$h$	Coeficiente de transferencia de calor por convecção	48
$k$	Condutividade térmica [ $W/(m \times K)$ ]	48
$n$	Direção normal	48
$t$	tempo	27

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	Justificativa	16
1.2	Objetivos	17
1.3	Organização do trabalho	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>18</b>
2.1	Termopares	18
2.2	Soldagem	20
2.3	Problemas Inversos	22
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA- ELETRÔNICA</b>	<b>26</b>
3.1	Armazenamento de energia	26
3.2	Alimentação do banco de capacitores	30
3.3	Módulo Relé	31
3.4	Automatização do carregamento	33
3.5	Divisor de tensão	34
<b>4</b>	<b>EQUIPAMENTO DE SOLDAGEM POR DESCARGA CAPACITIVA</b>	<b>35</b>
4.1	Esquema elétrico do equipamento	36
4.2	Materiais	36
4.2.1	Capacitores	38
4.2.2	Fonte Chaveada	39
4.2.3	Leitura da tensão submetida no Banco de Capacitores	39
4.2.4	Placa de Circuito Impresso	40
4.3	Montagem	41
4.4	Procedimentos experimentais	44
4.4.1	Obtenção dos dados de temperatura	44
<b>5</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA- TRANSFERÊNCIA DE CALOR</b>	<b>47</b>
5.1	Modelo térmico	47
5.2	Solução Numérica	49
5.3	Problemas Inversos em Transferência de Calor	52
5.3.1	Curva de descarregamento do capacitor x potência	52
5.3.2	Método da Função Especificada Não Linear	53
<b>6</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>56</b>
6.1	Equipamento de soldagem	56

6.2	Curvas experimentais de temperatura . . . . .	57
6.3	Estimação da potência no processo de soldagem por descarga ca- pacitiva . . . . .	59
6.4	Eficiência . . . . .	61
7	CONCLUSÃO . . . . .	62
7.1	Equipamento de soldagem por descarga capacitiva . . . . .	62
7.2	Estimação da potência no processo de soldagem por descarga ca- pacitiva . . . . .	62
7.3	Propostas para trabalhos futuros . . . . .	63
	REFERÊNCIAS . . . . .	64
	APÊNDICES . . . . .	67
	APÊNDICE A – CÓDIGO COMPUTACIONAL PARA O ARDUÍNO . . . . .	68

# 1 Introdução

Com o avanço tecnológico, alguns dispositivos de medição, como sensores, se tornaram parte fundamental de equipamentos, pela necessidade do acompanhamento de parâmetros durante a operação desses equipamentos. Em muitos casos, o monitoramento da temperatura evita o desgaste de peças e mantém o bom funcionamento do equipamento.

Os termopares são sensores de temperatura que estão presentes em laboratórios e em equipamentos de alta performance, como turbinas de aviões. Devido a isso, é importante que eles tenham pequena incerteza e boa confiabilidade.

A sensibilidade do sensor e a necessidade da exposição desse dispositivo a altas temperaturas, propõe o desafio de projetar um instrumento sensível e ao mesmo tempo robusto para suportar altas temperaturas e desgastes mecânicos. Outro desafio é a utilização dos termopares em nano dispositivos, os quais exigem sensores de pequenas dimensões e pequenas incertezas.

## 1.1 Justificativa

Devido a escassez de equipamentos capazes de soldar fios de pequena espessura no mercado, o equipamento desenvolvido neste trabalho contribui para a realização de experimentos no laboratório de transferência de calor. A vantagem de desenvolver um equipamento próprio é ter um equipamento personalizado, com parâmetros pré definidos, o que facilita a operação pelo usuário.

A junção dos fios dos termopares é realizada por um equipamento de soldagem resistiva utilizando a técnica de descarga capacitiva. O banco de capacitores do equipamento deve descarregar a quantidade de energia suficiente para unir os dois materiais do termopar.

Determinar o aporte térmico de um processo de soldagem é essencial para melhorar a qualidade do procedimento. Com o conhecimento da quantidade exata de calor utilizada no processo, é possível controlar o equipamento para que não haja excesso ou falta de energia. Quando há excesso de energia no processo, o material pode se deteriorar ou oxidar, perdendo suas propriedades mecânicas. A presença de oxidação também afeta as propriedades mecânicas, o que pode levar à ruptura do termopar durante as aplicações de medição. Por outro lado, se houver falta de energia, a junção dos materiais fica fraca e pode desprender.

Neste trabalho contribui-se com estudos existentes na área de transferência de calor no processo de soldagem, no qual existem poucos trabalhos que analisam um processo

extremamente rápido, como o de descarga capacitiva.

## 1.2 Objetivos

O principal objetivo desse trabalho é melhorar o desempenho da medição de temperatura através de melhorias no equipamento de soldagem de termopares.

Os objetivos específicos são: estimar a energia necessária para soldar os termopares através de técnica de problema inverso, relacionar essa energia com a energia armazenada nos capacitores e automatizar a liberação de energia para cada tipo de termopar.

## 1.3 Organização do trabalho

No capítulo 2 apresentam-se alguns trabalhos já desenvolvidos buscando melhorias em materiais e técnicas para obter precisão em medições de temperaturas.

Apresenta-se no capítulo 3 a teoria necessária para a elaboração do equipamento de soldagem por descarga capacitiva. Detalhando o funcionamento de cada componente do equipamento.

No capítulo 4 apresenta-se o princípio de funcionamento do equipamento e como ele foi projetado e desenvolvido. Além disso, são detalhadas e justificadas as especificações dos componentes do equipamento. Na última seção do capítulo são apresentados os procedimentos experimentais utilizados para obter o perfil de temperatura em um ponto do domínio. Esses dados foram necessários na aplicação dos problemas inversos em transferência de calor.

No capítulo 5 faz-se apresentação da teoria de transferência de calor utilizada para elaborar o modelo térmico do processo de soldagem. Neste capítulo, é apresentada a equação da difusão de calor com mudança de fase. Além disso, apresenta-se a aplicação do problema inverso para estimar a energia necessária no processo de soldagem.

No capítulo 6 são apresentados os resultados obtidos com o equipamento, o modelo térmico, o procedimento experimental e com os problemas inversos. Também é apresentado o resultado da estimação da eficiência do processo de soldagem.

Por fim, no capítulo 7 são apresentados as conclusões sobre o trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Revisão bibliográfica

Neste capítulo apresenta-se uma breve revisão sobre trabalhos que tiveram como objetivo aprimorar alguns dos procedimentos usados para medição e estimação de temperatura, trabalhos que envolveram técnicas de soldagem de ligas metálicas, modelagem térmica de processos mecânicos e também trabalhos que envolveram técnicas de problemas inversos em transferência de calor.

### 2.1 Termopares

Tougas *et al.* [1] citaram o problema no monitoramento de temperatura em seções quentes de motores de turbina a gás. Os autores se concentraram em termopares de filme fino a base de cerâmica, devido as altas temperaturas de fusão e estabilidade química e elétrica do material a temperaturas elevadas. Eles utilizaram a metodologia experimental para fabricar os termopares, foi utilizado o método de fotolitografia e a técnica de *sputtering* para revestir os materiais, a técnica de recozimento foi utilizada para remover pontos defeituosos, o que inclui prisão de argônio e densificação dos filmes. A técnica de espectroscopia eletrônica foi utilizada para identificar a oxidação formada nas pernas dos termopares. Os autores obtiveram resultados em que os termopares de película fina de platina e paládio foram mais estáveis que o tipo S e tipo K em temperaturas acima de 1000°C, o excesso de nitrogênio nos filmes cerâmicos teve uma boa taxa de deriva. Os autores concluíram que nenhum termopar de filme fino superou os termopares de arame, porém muitos termopares tiveram desvios na mesma ordem que os termopares de arame, com uma melhoria na potência termoelétrica devido à base cerâmica e se mostraram promissores como sensores de temperatura em ambientes agressivos.

Rivera *et al.* [2] trabalharam com problemas na medição em temperaturas de seções quentes de turbinas ou motores, no qual o instrumento de medição também deve suportar altas temperaturas. A proposta do trabalho foi revestir as junções de platina e carboneto de silício para melhorar a estabilidade das medições. Eles utilizaram método experimental para fabricar um termopar de filme fino revestido com material dielétrico e a criação de diferentes barreiras de difusão. Após a fabricação, foram realizados testes no termopar com exposição a temperaturas elevadas e também calculada a energia termoelétrica do termopar. Os autores tiveram como resultado que o termopar sem revestimento protetor falhou com a exposição a moderadas temperaturas, o termopar com barreira de difusão foi capaz de atingir temperaturas de 950°C. Os autores concluíram que as falhas nos termopares são atribuídas ao aumento da taxa de difusão de oxigênio, a qual para temperaturas baixas essas taxas são pequenas, e o revestimento de proteção foi essen-

cial para o sensor funcionar corretamente em altas temperaturas, porém serão necessários melhores filmes de barreiras para atingir temperaturas além de 1000°C.

Zou *et al.* [3] estudaram falhas na medição de temperatura do gás no duto de exaustão de um motor aero devido a erros de estado estacionário em termopares blindados. Os autores modelaram computacionalmente o duto de exaustão com apoio do *software* Ansys CFX para resolver equações visuais constantes de RANS (*Reynolds Averaged Navier–Stokes*) usando o Método de Volume Finito, a tecnologia CFD (*Computational Fluid Dynamics*) foi necessário para validar o fluxo ao redor do tubo de blindagem do termopar, também foi utilizado o método de simulação numérica CHT (*Conjugate Heat Transfer*) para estimar a proporção de diferentes fontes de erros (convecção, condução e radiação) de estado estacionário. Os resultados dos modelos e da simulação de CHT foram semelhantes e indicam boa aplicabilidade do modelo. A diferença entre o modelo de erro de radiação, o qual representa a maior parcela dos erros, e a simulação, foi pequena, portanto o modelo pode ser utilizado para se ter uma boa previsão. Os autores concluíram que sob alta velocidade do fluxo do gás, o erro de condução é responsável pela maior parcela dos erros estacionários. O modelo de erro de velocidade proposto não pode determinar a velocidade sem comprovar com dados experimentais e que os resultados mostraram que os modelos podem ser usados para prever os erros de estado estacionário do termopar blindado.

Webster e Saunders [4] analisaram os erros de medição de temperatura devido ao desgaste de termopares do tipo S. Esses termopares são compostos pela liga de Platina (Pt) e Ródio (Rh) e a exposição deles a temperaturas elevadas ocasiona desgaste no dispositivo. Esse tipo de termopar é referência em muitos laboratórios industriais. Foram realizados experimentos com 3 termopares do tipo S de fornecedores diferentes, os termoelementos foram recozidos a uma temperatura de 1100°C (temperatura a qual ocorre a remoção da oxidação do Ródio), para que os materiais fossem experimentados a partir de um estado conhecido e repetível, e então foram expostos a determinadas temperaturas e períodos. Os resultados mostraram desvios nas curvas do coeficiente de Seebeck quando os termoelementos estavam expostos a uma temperatura entre 650°C e 900°C, faixa em que ocorre a oxidação do Ródio. Os autores concluíram que para laboratórios de primeira linha recomenda-se testar os termopares entre 4 e 24 horas de uso e para os de segunda linha após 100 horas de uso, geralmente essas análises implicam na calibração do material, sendo recomendado restaurar o termopar através de recozimento a 1100°C após as 100 horas de uso.

Harzheim *et al.* [5] estudaram a dificuldade de sondagem e gerenciamento térmico em nano dispositivos eletrônicos e desenvolveram um termopar de material único constituído por uma estrutura de grafeno. No método experimental, eles utilizaram um micro aquecedor para fornecer calor para uma placa eletrônica e um microscópio térmico para identificar a distribuição de temperatura na placa, realizaram experimentos com várias

medidas de comprimento e espessura das pernas dos termopares e analisaram a sensibilidade do coeficiente de Seebeck para cada amostra. Os resultados dos experimentos mostraram que o grafeno possui uma maior sensibilidade em relação a outros termopares de material único, e que a sensibilidade aumenta com a diminuição da largura das pernas do termopar. Os autores concluíram que esse material poderia ser utilizado para facilitar e baratear a fabricação da termometria *on-chip*, e que a baixa sensibilidade térmica do grafeno propicia seu trabalho em sondas de temperaturas em células de organismos vivos.

## 2.2 Soldagem

Ghosh *et al.* [6] estudaram a viabilidade da microsoldagem por descarga eletroquímica em fios de termopares. Os autores realizaram experimentos para definir os pontos ótimos dos parâmetros de soldagem. Com os resultados eles definiram as equações das relações entre os parâmetros, e com isso desenvolveram um modelo teórico. O modelo teórico foi comparado com os dados experimentais e apresentaram uma concordância aceitável para uma análise simplificada. Os autores concluíram que o modelo teórico proposto pode ser usado para estimar o tempo de soldagem para diferentes parâmetros de soldagem.

Molenda *et al.* [7] analisaram a geometria da lente de solda para a determinação dos parâmetros de execução da soldagem a ponto, processo de soldagem no qual interagem fenômenos mecânicos, elétricos, térmicos e metalúrgicos, em um curto intervalo de tempo. Essa grande interação dificulta a determinação dos parâmetros de soldagem para se obter uma solda ótima. Os autores utilizaram a simulação numérica com o Método de Elementos Finitos para realizar as análises nos processos de soldagem, utilizando um modelo axissimétrico e bidimensional modelado no *software* ANSYS. Os resultados da simulação foram comparados com os trabalhos experimentais encontrados na literatura, e identificaram que para valores de correntes elétricas mais altas os resultados numéricos tiveram concordância com a literatura, também que o diâmetro da lente depende da faixa de corrente que é aplicada no processo de soldagem e para correntes mais elevadas é fornecida menos energia na produção da lente. Os autores concluíram que com o modelo numérico produzido foi possível determinar a geometria da lente de solda, porém sem considerar a influência da resistência elétrica e térmica de contato e força de aperto no processo de soldagem.

Schwedersky *et al.* [8] analisaram a grande quantidade de defeitos na soldagem TIG (*Tungsten Inert Gas*) em elevada produtividade. O objetivo foi elevar a produtividade e qualidade nesse processo. Para isso, foram realizados ensaios a partir de soldas feitas com eletrodos de tungstênio, variando os parâmetros de corrente elétrica, tipo de gás de proteção e velocidade da solda. A soldagem com proteção de argônio puro apresentaram falhas na solda com corrente acima de 200A. No processo com proteção de gás hélio puro

não foram observadas falhas no cordão de solda para nenhum valor de corrente, para a mistura de argônio e 5 % de hidrogênio o cordão obteve um bom desempenho para corrente até 300A, para a mistura argônio com 10% de hidrogênio e argônio com 15% de hidrogênio os cordões de solda obtiveram bons resultados. Os autores concluíram que o gás de proteção de solda com misturas de argônio e hidrogênio proporcionam maior eficiência de fusão quando comparados com o argônio puro ou hélio puro, isso se deve a maior condutividade térmica do hidrogênio, portanto a mistura de argônio e hidrogênio é uma alternativa para elevar a produtividade do processo **TIG**.

Jafari *et al.* [9] consideraram o defeito de assimetria da lente de solda na soldagem resistiva a ponto causados pela sequência de ponto de solda próximos um ao outro, onde um ponto interfere na soldagem do ponto seguinte, e propuseram definir a distância mínima entre os pontos. Os autores utilizaram o Método dos Elementos Finitos para modelar o problema utilizando equações elétricas, térmicas, mecânicas e propriedades dos materiais. No método experimental foi executada a soldagem a ponto, para ser comparado com a modelagem numérica. Como resultados, foram apresentados que a corrente de soldagem tem grande efeito no diâmetro e na altura da pepita de solda, além disso, quando aumenta a intensidade da corrente elétrica de soldagem, a distância entre os pontos passa a ter efeito menor na assimetria da pepita e foi observado que grande parte da energia térmica é desviada gerando, ao invés de pepita, zona de calor no material. Os autores concluíram que o resultado da comparação entre o método numérico e experimental são aceitáveis, entretanto algumas discrepâncias são observadas devida a diferença entre os valores das propriedades definidos e valores reais das propriedades da pepita de solda.

Lee *et al.* [10] apresentaram a falta de exatidão nos parâmetros de soldagem a ponto, eles citaram que quando falta calor na união de dois metais, ocorre falha na junção, e quando calor excessivo é fornecido, o material deteriora e causa respingos. Os autores utilizaram uma modelagem 3D para modelar os materiais a serem soldados e o eletrodo de solda, utilizaram um método numérico para realizar simulações dos parâmetros de soldagem e encontrar o diâmetro ideal da pepita de solda, utilizando o Método de Elementos Finitos com o programa ABAQUS. Duas equações foram utilizadas para realizar o modelo do processo de soldagem a ponto, a equação de Maxwell, da conservação de carga, e a equação do balanço de energia de Green e Naghdi. Além do método numérico, realizaram experimentos práticos para comparar com os resultados numéricos. Os resultados da comparação dos experimentos com a simulação numérica foi que o diâmetro da pepita apresentou baixo fator de erro, porém a altura da pepita apresentou alto fator de erro para correntes de 5 kA e 6 kA, e baixo fator para 7 kA. Os autores concluíram que foi garantida a confiabilidade do modelo através da análise quantitativa e através da comparação da simulação e experimento, assim o modelo pode ser utilizado para prever o tamanho e formas finais das pepitas.

Avila e Bracarense [11] analisaram a influência do tempo de soldagem e corrente elétrica nos resultados de soldagem. Com o objetivo de aumentar a precisão da solda a ponto na produção de veículos. Os autores citaram a dificuldade de definir os parâmetros de soldagem a ponto, para se obter uma boa resistência mecânica na junção dos metais. Eles utilizaram a teoria do Efeito Joule para se obter a quantidade de energia necessária para unir os dois metais. Foram realizados ensaios em amostras com diferentes parâmetros de soldagem, para as análises utilizaram imagens, testes de tração e torção nas peças soldadas, utilizando um dispositivo automatizado recém desenvolvido. Tiveram como resultado que o maior diâmetro do ponto de solda, dado pela maior corrente elétrica de soldagem, está diretamente relacionada com a resistência mecânica, e as soldagens feitas com o parâmetro de corrente de até 5 kA não apresentaram uma fusão total do ponto de solda. Os autores concluíram que existe variação da corrente elétrica durante o processo de soldagem, e também que o tempo de soldagem não possui sensibilidade no ensaio de torção, o tempo de soldagem deve ser analisado qualitativamente devido a variação da corrente no processo.

Fermo *et al.* [12] estudaram a dificuldade de uma boa fusão na junção de termopares, a fim de desenvolver um equipamento eficiente de soldagem para confecção de termopares. Os equipamentos comerciais apresentam alta suscetibilidade a erros de operação, além disso não apresentam ajuste automático para determinados tipos de termopares. Os autores projetaram e confeccionaram um equipamento eletrônico de solda capacitiva que é composto por um banco de capacitores, uma fonte de tensão e um microcontrolador Arduíno UNO, e também calcularam a quantidade de energia necessária para realizar a junção de alguns tipos de metais. Foram realizados experimentos utilizando termopares tipo E, T e K com bitolas de 24, 26 e 32 AWG. Os resultados visuais das soldas foram analisados com o auxílio de um microscópio e o *software* ImageJ que identificou a homogeneidade das soldas executadas. O monitoramento da tensão nos bancos de capacitores comprovou a coerência com as tensões calculadas no projeto. Ao analisar os testes de calibração do termopar, comprovaram que o termopar soldado garantiu uma boa qualidade na leitura das temperaturas. Os autores concluíram que o equipamento desenvolvido foi projetado para descarregar energia suficiente para a realização da solda e produziu termopares de qualidade e erros médios similares aos equipamentos comerciais.

## 2.3 Problemas Inversos

Silva *et al.* [13] utilizaram técnicas de problemas inversos: Seção Áurea, Brent, Métrica Variável, Método da Função Especificada e Regularização de Tikhonov. Essas técnicas estimaram o fluxo de calor na superfície de uma amostra. Os autores também utilizaram o Método das Diferenças Finitas e o Método Implícito de Euler para resolver a equação da difusão de calor. Para coletar as temperaturas do método experimental, uti-

lizaram termopares do tipo K (30AWG) soldados por descarga capacitiva. Os resultados apresentados pelos autores mostram que o fluxo de calor estimados pela técnica da Função Especificada, é a média entre os estimados pela técnica de Regularização de Tikhonov. As temperaturas medidas pelos termopares apresentaram boa concordância com as obtidas pelas técnicas. Os autores concluíram que para todas as técnicas a divergência de temperatura foi baixa, e as técnicas Função Especificada e Regularização de Tikhonov possuem um tempo de processamento mais baixo que as demais.

Berntsson [14] modelou um problema inverso de condução de calor para um termopar blindado, a fim de determinar a temperatura no exterior de um termopar blindado a partir da temperatura interior do termopar. A proteção do termopar apesar de evitar danos também pode prejudicar as propriedades do instrumento, logo prejudicar a precisão das medidas. Foi utilizado o método de Tikhonov para resolver o problema inverso, e o Método das Diferenças Finitas para resolver a simulação numérica do modelo térmico. O autor concluiu que a vantagem do método numérico é a facilidade de manipular dados quando houver a necessidade de atualizar medições do instrumento, e que com base nos experimentos, o método funcionou bem.

Ikehata *et al.* [15] utilizaram um modelo matemático para analisar a formação da lente de solda no processo de soldagem a ponto, a análise dessa pepita é uma forma de testar a resistência do ponto de solda sem a necessidade da destruição da chapa. Os autores utilizaram o método *Enclosure* para modelar o problema inverso, para desenvolver o modelo matemático foram utilizados a transformação Kelvin, método da sonda e o método do invólucro. Concluíram que foi estabelecida uma fórmula para identificar a localização dos pontos de solda a partir da densidade da corrente elétrica e a tensão.

Ferreira *et al.* [16] estudaram o problema de aquecimento em ferramentas de corte no processo de usinagem. Os autores modelaram uma ferramenta de corte e um porta-ferramentas de um torno. As simulações foram realizadas através do programa COMSOL, o qual foi utilizado para resolver a equação da difusão de calor. Os resultados apresentados pelos autores foram que quanto maior a espessura do revestimento menor o calor transmitido para o substrato. E concluíram que o modelo apresentado para revestimento com espessura próxima ao real, os resultados não são compatíveis, devido à dificuldade de refinamento da malha na região do revestimento.

Magalhães *et al.* [17] analisaram a eficiência térmica no processo de soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arch welding*) onde existem problemas na definição de parâmetros de soldagem baseado em uma melhor eficiência. Os autores comentaram que a abordagem estatística geralmente requer muitos experimentos, o que o torna caro. Para a realização da estimativa da taxa de calor ou eficiência utilizaram o método Seção Áurea juntamente com a técnica TTR (*Time Traveling Regularization*), além disso, para as soluções numéricas foi utilizado o Método das Diferenças Finitas e um código C++ para resolver a equação

da difusão. A partir dos testes foi identificada que a temperatura na região aquecida não permanece constante provavelmente devido aos erros de medição do termopar utilizado nos testes. A **TTR** proporcionou uma boa definição na curva do sensor de temperatura, além disso provou que a eficiência térmica diminui conforme o tempo aumenta, pois com o passar do tempo a placa não necessita da mesma quantidade de calor para manter a temperatura média. Os autores concluíram que a técnica apresentada tem baixo custo para estimar a eficiência térmica e pode ser usada para desenvolver fontes de alimentação que reduzem o calor entregue durante o processo de soldagem, além disso a metodologia pode ser aplicada para estimar calor para outros processos de soldagem.

Dourado *et al.* [18] estudaram a dificuldade de medição de temperaturas em ambientes de difícil acesso. Para isso eles modelaram um problema inverso e utilizaram a técnica de Regularização de Viagem no Tempo para resolver um problema inverso. A técnica de otimização Sessão Áurea foi usada para complementar a regularização. Para estimar o fluxo de calor, além da técnica **TTR**, também utilizaram o Método da Função Especificada. Para validar a metodologia, foram realizados experimentos em laboratório. Os resultados das relações dos métodos numéricos com o experimental apresentaram os valores estimados do fluxo de calor abaixo da curva experimental. Isso aconteceu devido a desconsideração da resistência elétrica dos fios do aquecedor. Os autores concluíram que a técnica de Regularização de Viagem no Tempo é confiável para estimar o fluxo de calor. Apesar de dispensar mais tempo computacional, as técnicas iterativas apresentaram resultados e podem ser utilizadas para resolver problemas não lineares.

Carollo *et al.* [19] citaram o problema da falta de agilidade e confiança na caracterização das propriedades de materiais, sendo que esse problema compromete a eficiência do projeto de um produto ou máquina. Os autores desenvolveram um trabalho para caracterizar a condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica de amostras de Aço AISI 1045 e Aço Inoxidável AISI 304. Os autores adotaram um modelo térmico unidimensional para determinar as duas propriedades simultaneamente, e utilizaram o Método das Diferenças Finitas para resolver a equação da difusão. Para estimar as propriedades analisadas de forma a minimizar a função objetivo e encontrar os valores ótimos para condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica foi adotada a técnica sequencial de otimização **BFGS** (*Broyden-Fletcher-Goldforb-Shanno*). Também foi realizado um procedimento experimental para estimar os valores das propriedades térmicas. O coeficiente de sensibilidade das duas propriedades foi determinado para indicar as melhores condições do experimento (tempo de experimento, números de pontos analisados, entre outras) para estimar os valores das propriedades. Os resultados encontrados com os experimentos foram comparados com os valores da literatura e obteve-se uma boa similaridade. Ao relacionar os dois aços foi possível afirmar que a precisão da estimativa da condutividade térmica é maior para o Aço Inoxidável AISI 304 que para o Aço AISI 1045 e para a capacidade de calor volumétrica o Aço AISI 1045 apresenta uma maior precisão de estimativa.

A análise de incerteza entre os valores estimados e a literatura resultou em torno de 5%. De acordo com os autores, a técnica utilizada apresentou bons resultados, uma vez que a diferença entre os valores estimados das propriedades e a literatura foi menor que 7% e a técnica é válida para estimar a condutividade térmica e capacidade de calor volumétrica de materiais com valores de condutividade térmica entre 10W/mK a 60W/mK e faixa de temperatura de 25°C à 150°C.

Ramos *et al.* [20] estudaram o problema de elevação de temperatura nas ferramentas de corte. Temperaturas elevadas na ferramenta comprometem o desempenho da própria. Os autores estimaram o fluxo de calor no contato do cavaco com a ferramenta, utilizando problemas inversos de condução de calor. Os problemas foram resolvidos por três técnicas: Método da Função Especificada Clássico, Método da Função Especificada Iterativo e Regularização de Viagem no Tempo. Os resultados apresentados pelos autores foram que as técnicas Método da Função Especificada Iterativo e Regularização de Viagem no Tempo tiveram pouca divergência na estimação de fluxo de calor. As regiões de grande variação de fluxo ocorrem maiores erros de estimação da temperatura. As temperaturas estimadas pelo Método da Função Especificada Clássico obtiveram pouca divergência de temperatura com o método experimental. Os autores concluíram que o revestimento com Óxido de Alumínio promoveu uma melhor proteção térmica para a ferramenta de corte.

## 3 Fundamentação teórica- Eletrônica

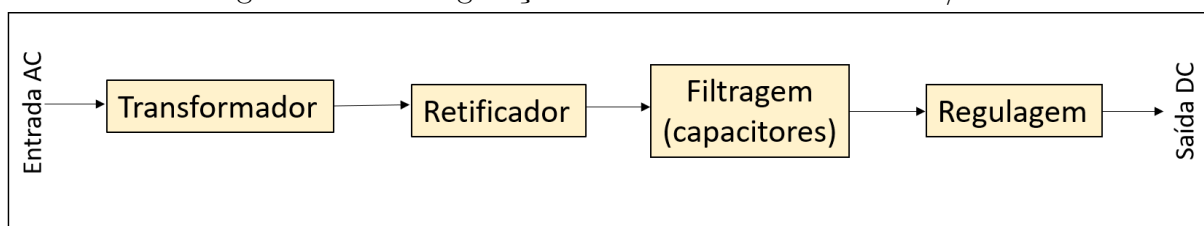
Nesse capítulo são apresentados os tópicos teóricos necessários para uma boa compreensão do desenvolvimento deste trabalho. No capítulo é detalhado o funcionamento dos componentes eletrônicos utilizados na montagem do equipamento de soldagem por descarga capacitiva. Além disso, é feita uma breve revisão de teorias física, elétrica e eletrônica que foram utilizadas no projeto do equipamento.

### 3.1 Armazenamento de energia

Capacitor é um componente eletrônico capaz de armazenar energia na forma de carga elétrica e dispensá-la no circuito se necessário [21]. Como resultado do processo de carga, os terminais do capacitor são submetidos a uma diferença de potencial ou tensão. Capacitores são compostos por placas condutoras de eletricidade separadas por um material dielétrico, isso é, material incapaz de conduzir corrente elétrica.

Segundo Frivaldsky *et al.* [21] os capacitores eletrolíticos possuem uma aplicação ampla na indústria eletrônica, eles são usados para armazenamento e filtragem de energia. Quando aplicados em fontes de alimentação, os capacitores são utilizados como fontes de tensão temporárias (filtros), um exemplo é a utilização em fontes chaveadas de tensão, apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Configuração básica de um conversor AC/DC.



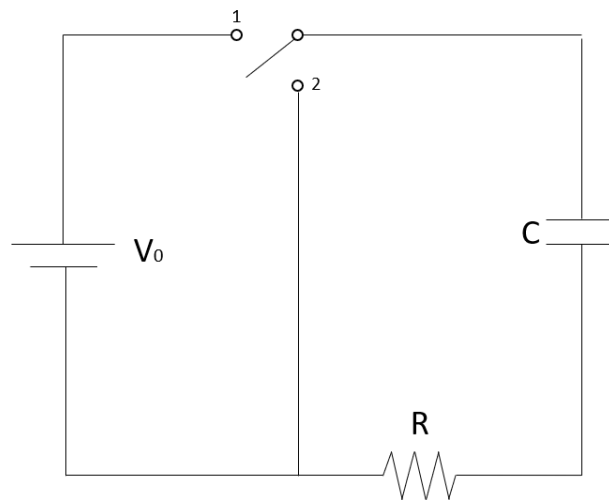
Fonte: Elaborado pelo autor.

Segundo Frivaldsky *et al.* [21] para escolher um capacitor para uma aplicação particular, deve-se levar em consideração alguns parâmetros, como a capacitância, máxima tensão de operação, fuga de corrente, resistência em série equivalente, influência da corrente de *ripple* no tempo de vida do componente.

A resistência em série equivalente, é relevante na especificação do capacitor, pois quanto menor a resistência, menor a perda de energia em forma de calor durante a carga ou descarga. Porém, quanto menor a resistência em série equivalente, mais caros são os capacitores.

Segundo Silva e Seixas [22], um experimento conhecido para analisar a curva de carregamento e descarregamento de um capacitor, é através do circuito constituído por um capacitor e um resistor elétrico, apresentado na Figura 3.2. A análise desse circuito é capaz de conceituar o aumento ou diminuição exponencial da carga do capacitor, a partir do tempo constante. Um conceito relevante nesse estudo é o de fenômenos físicos onde a taxa de variação da propriedade é proporcional a própria quantidade da propriedade.

Figura 3.2 – Diagrama de um circuito  $RC$  permitindo carregamento (chave na posição 1) na tensão  $V_0$  e descarga (Chave na posição 2) de um capacitor  $C$  em série com um resistor  $R$ .



Fonte: Adaptado de Silva e Seixas [22].

A Equação (3.1) apresentada por Silva e Seixas [22], apresenta o nível de tensão  $V_0$  no capacitor em série com um resistor, durante o carregamento com uma tensão  $V_0$  e através do tempo  $t$ ,

$$V_c(t) = V_0(1 - e^{-t/\tau}) \quad (3.1)$$

Para o processo de descarga começando no tempo  $t=0$ , tem-se:

$$V_d(t) = V_0 \times e^{-t/\tau} \quad (3.2)$$

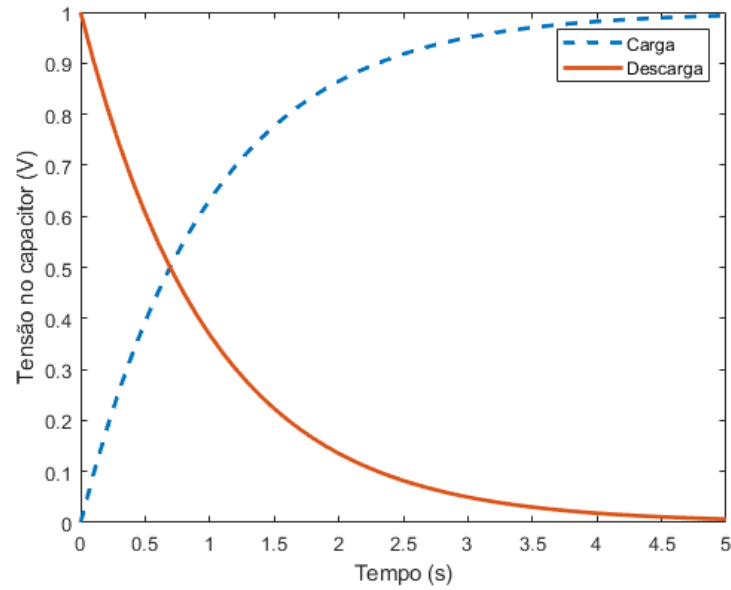
Na Figura 3.3 de Silva e Seixas [22] apresenta-se a comparação entre  $V_c$  e  $V_d$ .

Segundo Halliday *et al.* [23] quando existe a associação de capacitores em paralelo, cada capacitor tem a mesma diferença de potencial. Nesse caso, a carga elétrica total armazenada na associação, é a soma da carga de todos os capacitores.

Para a associação da Figura 3.4, tem-se um circuito composto por 3 cargas elétricas,  $q_1$ ,  $q_2$ ,  $q_3$ , onde:

$$q_1 = C_1V; q_2 = C_2V; q_3 = C_3V \quad (3.3)$$

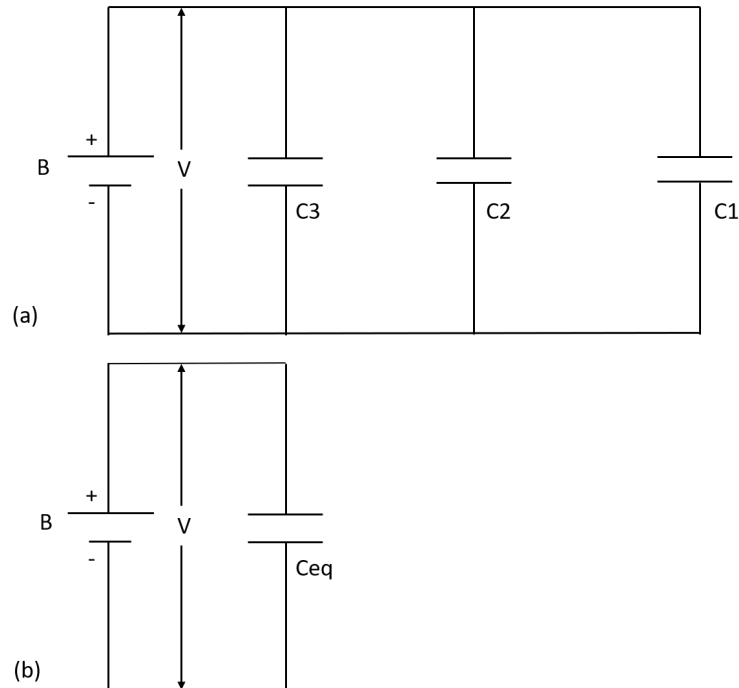
Figura 3.3 – Tensão no capacitor durante a carga e a descarga.



Fonte: Elaborado pelo autor.

$$Q = q_1 + q_2 + q_3; Q = (C_1 + C_2 + C_3)V \tag{3.4}$$

Figura 3.4 – (a) Três capacitores associados em paralelo, submetido a uma Tensão  $V$  através da bateria B. (b) Capacitor equivalente  $C_{eq}$  resultante da associação em paralelo.



Fonte: Adaptado de Halliday *et al.* [23].

Quando a diferença de potencial  $V$  é aplicada entre vários capacitores conectados em série, os capacitores tem cargas idênticas.

Quando associados em série, a soma das diferenças de potencial aplicada em cada capacitor, é igual a diferença de potencial resultante da associação. Essas diferenças de potencial é expressa pela Eq. (3.5). Além disso, a carga elétrica de cada capacitor serão idênticas.

$$V_1 = \frac{q}{C_1}; V_2 = \frac{q}{C_2}; V_3 = \frac{q}{C_3} \quad (3.5)$$

Na associação da Figura 3.5, tem-se um circuito composto por 3 capacitores associados em série, representado pela Eq. (3.6).

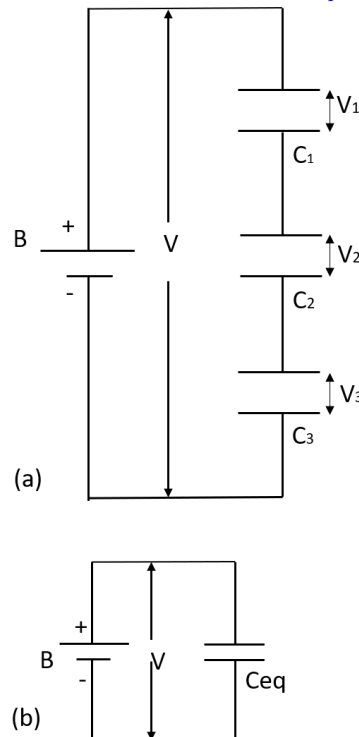
A diferença de potencial  $V$  fornecida pela bateria B é a soma das diferenças de potencial em cada capacitor, tal que:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = q\left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}\right); \quad (3.6)$$

Então a capacitância equivalente  $C_{eq}$  é dada por:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}; \quad (3.7)$$

Figura 3.5 – (a) Três capacitores associados em série, submetidos a uma Tensão  $V$  através da bateria B. (b) Capacitor equivalente  $C_{eq}$  resultante da associação em série.



Fonte: Adaptado de Halliday *et al.* [23].

O trabalho realizado para carregar um capacitor é convertido em energia potencial elétrica  $U$  do campo elétrico que existe entre as placas do capacitor.

As cargas elétricas armazenadas no capacitor podem ser convertidas em energia potencial. O cálculo da energia armazenada no capacitor é apresentado por Halliday *et al.* [23] como:

$$U = \frac{q^2}{2C} \quad (3.8)$$

E pode ser reescrita, utilizando a relação de carga da Eq. (3.3), na forma:

$$U = \frac{1}{2}CV^2 \quad (3.9)$$

Assim, a energia armazenada no banco de capacitores, dada em Joules, pode ser calculada utilizando a capacitância e a tensão em que o banco está submetido.

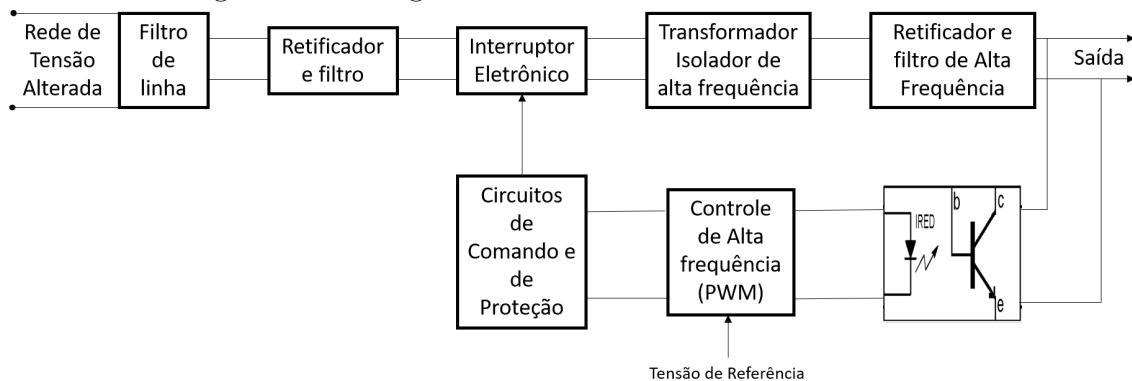
## 3.2 Alimentação do banco de capacitores

Segundo Singh *et al.* [24] as fontes chaveadas são usadas em microcomputadores, carregadores de celular e muitos eletrodomésticos. A fonte recebe energia da rede elétrica na forma de tensão AC é convertida em tensão na forma contínua (DC).

Segundo Narula *et al.* [25] em fontes de alimentação para soldagem a arco, a retificação é obtida basicamente utilizando uma ponte de diodo, um filtro de capacitor e um conversor CC-CC. Um esquema simples e que produz fontes chaveadas de baixo custo.

Segundo Singh *et al.* [26], em um microcomputador, a fonte chaveada é responsável por converter tensão de corrente alternada em corrente contínua em vários níveis de tensão. A fonte chaveada contém um retificador de ponte de diodo com capacitor com função de filtro e um conversor para atingir vários níveis de tensões.

Figura 3.6 – Diagrama de Blocos de uma fonte chaveada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na figura 3.6 mostra-se que a tensão alternada proveniente da rede elétrica passa pelos processos de retificação e filtragem, o que resulta em tensão contínua e com poucos

ruídos no sinal. Em sequência, o sinal passa por um interruptor eletrônico conectado no primário de um transformador. O interruptor é chaveado por um controle de modulação de pulso, o que possibilita a variação do campo magnético no conjunto do transformador *chopper*. Quando o interruptor está conduzindo corrente, as linhas do campo magnético se expandem, e se retraem quando não está conduzindo corrente. Assim, a tensão induzida no secundário do transformador é alternada, portanto para obter tensão contínua, o sinal é retificado e filtrado novamente.

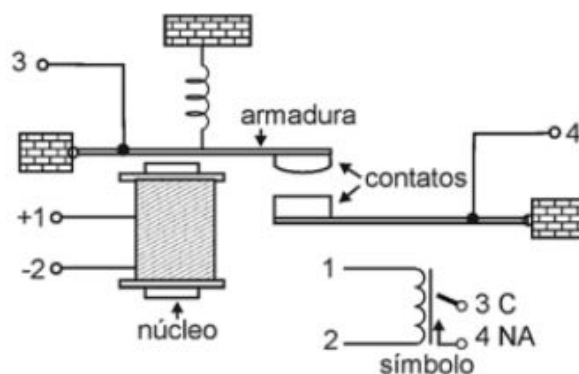
É válido evidenciar que a saída do circuito serve como comparador para o circuito de chaveamento. Caso o nível DC medido esteja abaixo da referência, a comutação ocorre para aumentar o período em que as linhas de campo são expandidas, afim de compensar essa queda.

De acordo com Mehl [27], as fontes chaveadas possuem melhor eficiência em relação a potência, peso e volume, quando comparadas com as fontes de regulação linear. Com isso, elas são eficazes em projetos de equipamentos que visam redução de peso e volume.

### 3.3 Módulo Relé

De acordo com Braga [28] relé eletromecânico é um dispositivo comutador eletromecânico. Na Figura 3.7 apresenta-se de forma simplificada o funcionamento de um relé.

Figura 3.7 – Estrutura simplificada de um relé. Os pontos 1 e 2 são terminais da bobina. Os pontos 3 e 4 são os contatos.

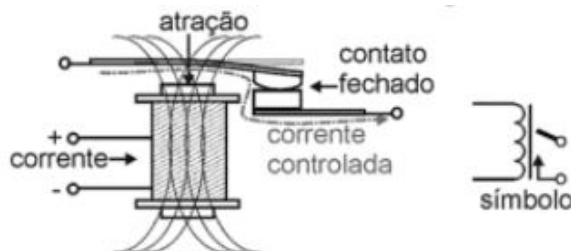


Fonte: Braga [28].

Uma armadura metálica móvel é posicionada nas proximidades de um eletroímã. Quando existe presença de campo magnético na bobina, a armadura é atraída e conseqüentemente o contato superior móvel se encontra no contato fixo inferior, o que permite que a corrente circule pelo circuito, como demonstrado na Figura 3.8.

Os contatos se mantêm unidos enquanto existe uma força magnética, promovida pela bobina, atuando sobre a armadura. Essa força magnética é controlada pela DDP

Figura 3.8 – Contatos se tocam devido a atração da bobina e armadura, permitindo a circulação de corrente.

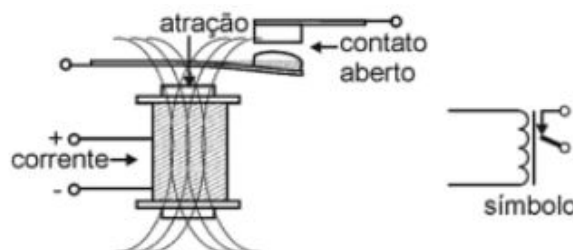


Fonte: Braga [28].

(*Diferença de Potencial*) entre os pontos 3 e 4 na Figura 3.7, quando existir uma DDP na bobina suficiente para atrair os contatos, o circuito será fechado e haverá a circulação da corrente.

Outra forma de aplicar o controle de um relé eletromecânico é na configuração da Figura 3.9. Em condição normal, os contatos permanecem encostados enquanto não há DDP na bobina. Quando a bobina é energizada, o campo magnético move a armadura de modo que os contatos se separem, impossibilitando a transição de corrente elétrica.

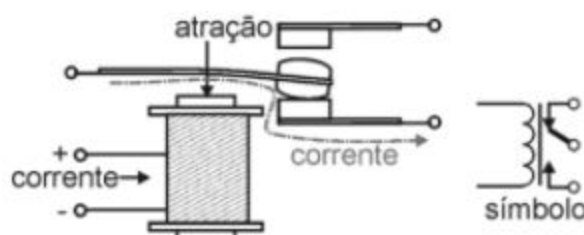
Figura 3.9 – Os contatos se afastam quando a bobina é energizada.



Fonte: Braga [28].

Por último, o mais comum encontrado no mercado são os relés que combinam os dois tipos mencionados anteriormente. Conforme a Figura 3.10, os contatos são dispostos de forma que a corrente elétrica circule por um caminho quando a bobina não está energizada e por outro caminho quando a bobina está energizada.

Figura 3.10 – Relé com contato reversível [28].



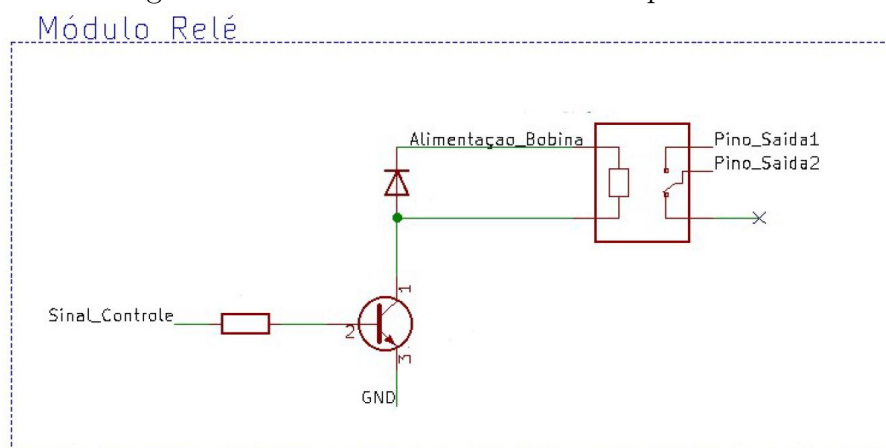
Fonte: Braga [28].

Desse modo, o relé possibilita o controle da circulação da corrente elétrica em um circuito. O relé é capaz de operar mesmo em circuito de alta potência, uma vez que

a operação do núcleo e da armadura é feita de forma independentes. Com isso, o relé tem papel importante no controle de potência, pois além da segurança promovida pelo isolamento entre o núcleo e a armadura, é possível controlar altas potências a partir de sinais pequenos.

O controle do núcleo do relé pode ser realizado por sinais providos pelo microcontrolador Arduino. Entretanto, a saída do microcontrolador emite um sinal muito fraco, assim é necessário a utilização de um módulo de acionamento para o relé, mostrado na Figura 3.11. Esse módulo é composto por um transistor que recebe sinal da saída do microcontrolador. O transistor faz o chaveamento a partir de um pequeno sinal em sua base (pino 2 da Figura 3.11), o que permite a circulação de corrente entre os pinos 1 e 3, resultando na alimentação da bobina do relé.

Figura 3.11 – Módulo de acionamento para o relé



Fonte: Elaborado pelo autor.

### 3.4 Automatização do carregamento

Segundo Lopez-Rodriguez e Cuesta [29] o Arduino é uma ferramenta que vem sendo utilizada em muitas escolas e universidades em educação em eletrônica, controle e robótica.

Segundo D'Ausilio [30] aprender a usar o Arduino pode ser mais fácil do que aprender a usar produtos semelhantes de outros fabricantes. O Arduino oferece uma filosofia de código aberto o qual oferece oportunidade para não especialistas operar o produto. Além disso, existem centenas de códigos abertos que podem ser usados ou modificados conforme a necessidade.

Segundo D'Ausilio [30] o Arduino Uno é uma placa microcontrolada baseada no ATmega328, ela possui quatorze pinos de entrada ou saída digitais e seis deles podem ser utilizados como saídas de Modulação por Largura de Pulso. Além disso, possui seis

entradas analógicas, um conector de programação serial em circuito. A placa pode ser alimentada por conexão USB ou também por uma fonte externa de 6 a 20 Volts.

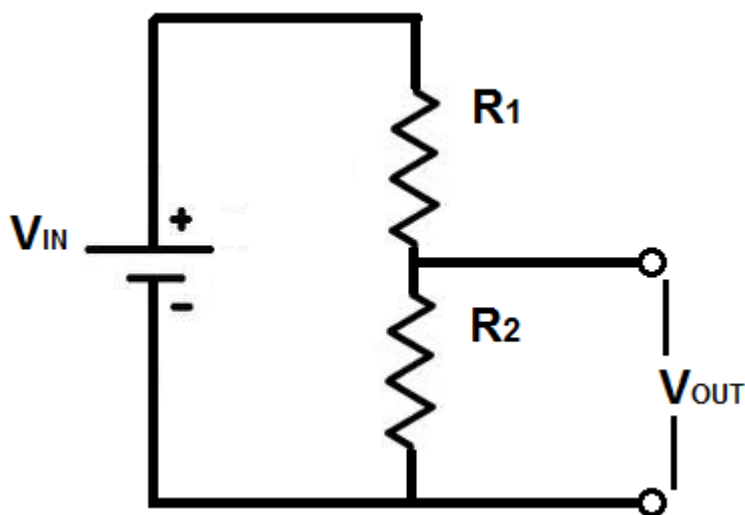
Cada um dos 14 pinos digitais podem ser usados como entrada ou saída, basta usar as funções no código `pinMode ()`, `digitalWrite ()` e `digitalRead ()`. Os pinos operam a 5 Volts e cada um pode fornecer ou receber uma corrente elétrica de no máximo 40mA.

Segundo D'Ausilio [30] o Arduino é programado usando uma linguagem que é C++ simplificada, o software compila e carrega na placa via cabo USB.

### 3.5 Divisor de tensão

Um divisor de tensão é uma associação de resistores em série, são utilizados para obter uma determinada diferença de potencial, a partir de uma fonte de alimentação com tensão fixa. Na Figura 3.12 apresenta-se um divisor de tensão simples, a partir de dois resistores  $R_1$  e  $R_2$ . A fonte de alimentação oferece uma tensão de entrada  $V_{IN}$ , e uma tensão de saída  $V$ , medida entre os terminais  $S_1$  e  $S_2$ . A tensão de saída é uma fração da tensão de entrada, isto é,  $V = \alpha V_{IN}$ , onde  $\alpha$  é representado por  $R_2 / (R_1 + R_2)$  e varia de 0 a 1. No circuito de resistências em série, a tensão no circuito irá se dividir proporcionalmente ao valor de cada resistência com relação ao valor total da série [31].

Figura 3.12 – Divisor de tensão simples.

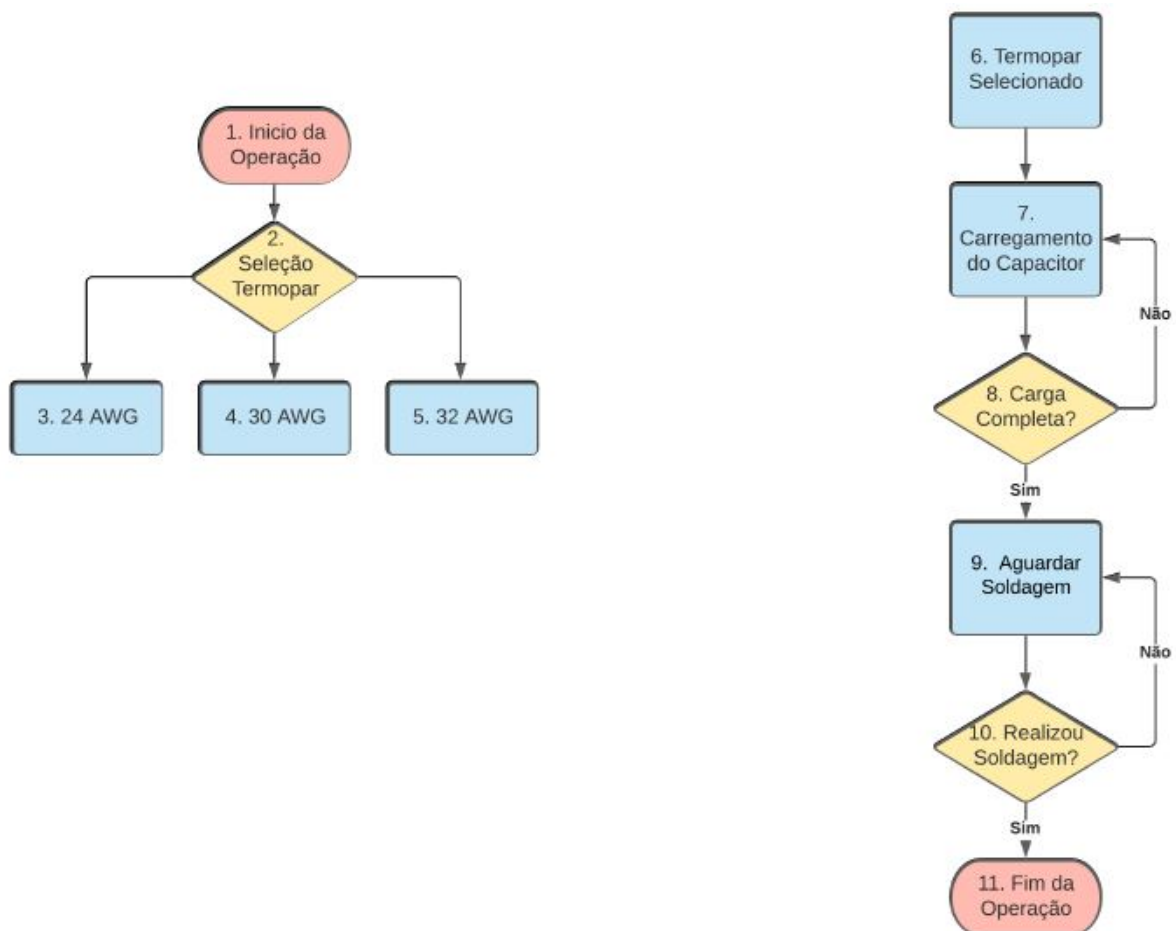


Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 Equipamento de soldagem por descarga capacitiva

O equipamento desenvolvido realiza soldagem por descarga capacitiva em termopares com bitolas de 24 AWG (*American Wire Gauge*), 30 AWG e 32 AWG. No diagrama da Figura 4.1 são mostrados os dados gerais de operação do equipamento. Primeiramente é necessário selecionar a medida da bitola do termopar que será soldado, em seguida deverá aguardar o carregamento dos capacitores, o tempo de carga dependerá da bitola do termopar selecionado. Para termopares de 24 AWG o tempo médio é de 12 segundos. Após o carregamento dos capacitores, uma mensagem será impressa no *display* autorizando o usuário realizar a soldagem.

Figura 4.1 – Fluxograma de operação.

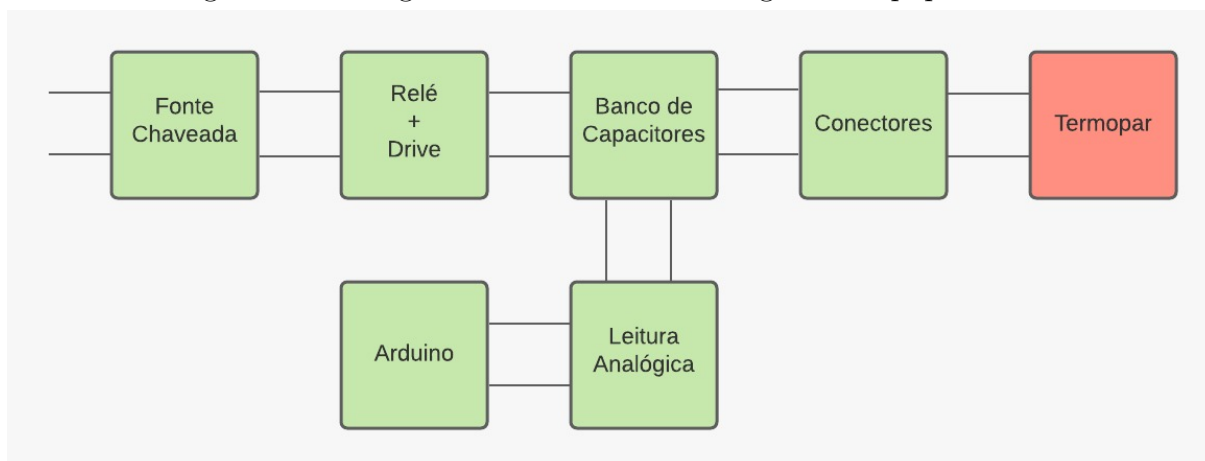


Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir do princípio de funcionamento e operação, foi desenvolvido um diagrama de blocos descrevendo os componentes que compõem o equipamento, mostrado na Figura 4.2. O equipamento é conectado a rede elétrica a partir de uma fonte chaveada, a qual

transforma a tensão AC da rede para tensão DC. Em sequência, um relé controla a disponibilidade de corrente para o circuito de alimentação dos capacitores. Em paralelo ao BC existe um divisor de tensão, que transmite informação do nível de carga do BC para o Arduíno. Na saída do equipamento existe dois conectores disponíveis para a realização da soldagem.

Figura 4.2 – Diagrama de blocos da montagem do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 4.1 Esquema elétrico do equipamento

Inicialmente foi elaborado um esquema elétrico, o qual foi necessário para a produção da placa de circuito impresso. Na Figura 4.3 mostra-se o esquema elétrico desenvolvido utilizando o *software*. Nas figuras 4.6 e 4.7 é representada tridimensionalmente a placa utilizando o *software* Kicad.

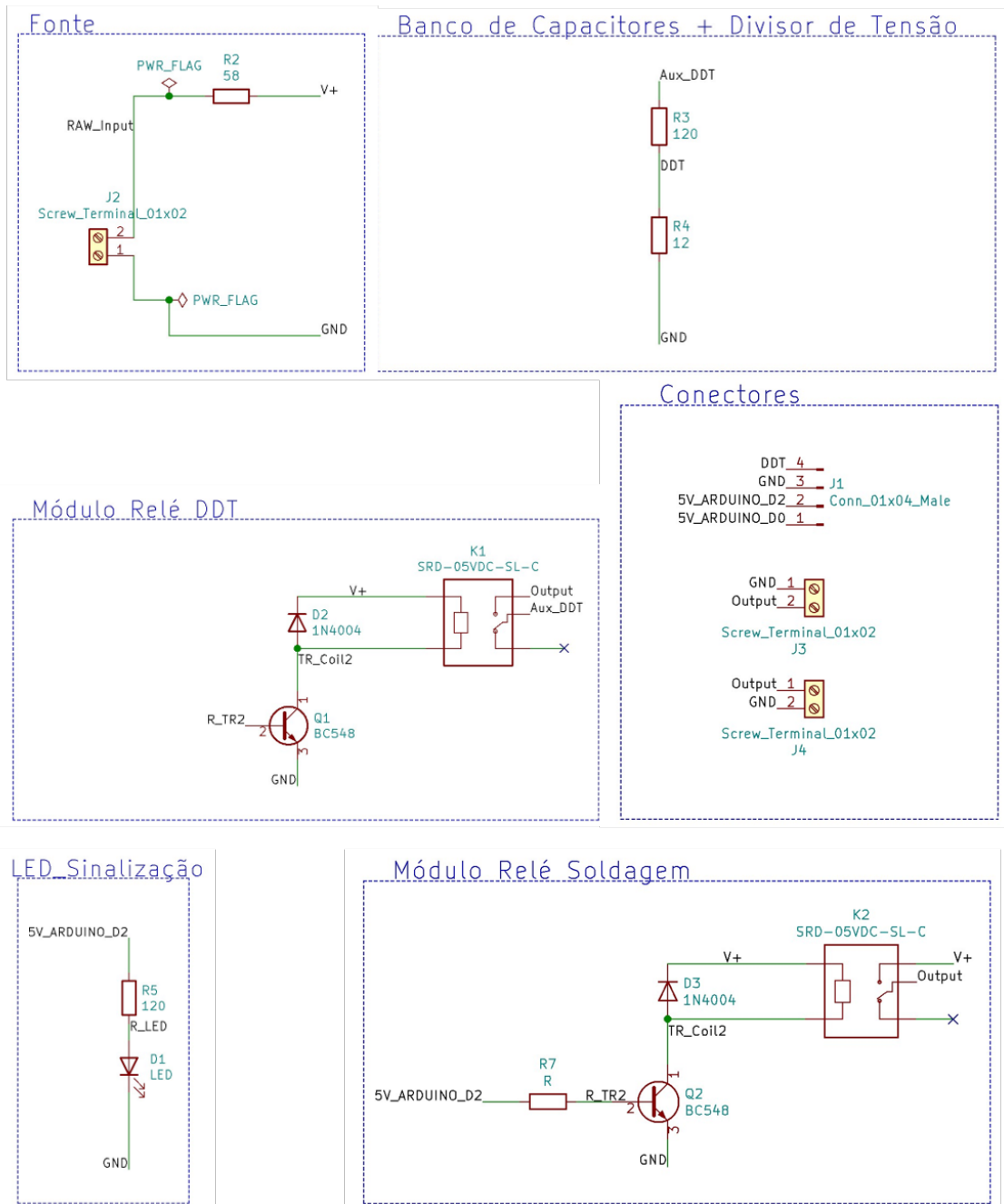
Na Figura 4.3 o esquema elétrico foi separado por partes para melhor visualização. No quadrante da fonte os terminais 1 e 2 representam a saída da fonte chaveada. No quadrante "divisor de tensão" é mostrado os resistores do divisor e onde são conectados as saídas para a leitura da tensão, o terminal "AuxDDT" é a saída do módulo relé, que faz a abertura e fechamento do circuito divisor de tensão. No quadrante "Conectores" mostra-se as saídas e entradas da placa.

Além disso, foi desenvolvido um código em linguagem C++, o qual foi utilizado para programar o Arduíno, possibilitando a automação do equipamento. Esse código é mostrado no Apêndice A.

## 4.2 Materiais

Neste subcapítulo serão detalhadas as especificações de cada componente eletrônico utilizado na montagem do equipamento de soldagem por descarga capacitiva. Os

Figura 4.3 – Esquema elétrico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

equipamentos utilizados foram:

- Fonte chaveada 48V e 150W
- 3 capacitores de 22000 $\mu$ F
- Arduíno UNO
- *Shield* para Arduíno com *display LCD (Liquid Cristal Display)* e botoeira
- Fonte de 9V para alimentação do Arduíno

- 2 relés single SRD-05VDC
- 2 transistores BC548
- 2 Diodos 1N4004
- 3 Borners com conexão via parafuso
- 1 LED (*Light-emitting diode*)
- Fios de cobre para conexão
- 2 Borners
- 2 conectores tipo "Garra"
- 2 conectores tipo "Jacaré"
- 1 resistor de potência de 56  $\Omega$
- 1 resistor 1 M $\Omega$
- 2 resistores de 180 k $\Omega$
- 1 Placa de circuito impresso personalizada

### 4.2.1 Capacitores

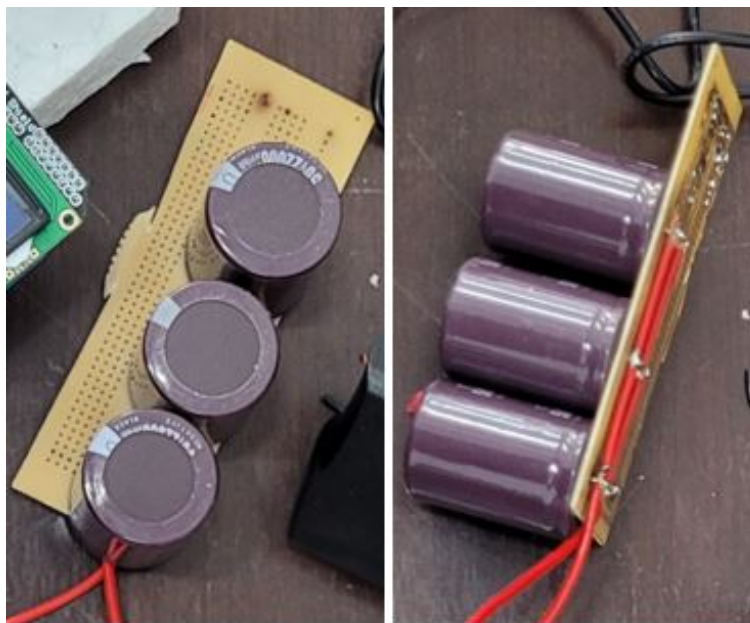
As especificações definidas para o BC foram 3 capacitores associados em paralelos com capacitância de 22000 $\mu$ F e limite de tensão 50V, conforme a Figura 4.4. a energia armazenada  $U$  com este arranjo é calculada pela equação 4.1. A capacitância total resultante da associação é 66000 $\mu$ F.

$$U = \frac{1}{2}CV^2 \quad (4.1)$$

$$U = \frac{1}{2} \times 66000 \times 10^{-6} \times 50^2 = 82,5[\text{Joules}] \quad (4.2)$$

Segundo Fermo *et al.* [12] a energia necessária para soldar termopares tipo K de 24AWG é de 50,91 Joules. Portanto, a energia armazenada no BC é suficiente para soldar os termopares mais usuais.

Figura 4.4 – Capacitores Associados.



Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.2.2 Fonte Chaveada

O carregamento do BC ou a energia transferida para o BC não ocorre de forma instantânea, a velocidade de carregamento depende da corrente elétrica que passa pelo circuito. Portanto, o que vai determinar a velocidade do carregamento é a potência da fonte de alimentação. No caso do equipamento de soldagem, não é interessante um carregamento extremamente rápido, pois prejudica a precisão dos níveis de tensão que deve ser imposta no BC para realizar a soldagem.

A fonte escolhida para a alimentação do BC foi uma fonte chaveada de 48V de tensão 3,2 Amperes e uma potência de 150W, apresentada na Figura 4.5 . Essa fonte é bivolt, podendo ser alimentada com 127V ou com 220V, e possui dimensões CxLxA 13x10x4 [cm].

A escolha da fonte que foi utilizada no equipamento foi realizada à partir dos limites de tensão suportado pelos capacitores (50 Volts), e a potência de 150 Watts foi a menor encontrada no mercado e com o menor custo.

#### 4.2.3 Leitura da tensão submetida no Banco de Capacitores

A tensão submetida no BC é controlada pelo Arduíno. Porém, esse controle não pode ser feita de forma direta com o BC, já que a entrada do Arduíno suporta até 5V. Para solucionar esse problema é necessário que uma associação de resistores em série seja conectada em paralelo com o BC. O resistor que será monitorado pelo Arduíno deve estar submetido a uma tensão máxima de 5V.

Figura 4.5 – Fonte chaveada 48 Volts, Marca: Andeli.



Fonte: Andeli.

Segundo a Lei de Ohm, a corrente de um circuito é inversamente proporcional a resistência equivalente desse circuito. Para que essa associação não consuma rapidamente a energia dos capacitores, é necessário que essa associação tenha uma resistência equivalente alta, na dimensão de  $M\Omega$ .

Um dos resistores selecionados para o divisor de tensão foi o de  $1,8 M\Omega$ , e foi usada a Eq. (4.3) para calcular o valor de resistência do outro resistor, para que não extrapole o limite de 5 Volts. A tensão máxima que pode ser aplicada no BC é de 50 Volts.

$$V_{R_2} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{total} \quad (4.3)$$

$$5 = \frac{R_2}{1,8 \times 10^6 + R_2} \times 50 \quad (4.4)$$

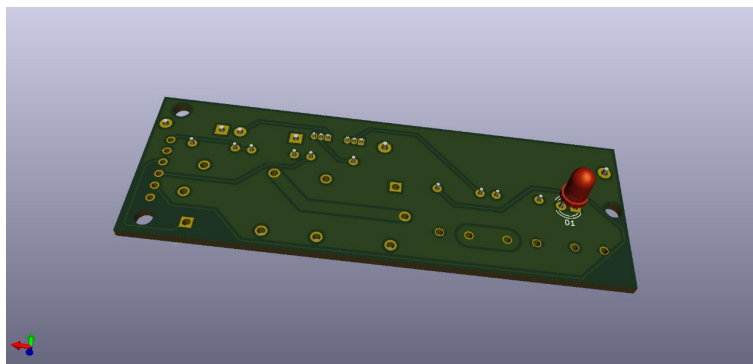
$$R_2 = 200k\Omega \quad (4.5)$$

Para garantir uma margem de segurança e não danificar o Arduino, foi utilizado o  $R_2=180k\Omega$ .

#### 4.2.4 Placa de Circuito Impresso

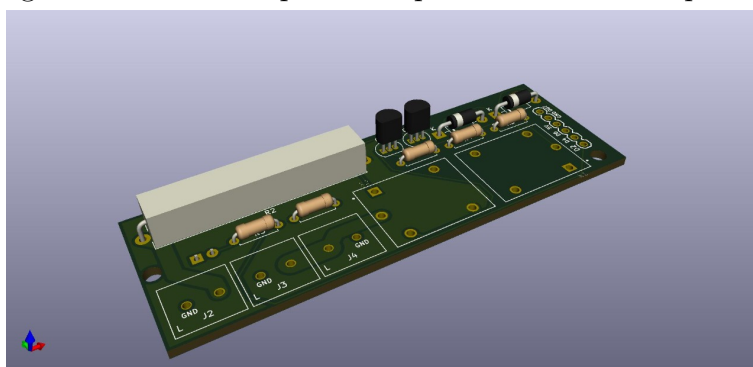
A placa apresentada nas Figuras 4.6 e 4.7 possuem largura e comprimento de 40mm e 80mm, respectivamente. Essa placa teve a finalidade de melhorar a disposição dos componentes, facilitar a montagem e garantir a segurança do equipamento.

Figura 4.6 – Vista inferior da placa de circuito impresso.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.7 – Vista superior da placa de circuito impresso.

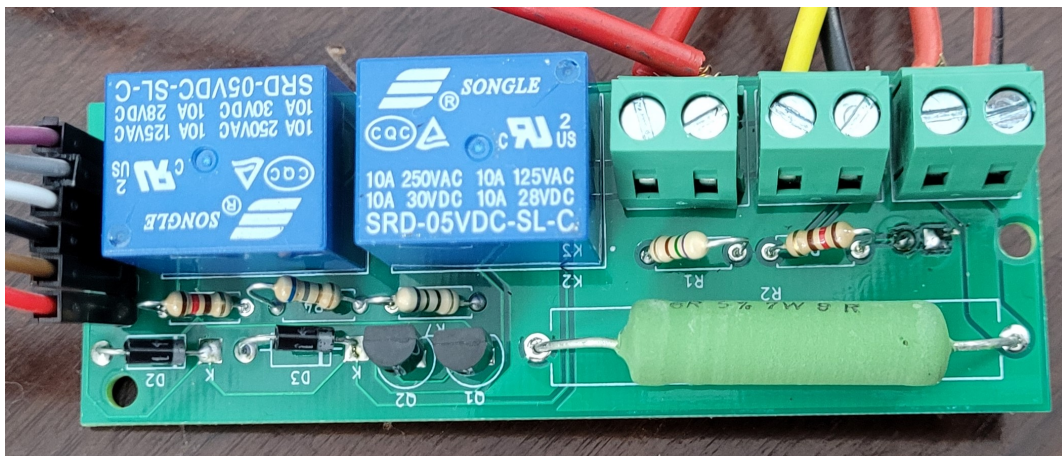


Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.3 Montagem

Primeiramente foi realizada a montagem dos componentes eletrônicos na placa de circuito impresso. Os componentes foram dispostos na placa, em suas devidas posições e então foram soldados utilizando um ferro de solda da marca Hikari modelo SC-40 com 40W de potência, e também fios de estanho especiais para soldagem de componentes eletrônicos. Na Figura 4.8 é apresentada a placa com os componentes montados.

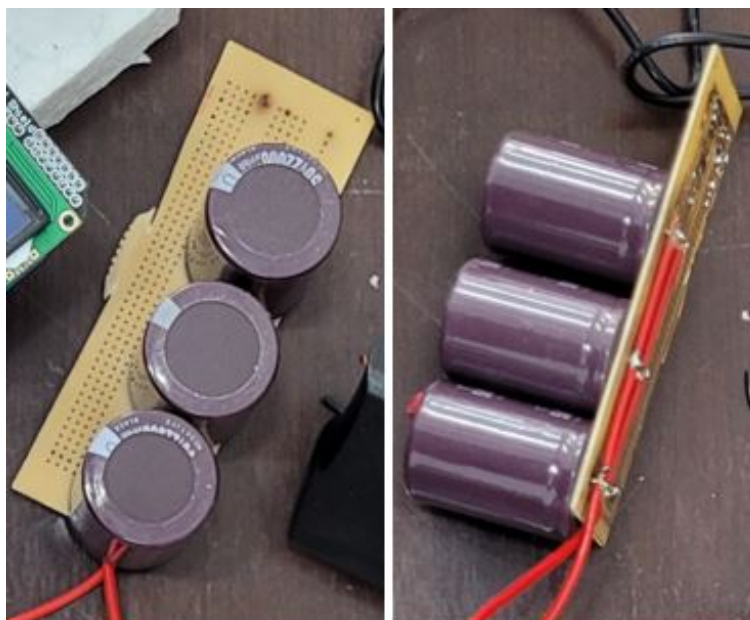
Figura 4.8 – Placa de circuito impressa montada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para maior segurança do equipamento, o banco de capacitor foi montado em uma placa de fenolite e as ligações dos terminais foram feitas com fios de cobre robusto, Figura 4.9 . As trilhas próprias contidas na placa de fenolite são frágeis para suportar a alta corrente que percorre os terminais dos capacitores.

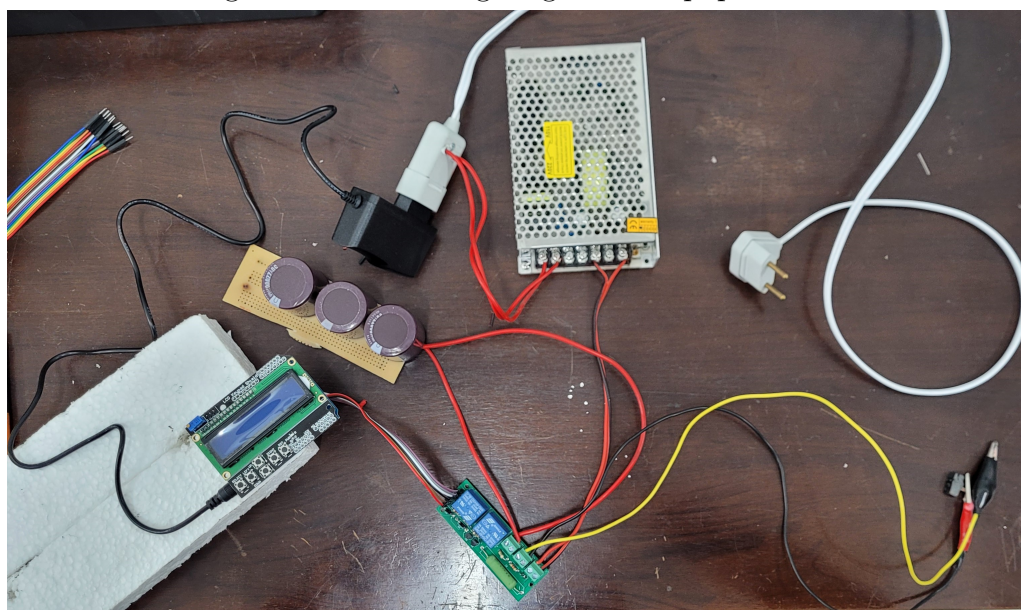
Figura 4.9 – Montagem do banco de capacitores.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Com isso, foram conectados os dispositivos e componentes nos *borners* de entradas e saídas da placa eletrônica através dos fios de cobre. A montagem dos componentes é apresentada na Figura 4.10.

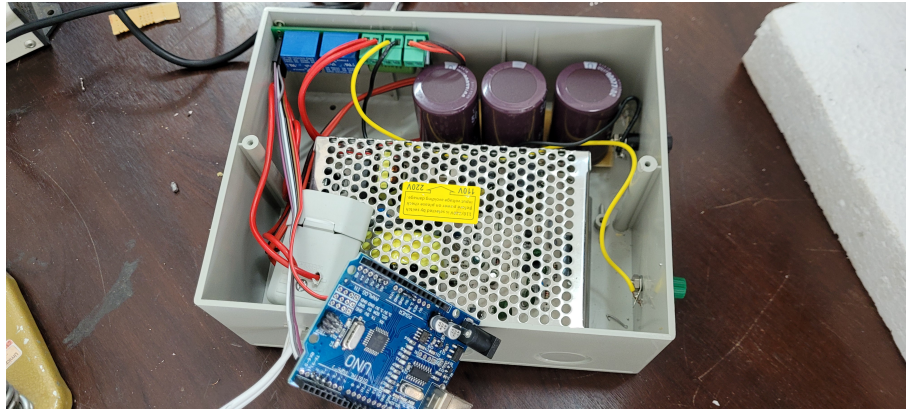
Figura 4.10 – Montagem geral do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, os componentes foram adaptados dentro de uma caixa, os componentes foram parafusados na caixa, mostrado na Figura 4.11. Pela disponibilidade do mercado, a caixa escolhida para adequação dos componentes foi um quadro de distribuição de disjuntores. A caixa possuía as dimensões necessárias para acomodar o equipamento. Para comercialização do equipamento, seria interessante a fabricação de uma caixa personalizada para esse fim.

Figura 4.11 – Interior do equipamento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 4.12 mostra-se o resultado final do equipamento, na parte superior localiza um *display* com botoeira, o qual está conectado com o Arduino, o *display* faz a interface do equipamento com o operador. Na parte frontal existe dois *borners* que recebem os cabos, terra e positivo.

Figura 4.12 – Equipamento final.



Fonte: Elaborado pelo autor.

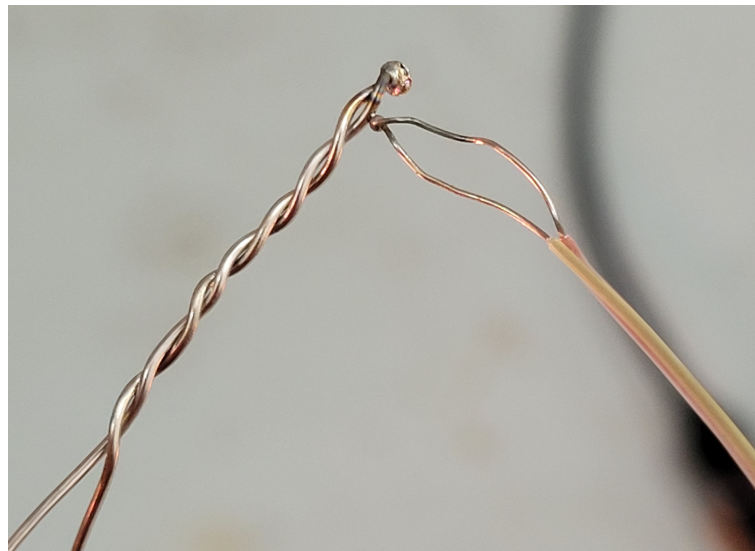
## 4.4 Procedimentos experimentais

Foi realizado um procedimento experimental, composto por 12 experimentos, para analisar o diâmetro da esfera de solda resultante do processo de soldagem por descarga capacitiva, a fim de corroborar a repetibilidade do processo.

Doze soldagens foram feitas em termopares tipo K de 24 AWG. Os fios foram entrelaçados manualmente e a soldagem foi feita utilizando o equipamento de descarga capacitiva. Na saída negativa do equipamento foi conectada uma escova de carvão, este material é altamente condutivo e possui uma temperatura de fusão elevada, portanto, as esferas de solda produzida não tiveram adição de carvão em sua composição. Na saída positiva do equipamento foram conectados os fios entrelaçados. O equipamento foi configurado para realizar a soldagem com uma tensão de 45 V. Após o carregamento do banco, composto por 3 capacitores de 22000  $\mu\text{F}$  e submetidos a tensão de 45 V, foi feita a colisão entre os fios e o carvão. Esse contato, resultou no descarregamento da energia armazenada nos capacitores, causando a fusão dos fios e a formação da esfera de solda, apresentada na Figura 4.13.

Então, foram medidos os diâmetros das 12 esferas de solda, resultante do processo, utilizando um paquímetro digital com incerteza de 0,01 mm. Os dados são apresentados no Subcapítulo 6.1.

Figura 4.13 – Solda realizada pelo equipamento.



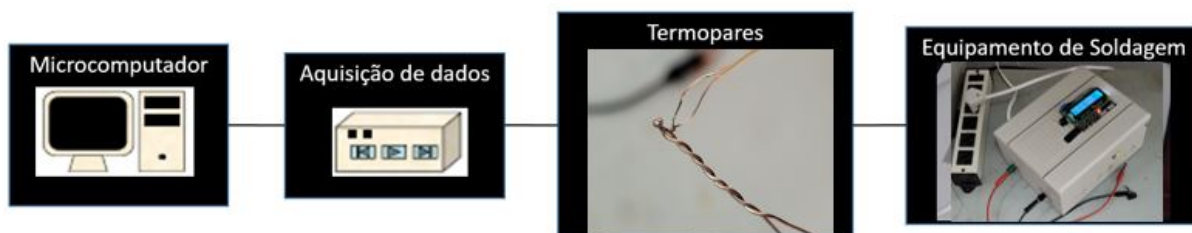
Fonte: Elaborado pelo autor.

### 4.4.1 Obtenção dos dados de temperatura

Para a aplicação da técnica de problemas inversos foram necessários experimentos, os quais foram executados no Laboratório de Transferência de Calor da Universidade Federal de Itajubá.

A bancada usada para executar os experimentos foi composta por um microcomputador utilizado para armazenar dados; uma aquisição 34980A para obter dados de temperatura; termopares tipo K de 24 AWG e 30 AWG, o que correspondem a diâmetros de 0,511 mm e 0,255 mm, respectivamente; e também por um equipamento de soldagem por descarga capacitiva. A bancada é mostrada na Figura 4.14.

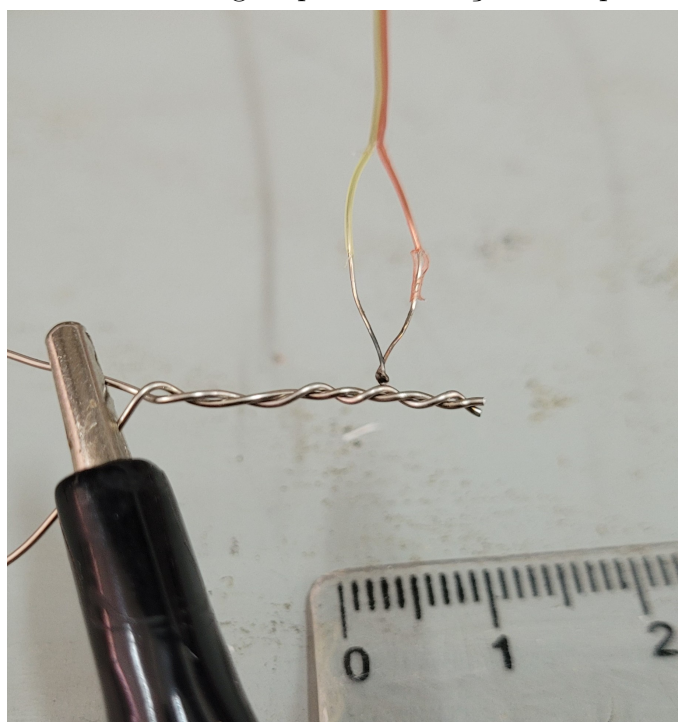
Figura 4.14 – Esquema de montagem da bancada experimental utilizada na execução dos experimentos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Um termopar do tipo K de 30 AWG foi soldado a 4 mm de distância da extremidade de um termopar tipo K de 24 AWG, através do equipamento de soldagem por descarga capacitiva; essa configuração preliminar do experimento é apresentada na Figura 4.15. O termopar de 30 AWG foi conectado na aquisição de dados que foi conectada no microcomputador. Assim, a temperatura na região dos 4 mm foi submetida no termopar de 30 AWG, a aquisição de dados obteve esses dados de temperatura e transmitiu para o microcomputador, o qual armazenou os dados.

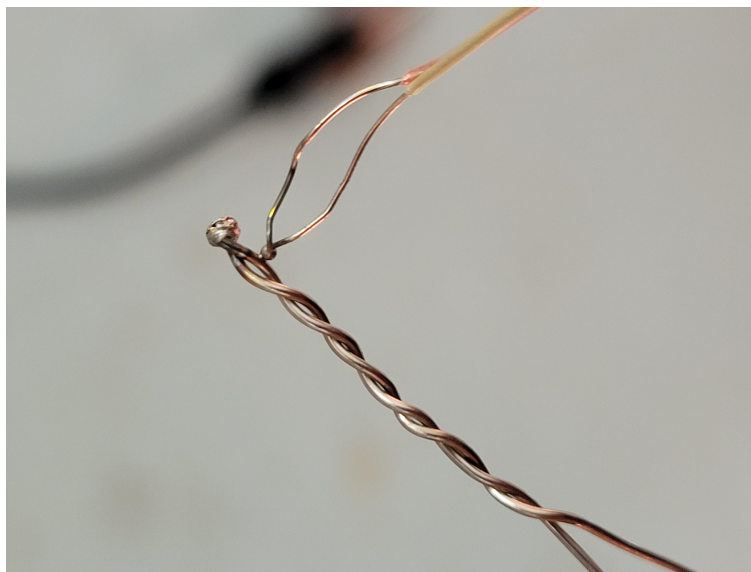
Figura 4.15 – Montagem para a execução do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Então, foi realizado o contato do termopar mais espesso em uma escova de carvão, proveniente do equipamento, a energia do banco de capacitores foi descarregada, resultando na soldagem do termopar de 24 AWG, o resultado do processo é apresentado na Figura 4.16. Uma esfera de solda é formada a partir da fusão dos dois fios e o processo é finalizado. O resultado consiste no perfil de temperatura gerado durante a soldagem, apresentado no Subcapítulo 6.2.

Figura 4.16 – Termopar após a execução do experimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambos experimentos as temperaturas foram medidas no fio de cromel, o qual apresenta a condutividade térmica menor que a do alumel. A vantagem em utilizar dados de temperaturas do material com menor condutividade, é a maior quantidade de pontos de temperatura adquiridas durante o aquecimento.

As temperaturas foram medidas em intervalos de 90 ms, esse foi o menor intervalo que a aquisição foi capaz capturar. Com isso, foi possível obter 9 pontos de temperatura na fase de aquecimento do fio, a qual dura cerca de 0,8 s no ponto analisado. Essa quantidade de pontos foram suficientes para a aplicação da técnica de problema inverso.

Para comparar as temperaturas do modelo computacional com as experimentais em outras posições do domínio, também foram realizados experimentos com as mesmas configurações, porém nas regiões de 1,7 mm, 3,6 mm, 3,8 mm e 5 mm da extremidade da esfera de solda. O resultado desses experimentos são mostrados no Subcapítulo 6.2.

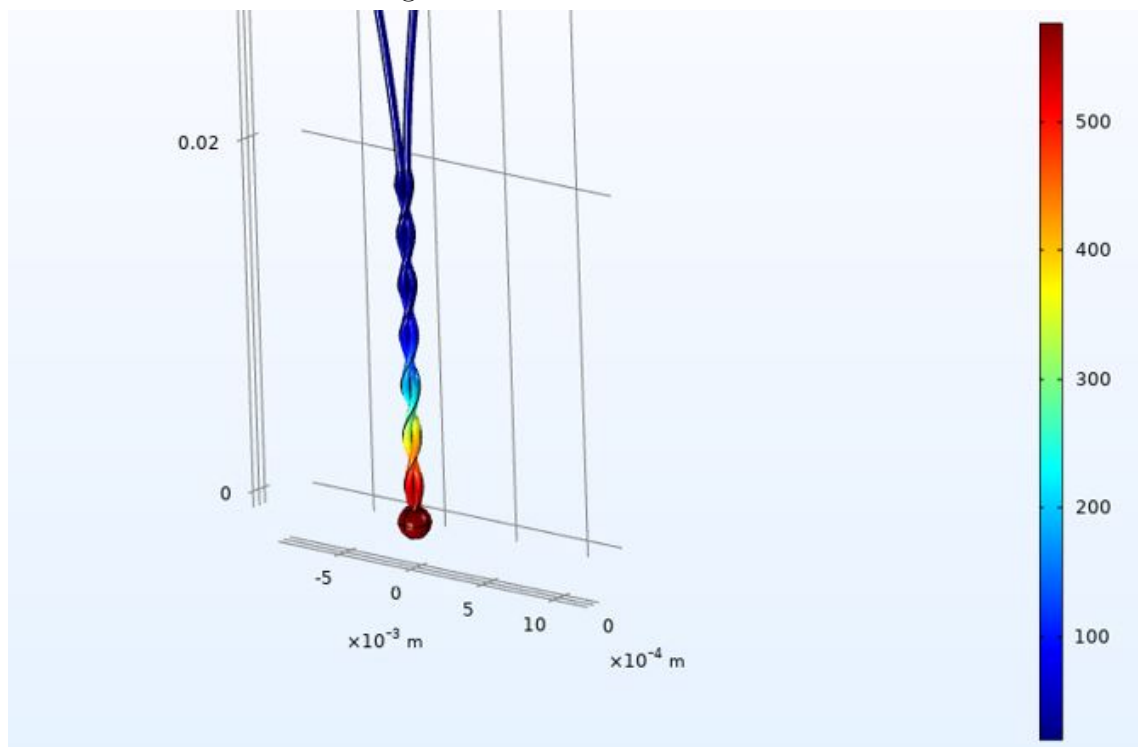
## 5 Fundamentação teórica- Transferência de calor

### 5.1 Modelo térmico

Apresenta-se na Figura 5.1 a geometria do termopar com junta soldada, a qual foi utilizada no modelo térmico tridimensional. A geometria foi desenvolvida no programa SOLIDWORKS antes de ser exportada para o COMSOL. Os fios de termopar tipo K de 24 AWG, equivalente ao diâmetro de 0,511 mm, são entrelaçados com 4 voltas por 20 mm a partir da extremidade. A esfera localizada na extremidade dos fios entrelaçados possui o diâmetro de 1,55 mm.

Neste modelo a extremidade soldada do termopar na temperatura inicial  $T_0$  é sujeita a uma fonte transiente de calor, causada por uma descarga capacitiva. Esse fluxo de calor funde as duas extremidades entrelaçadas, onde ocorre a transformação de fases e forma-se uma esfera de solda.

Figura 5.1 – Modelo Térmico.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O domínio do modelo é composto por três subdomínios: Um fio composto por Alumel, um fio composto por cromel e uma esfera de solda composta pela mistura de cromel e alumel. Cada subdomínio possuindo propriedades térmicas distintas, além das proprie-

dades convectivas distintas. A equação da difusão de calor para o problema tridimensional não linear com mudança de fase pode ser expressa pela Eq. (5.1).

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{Q(t)}{V} = \rho(T) \frac{\partial H(T)}{\partial t} \quad (5.1)$$

onde  $Q$  é a taxa de calor,  $V$  é o volume da esfera,  $k$  é a condutividade térmica,  $T$  é a temperatura,  $\rho$  é a massa específica e  $t$  é o tempo. A função da entalpia  $H(T)$  pode ser definida como:

$$H = \int c_p dT + fL \quad (5.2)$$

onde  $c_p$  é o calor específico,  $L$  é o calor latente e  $f$  é a fração mássica de líquido na mudança de fase representada pela função de Heaviside, apresentada na Eq. (5.4), definida em função da temperatura de fusão  $T_m$ . A temperatura de mudança de fase  $T_m$  é definida pela média entre a temperatura que se inicia a transição de fase ( $T_S$ ) e a temperatura na qual o material se torna totalmente líquido ( $T_L$ ):

$$T_m = \frac{T_S + T_L}{2} \quad (5.3)$$

A função  $\theta(T)$  é utilizada para definir a região de transição de fases, quando  $\theta(T) = 0$  o domínio se encontra no estado sólido, se  $\theta(T) = 1$  o domínio se encontra totalmente no estado líquido.  $\theta(T)$  é modelada através da função de Heaviside:

$$\theta(T) = \begin{cases} 0, & \dots \quad T > T_S \\ 1, & \dots \quad T < T_L \\ 0.5 + 0.9375 \left( 2 \times \frac{T-T_m}{\Delta T} \right) - 0.625 \left( 2 \times \frac{T-T_m}{\Delta T} \right)^3 \\ \quad + 0.1875 \left( 2 \times \frac{T-T_m}{\Delta T} \right)^5, & \dots \quad T_S < T < T_L \end{cases} \quad (5.4)$$

A taxa de calor, representado por  $Q(t)$ , atua de maneira uniforme na esfera de volume  $V$ . No problema térmico, as superfícies dos fios e da esfera estão sujeitos a condições de contorno de convecção e radiação:

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial n}(x, y, z, t) = h(T)(T - T_\infty) + \sigma \epsilon(T)(T^4 - T_\infty^4) \quad (5.5)$$

onde  $n$  é um vetor unitário normal à superfície com sentido pra fora do domínio,  $h$  é o coeficiente de calor por convecção,  $\sigma$  a constante de Stefan-Boltzmann,  $\epsilon$  a emissividade e  $T_\infty$  a temperatura ambiente.

Segundo Incropera *et al.* [32], os valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção natural em gases varia entre 2 W/(m<sup>2</sup>.K) e 25 W/(m<sup>2</sup>.K), e a

dependência do coeficiente de calor por convecção em relação a temperatura é fraca. O coeficiente de transferência calor por convecção  $h$  foi definido constante para os fios do termopar como  $15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

Para obter  $h$  na região próxima a esfera, foi utilizada a correlação definida por Incropera *et al.* [32], mostrada na Eq. (5.6). Esta equação é uma correlação para o cálculo do coeficiente de transferência de calor convectivo em um problema de convecção natural em uma superfície esférica.

$$Nu_D = 2 + \frac{0,589Ra_D^{\frac{1}{4}}}{\left[1 + \left(\frac{0,469}{Pr}\right)^{\frac{9}{16}}\right]^{\frac{4}{9}}} \quad (5.6)$$

onde  $Ra_D$  é o número de Rayleigh,  $Nu_D$  número de Nusselt e  $Pr$  número de Prandtl.

## 5.2 Solução Numérica

O cálculo da distribuição de temperaturas tridimensional foi realizado utilizando o Método dos Elementos Finitos através do programa comercial COMSOL Multiphysics 5.6. Foi gerada uma malha tetraédrica com 54000 elementos. As propriedades termofísicas, massa específica,  $\rho$ , condutividade térmica,  $k$ , e calor específico,  $c_p$ , consideradas para o Alumel e Cromel foram obtidas de Buttsworth [33], além disso, os valores de emissividade de 0,1 para o cromel e 0,1 para o alumel foram obtidos de Sasaki *et al.* [34].

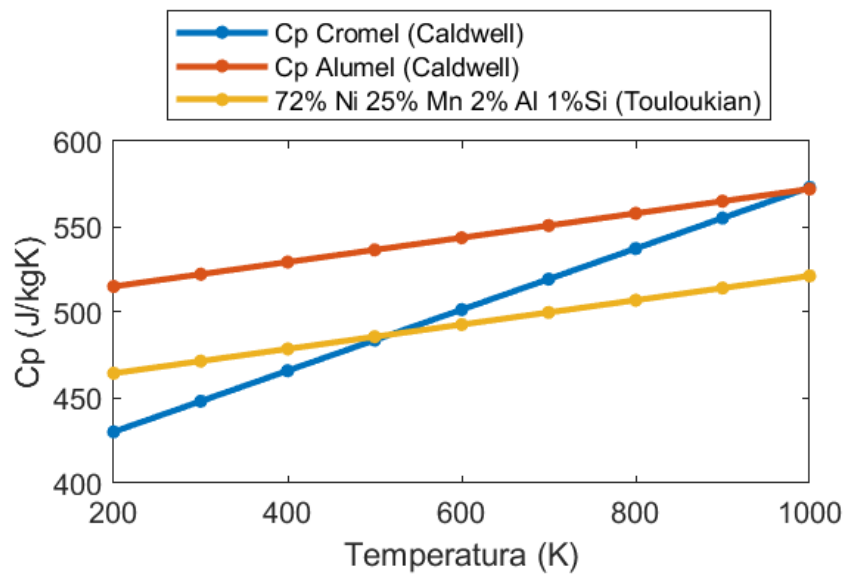
Buttsworth [33] coletou dados da literatura e produziu os gráficos apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3, os quais apresentam correlações do calor específico  $c_p$  e condutividade térmica  $k$  em função da temperatura, para os materiais cromel e alumel. A composição dos materiais do termopar tipo k pode ser aproximada de: cromel 90% Níquel, 10% Cromo; alumel 95% Níquel, 2% Alumínio, 2% Manganês, 1% Silício. Apesar do níquel representar grande parte da composição do material, existem diferenças significantes entre as propriedades térmicas do cromel e alumel. Essas diferenças foram comprovadas quando comparadas com os valores de calor específico do alumel em outra composição química descrita por Touloukian [35] (72% Ni, 2% Al, 25% Mn, 1% Si) apresentados na Figura 5.2, as quais diferem da análise feita por Caldwell [36].

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.2 e 5.3, são correlacionados pelas as Equações (5.7 e 5.8) para o cromel [33].

$$c_{p_{cromel}}(T) = 0,1786 \times T + 394,3 [J/kgK] \quad (5.7)$$

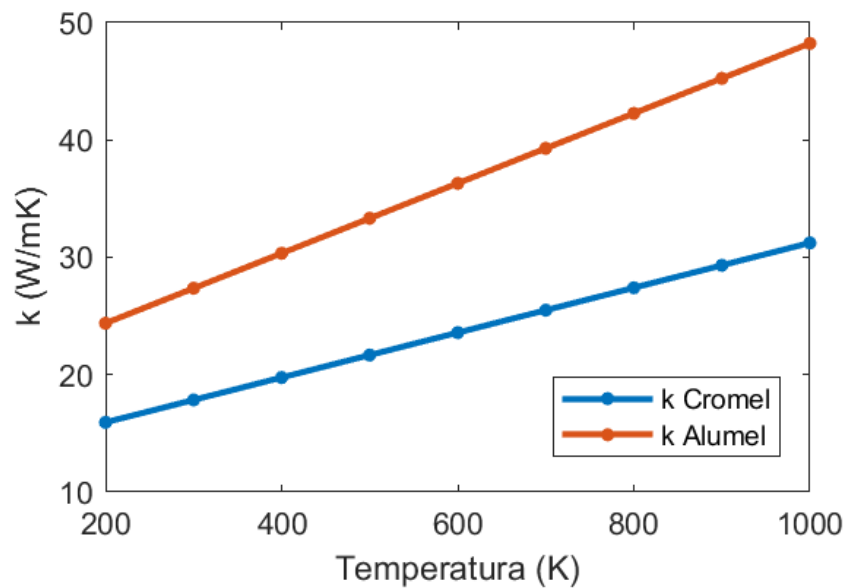
$$k_{cromel}(T) = 0,01912 \times T + 12,11 [W/mK] \quad (5.8)$$

Figura 5.2 – Variação do calor específico do cromel e alumel.



Fonte: Adaptado de Buttsworth [33].

Figura 5.3 – Variação da condutividade térmica do cromel e alumel.



Fonte: Adaptado de Buttsworth [33].

e as equações 5.9 e 5.10 para o alumel [33]:

$$c_{p\text{alumel}}(T) = 0,0712 \times T + 500,8 [J/kgK] \quad (5.9)$$

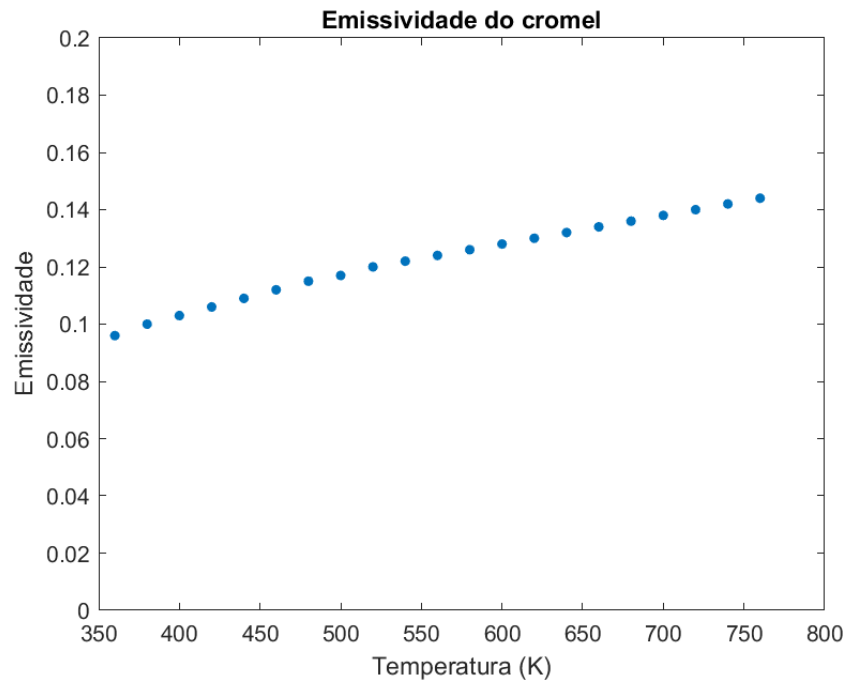
$$k_{\text{alumel}}(T) = 0,02981 \times T + 18,42 [W/mK] \quad (5.10)$$

A temperatura  $T$  é expressa em  $K$ , o calor específico  $c_p$  é expresso em  $J/kgK$  e a condutividade  $k$  em  $W/mK$ . A partir de dados reportados por Caldwell [36], a massa específica  $\rho$  do cromel é considerada  $8730 \text{ kg/m}^3$  e do alumel é considerada  $8600 \text{ kg/m}^3$

com incertezas de  $\pm 1\%$ . A incerteza estimada para os calores específicos é de  $\pm 4\%$ , e para as condutividades é de  $\pm 10\%$ .

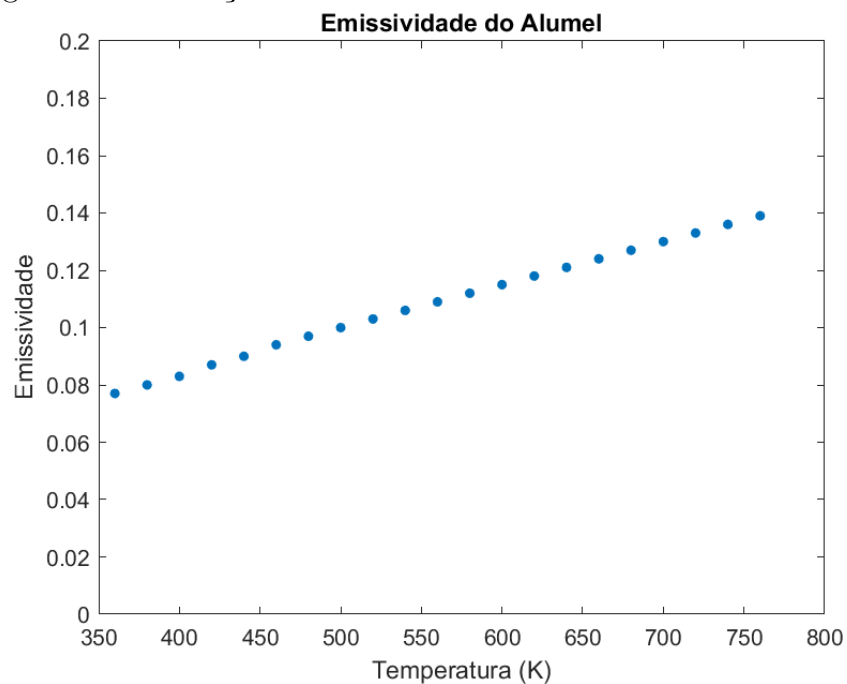
Sasaki *et al.* [34] estimaram a emissividade hemisférica total do cromel e alumel. Eles utilizaram uma técnica de calorimetria transiente. Os resultados foram representados de forma gráfica nas Figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.4 – Variação da emissividade total hemisférica do cromel.



Fonte: Adaptado de Sasaki et al. [34].

Figura 5.5 – Variação da emissividade total hemisférica do alumel.



Fonte: Adaptado de Sasaki et al. [34].

As emissividades térmicas do cromel e alumel em função da temperatura são dadas pelas Eqs. (5.11) e (5.12), respectivamente. Essas equações foram obtidas através de uma regressão linear de valores discretos extraídos dos gráficos das Figuras 5.4 e 5.5.

$$\varepsilon_{cromel}(T) = 1,2 \times 10^{-4} \times T + 0,0528 \quad (5.11)$$

$$\varepsilon_{alumel}(T) = 1,55 \times 10^{-4} \times T + 0,0212 \quad (5.12)$$

As propriedades térmicas na zona de transição de fases são calculadas como a média ponderada da fração de sólido/líquido representado pelo  $\theta(T)$  na Eq. (5.4). Como mostrados nas Eqs. (5.13, 5.14 e 5.15).

$$\rho = (1 - \theta)\rho_S + \theta\rho_L \quad (5.13)$$

$$k = (1 - \theta)k_S + \theta k_L \quad (5.14)$$

$$H = \frac{1}{\rho}((1 - \theta)H_S + \theta H_L) \quad (5.15)$$

onde as propriedades são avaliadas nas temperaturas  $T_S$  e  $T_L$  e  $H$  é a entalpia específica.

Foi considerado, de maneira aproximada, que a esfera que representa a junta soldada é formada por 50% de Alumel e 50% de Chromel. Sendo assim, as propriedades termofísicas nesse subdomínio são obtidas pela média das propriedades dos metais que compõem o termopar.

## 5.3 Problemas Inversos em Transferência de Calor

Neste capítulo é introduzido os problemas inversos e apresentado o Método da Função Especificada Iterativo, o qual foi utilizado para solucionar o problema de condução de calor não linear. Por fim, é mostrado o algoritmo que foi utilizado para resolver o problema.

### 5.3.1 Curva de descarregamento do capacitor x potência

A Equação (5.16) representa a energia armazenada no BC.

$$U = \frac{1}{2}CV^2 \quad (5.16)$$

A Equação (5.17) representa a variação da tensão durante o descarregamento do BC.

$$V_d(t) = V_0 \times e^{-t/R \times C} \quad (5.17)$$

Substituindo a Eq. (5.17) na Eq. (5.16) temos a energia variando com o tempo no processo de descarga, representada na Eq. (5.18).

$$U = \frac{1}{2} \times C \times (V_0 \times e^{-t/RC})^2 \quad (5.18)$$

A potência de descarga é a variação da energia em relação ao tempo. A potência pode ser obtida derivando a Eq. (5.18) em função do tempo, dada na Eq. (5.19).

$$\frac{dU}{dt} = \frac{-V_0^2}{R} \times e^{-2t/RC} \quad (5.19)$$

A potência dada pela variação da energia no tempo é negativa pelo fato da energia armazenada reduzir com o passar do tempo. Nessa equação, as constantes  $R$  e  $C$  são, respectivamente, a resistência elétrica do circuito e a capacitância total armazenada. Neste trabalho foram utilizados os valores de  $R=1 \Omega$  e  $C=0,066 \text{ F}$ . Além disso,  $V_0$  é a variável que define o ponto máximo da potência. No problema inverso o resíduo de temperatura experimental e temperatura simulada será minimizado variando  $V_0$  na Eq. (5.20) da potência do fluxo de calor.

$$P(t) = \frac{V_0^2}{R} \times e^{-2t/RC} \quad (5.20)$$

### 5.3.2 Método da Função Especificada Não Linear

O Método da Função Especificada Interativo é uma técnica baseada no Método da Minimização de Gauss com regularização em tempos futuros [37], capaz de resolver problemas inversos não lineares em condução de calor.

O Método da Função Especificada Interativo considera a taxa de calor constante durante  $r$  passos de tempo a partir do tempo atual [38]. O parâmetro  $r$  é responsável pela regularização do método.

O vetor  $T$  é considerado um vetor de observações com tamanho  $n$ , dependente de outro vetor com parâmetros desconhecidos  $\beta$  de comprimento  $p$ , quando uma variação de  $\Delta b$  é aplicada neste vetor, a temperatura em um ponto do domínio pode ser aproximada através de uma expansão em série de Taylor truncada no termo de primeira ordem:

$$T|_{b+\Delta b} = T|_b + \frac{\partial T}{\partial \beta}|_b \Delta b \quad (5.21)$$

A Equação 5.22 mostra a matriz sensibilidade de tamanho  $n \times p$ , a qual representa os valores dos coeficientes de sensibilidade da variável  $T$  em relação a  $\beta$ . A matriz é o gradiente da equação 5.21.

$$X_\beta = \frac{\partial T}{\partial \beta} = \begin{bmatrix} \frac{\partial T_1}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_1}{\partial \beta_2} & \cdots & \frac{\partial T_1}{\partial \beta_p} \\ \frac{\partial T_2}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_2}{\partial \beta_2} & \cdots & \frac{\partial T_2}{\partial \beta_p} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial T_n}{\partial \beta_1} & \frac{\partial T_n}{\partial \beta_2} & \cdots & \frac{\partial T_n}{\partial \beta_p} \end{bmatrix} \quad (5.22)$$

A partir dos dados obtidos experimentalmente, denominados  $Y$ , é possível determinar valores de  $b$  que minimizam a diferença entre  $T$  e  $Y$ .  $T$  é os valores calculados computacionalmente utilizando o Método dos Elementos Finitos. O problema inverso é resolvido através da minimização da equação 5.23.

$$S = (Y - T)^T(Y - T) \quad (5.23)$$

Substitui-se as equações 5.21 e 5.22 na equação 5.23, então minimiza-se  $S$  variando o valor de  $\Delta b$ , tem-se a equação 5.24.

$$\Delta b = (X_\beta^T X_\beta)^{-1} X_\beta^T (Y - T|_b) \quad (5.24)$$

Na equação 5.24 o incremento do parâmetro  $b$  é calculado no tempo atual para cada iteração. Para o problema inverso estudado, o parâmetro  $\beta$  possui somente um componente, que é a potência de soldagem  $Q(t)$ , portanto temos  $\Delta b = \Delta Q$ . Para cada passo de tempo  $M$ , o incremento  $\Delta Q$  deve ser computado até que a equação 5.25 atinja a convergência.

$$Q_M^{(i+1)} = Q_M^{(i)} + \Delta Q_M^{(i)} \quad (5.25)$$

O algoritmo utilizado para estimar a taxa de calor é apresentado a seguir:

1. Entrar com um valor inicial arbitrário para  $q_M$ ;
2. Determinar uma tolerância  $tol=0,001$ ;
3. Resolver o modelo matemático necessário para determinar as temperaturas  $T$  a partir da taxa de calor  $Q_M$ ;
4. Resolver as equações necessárias para determinar o valor de  $X_q$ ;
5. Utilizar a Eq. (5.24) para calcular a correção  $\Delta Q_M^{(i)}$ ;

6. Se  $\Delta Q_M < tol$ , então o processo convergiu. Se não, atualizar

$$Q_M^{(i+1)} = Q_M^{(i)} + \Delta Q_M^{(i)} \quad (5.26)$$

7. Retornar ao passo 3 até garantir a convergência no passo 6;

8. Iniciar um novo passo de tempo e repetir o algoritimo.

Como critério de parada, pode ser utilizada a relação da Eq. (5.27) para o cálculo da tolerância. [39]

$$\frac{\Delta Q_M^{(i)}}{Q_M^{(i+1)}} \leq tol \quad (5.27)$$

## 6 Resultados

Neste capítulo são apresentados o equipamento de soldagem final e as soldagens que foram realizadas com ele. Apresenta-se também a validação do programa computacional para o cálculo do problema direto. Em seguida é apresentada a potência e energia estimada utilizando a técnica de problema inverso. Por último as temperaturas calculadas e as medidas experimentalmente são comparadas.

### 6.1 Equipamento de soldagem

Os resultados da medição das esferas de solda foram apresentados na tabela 6.1 e no gráfico da Figura 6.1. A menor esfera produzida após a fusão dos dois fios apresentou o diâmetro de 1,50 mm e a maior esfera produzida apresentou um diâmetro de 1,70 mm. A média das medições resultaram em um diâmetro de 1,55 mm. As medidas apresentaram uma variação de  $\pm 0,05$  mm, o que corresponde cerca de 3%, com isso pode se dizer que o equipamento possui uma boa repetibilidade.

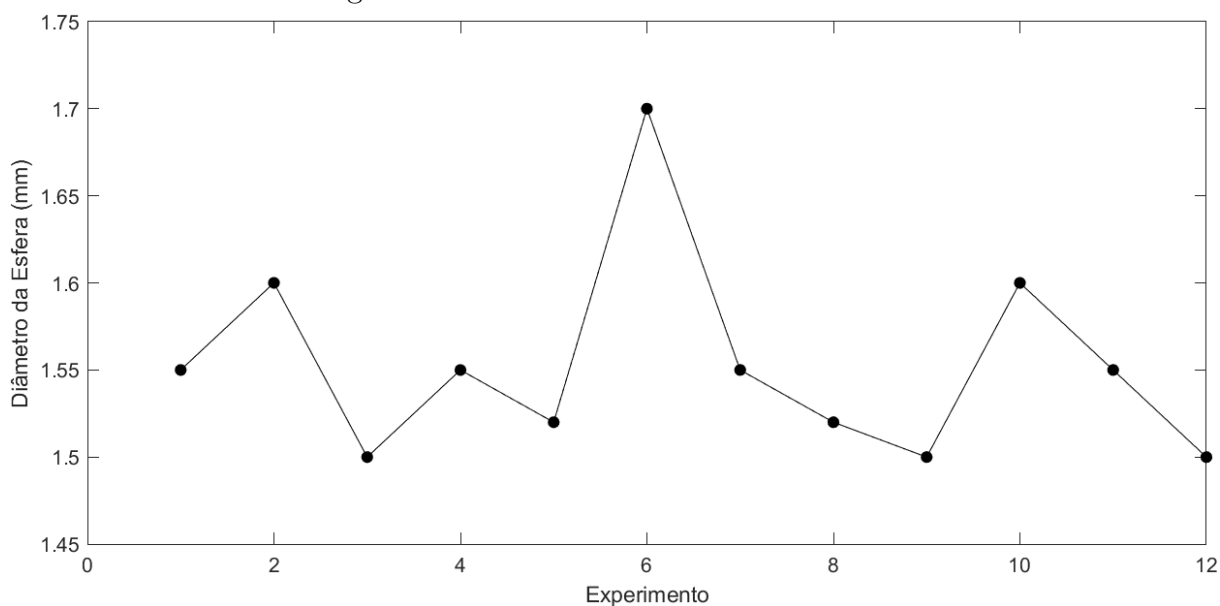
Tabela 6.1 – Diâmetros das esferas de solda.

Experimentos	Diâmetro da Esfera (mm)
1	1,55
2	1,60
3	1,50
4	1,55
5	1,52
6	1,70
7	1,55
8	1,52
9	1,50
10	1,60
11	1,55
12	1,50

Fonte: Elaborado pelo autor.

O equipamento produzido foi capaz de soldar termopares de diferentes diâmetros. Na forma em que o equipamento foi projetado, é possível alterar a energia liberada pelos capacitores, apenas remodelando o código do Arduíno. Dessa forma, o equipamento é capaz de soldar inúmeros tipos de termopares, sem modificar seu *hardware*. Além disso o equipamento não utilizou sua capacidade máxima de descarga de energia. Portanto é possível soldar termopares mais espessos que 24 AWG.

Figura 6.1 – Diâmetro das esferas de solda.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na indústria, existem alguns equipamentos desenvolvidos que realizam soldagem em fios finos. Alguns utilizam a soldagem resistiva e outros a soldagem por descarga capacitiva. Sobretudo, o equipamento desenvolvido no trabalho difere de todos eles pela versatilidade, praticidade na operação e a capacidade de soldar termopares mais robustos.

O equipamento resolve o problema da falta de flexibilidade e agilidade na execução de soldagem de termopares, ele pode ser transportado com facilidade devido ao seu baixo peso e volume. Além disso, o equipamento pode ser utilizado tanto com tensão de 127 V quanto com 220 V. Pessoas com pouco conhecimento de soldagem são capazes de operar o equipamento, devido a interface simples do equipamento com o operador, a qual evita o erro de seleção da quantidade de energia dispensada em cada tipo de termopar.

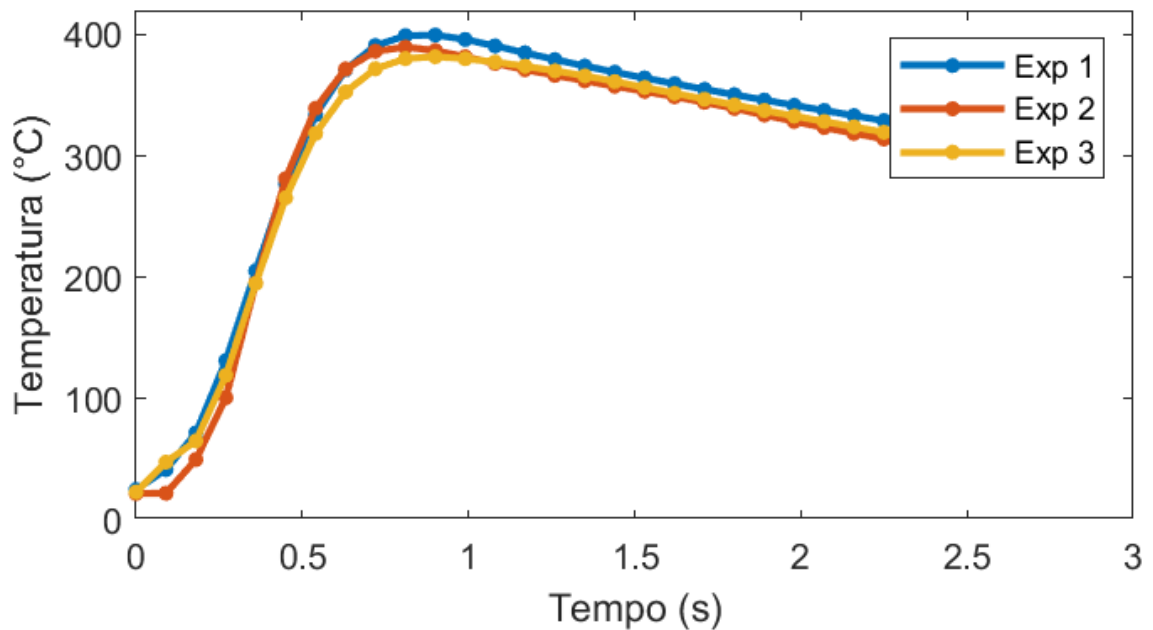
## 6.2 Curvas experimentais de temperatura

Foram realizados 3 experimentos que mediram as temperaturas na região de 4 mm da extremidade do termopar de 24 AWG. Essas temperaturas foram medidas utilizando um termopar de 30 AWG, como apresentado na Figura 4.13. Os resultados desses experimentos foram expressos em forma gráfica, apresentado na Figura 6.2.

Os 3 experimentos tiveram baixa divergência entre eles, podendo ser utilizados para aplicar da técnica de problema inverso. Um fluxo de calor de aproximadamente 90 ms foi aplicado por descarga capacitiva, o aquecimento da região observada ocorre até cerca de 0,8 s, quando alcança a temperatura de 400°C. Após o aquecimento brusco, o termopar sofre uma resfriamento natural mais lento.

Outros 4 experimentos foram realizados medindo temperaturas em diferentes re-

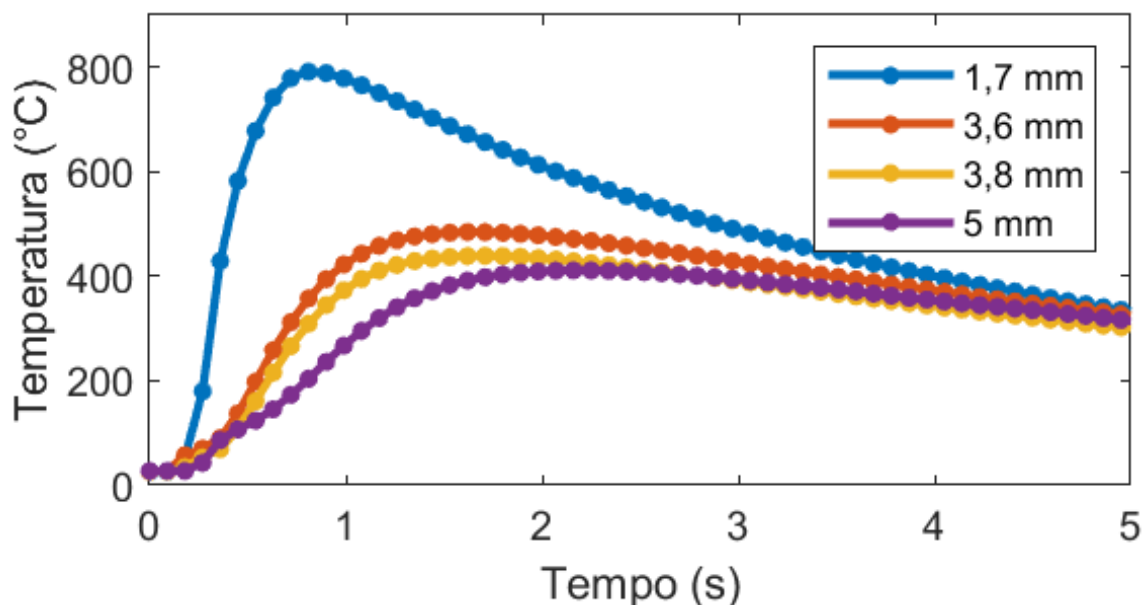
Figura 6.2 – Perfil da distribuição de temperatura medida a 4mm da extremidade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

giões do termopar que foi fundido. Os resultados foram apresentados na Figura 6.3. É possível observar um aquecimento maior em regiões mais próximas da zona de fusão, na região de 1,7 mm a temperatura atinge 800°C em menos de 0,8 s do início do aquecimento. Em regiões mais distantes da zona de fusão, o aquecimento é mais lento. Apesar de também ser rápida, a fase de resfriamento do material é mais branda que a fase do aquecimento. Em aproximadamente 5 segundos após o início do experimento, as temperaturas na região do termopar são igualadas na faixa dos 250°C.

Figura 6.3 – Perfil da distribuição de temperatura medida em diferentes posições da extremidade.



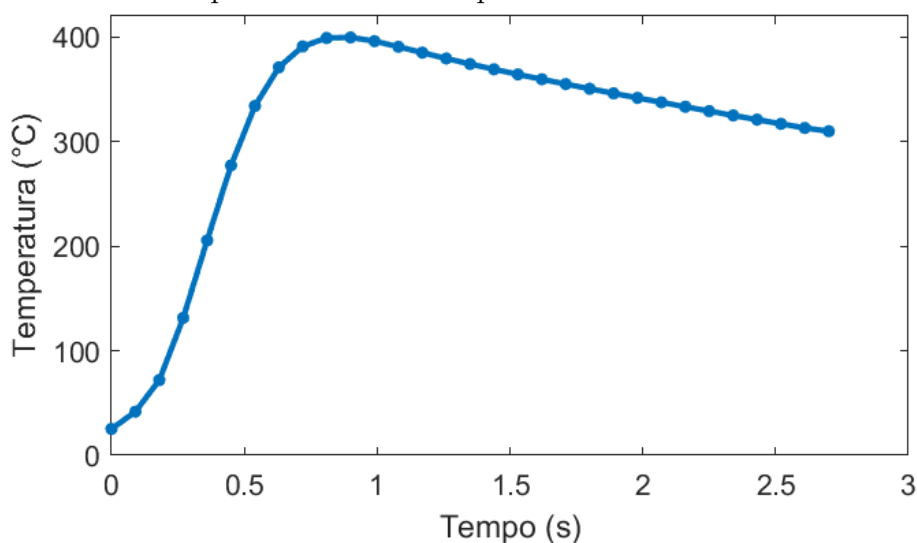
Fonte: Elaborado pelo autor.

Em ambos experimentos as temperaturas foram medidas no fio de cromel, o qual apresenta a condutividade térmica menor que a do alumel. Na Figura 6.3 os dados de temperatura foram obtidos em diversos pontos da região aquecida: 1,7 mm, 3,6 mm, 3,8 mm, 5 mm. Todos experimentos tiveram as temperaturas medidas em intervalos de 90ms.

### 6.3 Estimação da potência no processo de soldagem por descarga capacitiva

Os dados coletados do experimento do processo de soldagem foram utilizados para estimar a potência utilizada na fusão dos materiais. Devido aos altos gradientes de temperatura, o problema foi considerado não-linear. O gráfico apresentado na Figura 6.4 mostra-se a variação da temperatura medida a 4 mm da extremidade dos fios de tempopar. Neste ponto a temperatura atinge a temperatura de 400°C em menos de 1 segundo do início da soldagem. O tempo total de experimento foi em média de 2,5 s, sendo 0,5 s o tempo total do fluxo de calor. Após o período do fluxo de calor promovido pela descarga capacitiva a temperatura na região observada continua aumentando até atingir os 400°C

Figura 6.4 – Perfil de temperatura medida experimentalmente a 4mm da esfera de solda.

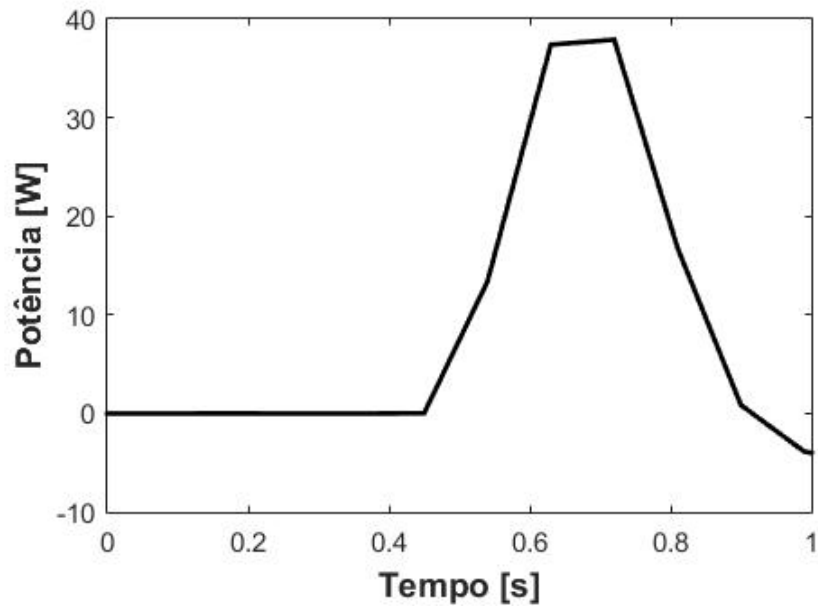


Fonte: Elaborado pelo autor.

A potência foi estimada usando a técnica da Função Especificada iterativa, utilizada em problemas não-lineares. O resultado da estimação é apresentado na Figura 6.5. A potência foi estimada utilizando uma análise de 3 tempos futuros. A potência máxima estimada foi de 37,8 W, entre o período de 0,63 s a 0,72 s e retorna a zero no tempo de 0,92 s.

Na Figura 6.6 é apresentado a comparação entre as temperaturas experimentais e calculadas a partir da potência estimada. Os valores de temperatura obtidos experimentalmente ficaram muito próximos dos valores calculados numericamente. Os valores

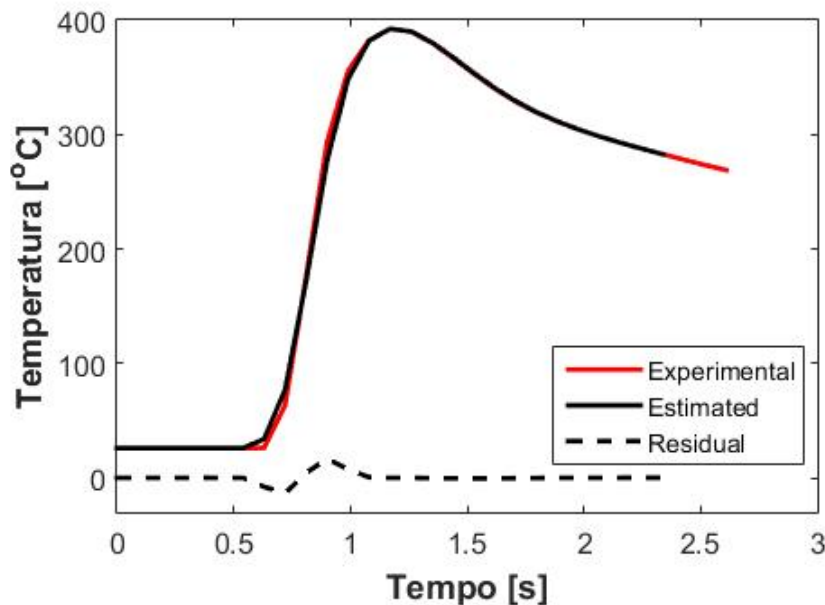
Figura 6.5 – Potência estimada x Tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

residuais obtidos da diferença entre as temperaturas experimentais e calculadas são apresentados pela linha tracejada do gráfico da Figura 6.6. O valor máximo da temperatura residual obtido é de  $16^{\circ}\text{C}$ , a média dos resíduos é  $0,16^{\circ}\text{C}$  e o desvio padrão é  $4,8^{\circ}\text{C}$ .

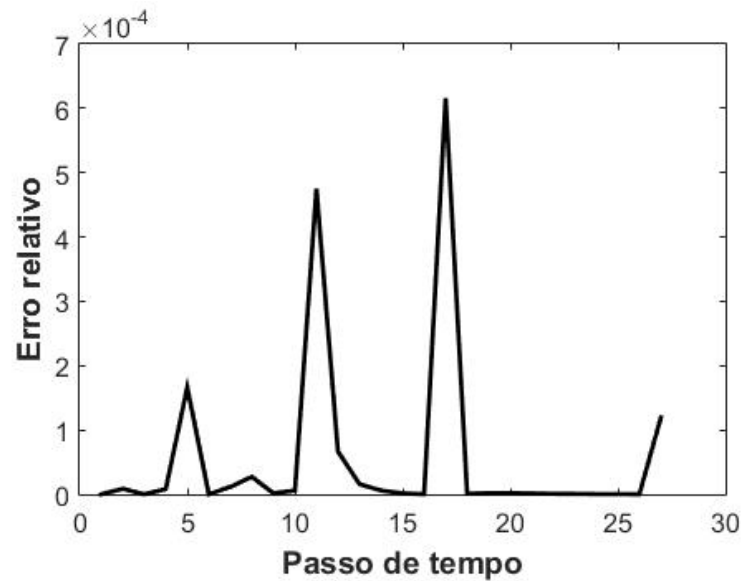
Figura 6.6 – Comparação entre temperatura experimental e estimada.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 6.7 é apresentado o erro relativo do método aplicado. Como o método converge para erros menores que 0,001, a convergência foi atingida para todos os passos de tempos.

Figura 6.7 – Erro relativo em a cada passo de Tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

## 6.4 Eficiência

A energia utilizada no processo de soldagem foi obtida a partir da área do gráfico  $P \times t$  estimada. A área do gráfico da Figura 6.5 representa a energia utilizada no aporte térmico da soldagem em Joules. O resultado da área, calculado pela integral da potência em relação ao tempo foi de 9,52 J. A Energia total dispensada no processo é a própria energia armazenada no BC, que resultou em 50,91 J. A eficiência pode ser calculada pela Eq. (6.1).

$$\eta = \frac{U_{estimada}}{U_{Total}} \quad (6.1)$$

O valor da eficiência calculada foi de  $\eta = 0.19$ . A baixa eficiência do processo pode ser explicada devido a grande dissipação de energia em forma de luz e som durante o processo.

## 7 Conclusão

### 7.1 Equipamento de soldagem por descarga capacitiva

Foi possível desenvolver um equipamento capaz de realizar a fusão de fios de termopares de forma eficaz. O equipamento é compacto e seguro, resultado da utilização da placa de circuito impresso e da fonte chaveada. A fonte chaveada foi responsável por reduzir o peso do equipamento, sem ela seria necessário utilizar um transformador, o qual é pesado e de alto custo. A placa de circuito impresso foi responsável por organizar e reduzir o volume do equipamento, além de melhorar a fixação dos componentes eletrônicos. O Arduíno e o relé foram capazes de controlar a tensão submetida no BC, além disso o Arduíno facilitou a programação e o desenvolvimento do equipamento, pela sua versatilidade e simplicidade. A utilização de somente 3 capacitores aumentou a vida útil do equipamento não sendo necessária a manutenção periódica.

O equipamento projetado e desenvolvido neste trabalho não utilizou sua capacidade máxima de armazenamento de energia na soldagem de termopares de 24 AWG. Então conclui-se que é possível realizar a soldagem em termopares mais robustos que o de 24 AWG. Essa capacidade é um diferencial do novo equipamento, pois equipamentos desenvolvidos anteriormente não são capazes de realizar a junção desse tipo de termopar.

### 7.2 Estimação da potência no processo de soldagem por descarga capacitiva

Neste trabalho também foi aplicada uma metodologia para estimar a potência consumida em um processo de soldagem. O Método da Função Especificada não linear foi usado para estimar o aporte térmico no processo de soldagem por descarga capacitiva. Para resolver o problema direto de transferência de calor, foi utilizado o programa comercial Comsol. O programa auxiliou os cálculos e modelagem do problema físico, com ele foi possível criar um modelo térmico próximo da realidade e realizar os cálculos com rapidez.

Na execução dos experimentos foram encontradas muitas dificuldades. Como o processo é extremamente rápido e os fios são finos e sensíveis, qualquer perturbação no ambiente interfere nos dados obtidos. Apesar disso, foi observado repetibilidade em alguns experimentos, o que possibilitou o uso dos dados experimentais.

O grande desafio nesse tipo de problema é a validação do método, uma vez que o processo é rápido e sensível, o que dificulta a utilização de um calorímetro, por exemplo.

### 7.3 Propostas para trabalhos futuros

Sugere-se para trabalhos futuros a realização de testes em tempopares mais espessos como de 20 AWG e 16 AWG e a aplicação do Planejamento de Experimentos para avaliar a qualidade da soldagem.

Uma proposta futura é o uso da equação da potência de descarga dos capacitores, mostrada no capítulo 5, para estimar a potência utilizada no processo de soldagem. Dessa forma o método utilizado não seria uma estimação iterativa, e sim uma estimação utilizando uma função pré definida. Além disso, propor outras técnicas de problemas inversos para estimar a energia.

Outra proposta que deixaria o modelo mais completo, é a simulação o fluido na poça de fusão. Isso melhoraria a realidade da simulação do processo, e permitiria que outras variáveis como o escoamento do fluido pudessem ser calculadas.

## Referências

- 1 TOUGAS, I. M.; AMANI, M.; GREGORY, O. J. Metallic and ceramic thin film thermocouples for gas turbine engines. *Sensors*, v. 13, n. 11, p. 15324–15347, 2013. ISSN 1424-8220. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1424-8220/13/11/15324>>. 18
- 2 RIVERA, K.; RICCI, M.; GREGORY, O. Diffusion barrier coatings for cmc thermocouples. *Surface and Coatings Technology*, v. 336, 09 2017. 18
- 3 ZOU, Z. et al. Numerical modeling of steady state errors for shielded thermocouples based on conjugate heat transfer analysis. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 119, p. 624–639, 2018. ISSN 0017-9310. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0017931017323050>>. 19
- 4 WEBSTER, E.; SAUNDERS, P. Characterizing drift behavior in type s thermocouples to predict in-use temperature errors. *International Journal of Thermophysics*, v. 41, 12 2019. 19
- 5 HARZHEIM, A. et al. Single-material graphene thermocouples. *Advanced Functional Materials*, v. 30, p. 2000574, 04 2020. 19
- 6 GHOSH, A. et al. Microwelding using electrochemical discharge. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 37, p. 1303–1312, 1997. 20
- 7 MOLENDÁ, C. et al. Numerical simulation of nugget growth for resistance spot welding in stainless steel aisi 304. *Soldagem & Inspeção*, v. 15, p. 298–306, 12 2010. 20
- 8 SCHWEDERSKY, M. et al. High productivity tig welding: Influence of shielding gases on the limit speed for defect formation. *Soldagem & Inspeção*, v. 16, p. 333–340, 12 2011. 20
- 9 JAFARI, M. et al. Experimental and numerical analysis of shunting effect in resistance spot welding of al2219 sheets. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, v. 64, 06 2016. 21
- 10 LEE, Y. et al. Development of numerical analysis model for resistance spot welding of automotive steel. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 31, p. 3455–3464, 07 2017. 21
- 11 AVILA, T.; BRACARENSE, A. Influência dos parâmetros de soldagem no ensaio de torção de solda a ponto em um dispositivo automatizado recém desenvolvido. *Soldagem & Inspeção*, v. 22, p. 228–237, 06 2017. 22
- 12 FERMO, I. R. et al. Equipamento automatizado de soldagem capacitiva para termopares. *Soldagem & Inspeção*, v. 24, 01 2019. 22, 38
- 13 SILVA, C. P.; SILVA, A. L. F. Lima e; SILVA, S. M. M. Lima e. Uso de regularização em problemas inversos de transferência de calor. *VII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 2012. Disponível em: <<https://www.abcm.org.br/anais/conem/2012/PDF/CONEM2012-0223.pdf>>. 22

- 14 BERNTSSON, F. An inverse heat conduction problem and improving shielded thermocouple accuracy. *Numerical Heat Transfer Part A-applications - NUMER HEAT TRANSFER PT A-APPL*, v. 61, p. 754–763, 05 2012. 23
- 15 IKEHATA, M.; ITOU, H.; AKIRA, S. The enclosure method for an inverse problem arising from a spot welding. *Mathematical Methods in the Applied Sciences*, v. 39, 12 2015. 23
- 16 FERREIRA, D. C. et al. Análise térmica de ferramenta de metal duro revestida usando comsol. *CONEM 2016 - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, 08 2016. 23
- 17 MAGALHAES, E.; SILVA, A.; SILVA, S. A thermal efficiency analysis of a gas tungsten arch welding process using a temperature moving sensor. *International Journal of Thermal Sciences*, v. 129, 07 2018. 23
- 18 DOURADO, R.; MAGALHÃES, E.; SILVA, S. M. M. Lima e. A time traveling regularization method for three dimensional inverse problems in heat conduction. *ENCIT 2018-Brazilian congress of thermal sciences and engineering*, 2018. Disponível em: <[10.26678/ABCM.ENCIT2018.CIT18-0586.pdf](https://doi.org/10.26678/ABCM.ENCIT2018.CIT18-0586.pdf)>. 24
- 19 CAROLLO, L.; SILVA, A.; SILVA, S. A different approach to estimate temperature-dependent thermal properties of metallic materials. *Materials*, v. 12, p. 2579, 08 2019. 24
- 20 RAMOS, N. et al. Determinação do campo de temperatura de uma ferramenta de corte de metal duro utilizando problemas inversos e comsol. In: . [S.l.: s.n.], 2019. 25
- 21 FRIVALDSKY, M. et al. Investigation of thermal effects and lifetime estimation of electrolytic double layer capacitors during repeated charge and discharge cycles in dedicated application. *Electrical Engineering*, v. 100, p. 11–15, 03 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00202-016-0482-2>>. 26
- 22 SILVA, M. A. S. da; SEIXAS, T. M. Data linearization of the charging curve of a capacitor. *European Journal of Physics*, IOP Publishing, v. 34, n. 3, p. 653–658, 03 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/0143-0807/34/3/653>>. 27
- 23 HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. *Fundamentals of Physics*. John Wiley & Sons Canada, Limited, 2010. (Halliday & Resnick Fundamentals of Physics). ISBN 9780470547939. Disponível em: <<http://books.google.co.uk/books?id=49h2cgAACAAJ>>. 27, 28, 29, 30
- 24 SINGH, S. et al. Improved power quality switched mode power supply using buck-boost converter. In: *2014 IEEE International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES)*. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–6. 30
- 25 NARULA, S.; SINGH, B.; BHUVANESHWARI, G. Interleaved csc converter-based power factor corrected switched mode power supply for arc welding. *IET Power Electronics*, v. 9, n. 12, p. 2404–2415, 2016. Disponível em: <<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/iet-pel.2015.0510>>. 30
- 26 SINGH, S. et al. Power factor corrected zeta converter based improved power quality switched mode power supply. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 62, n. 9, p. 5422–5433, 2015. 30

- 27 MEHL, E. L. M. *Fontes Chaveadas*. UFPR, 2004. Disponível em: <<http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/mehl/downloads/FontesChaveadas.pdf>>. 31
- 28 BRAGA, N. *Relés: Circuitos e aplicações*. Editora NCB, 2017. ISBN 9788565051255. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DXAEDgAAQBAJ>>. 31, 32
- 29 LOPEZ-RODRIGUEZ, F. M.; CUESTA, F. An android and arduino based low-cost educational robot with applied intelligent control and machine learning. *Applied Sciences*, v. 11, n. 1, 2021. ISSN 2076-3417. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2076-3417/11/1/48>>. 33
- 30 D'AUSILIO, A. Arduino: A low-cost multipurpose lab equipment. *Behavior Research Methods*, v. 44, p. 305–313, 2012. 33, 34
- 31 BOYLESTAD, R. *Introdução À Análise De Circuitos*. PEARSON BRASIL, 2019. ISBN 9788543024981. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=kEenwwEACAAJ>>. 34
- 32 INCROPERA, F. et al. *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. LTC, 2008. ISBN 9788521615842. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=EFxLPwAACAAJ>>. 48, 49
- 33 BUTTSWORTH, D. Assessment of effective thermal product of surface junction thermocouples on millisecond and microsecond time scales. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 25, p. 409–420, 12 2001. 49, 50
- 34 SASAKI, S. et al. Simultaneous measurements of specific heat and total hemispherical emissivity of chromel and alumel by a transient calorimetric technique. *International Journal of Thermophysics*, v. 15, n. 3, p. 547–565, maio 1994. 49, 51
- 35 TOULOUKIAN, Y. S. Specific heat-metallic elements and alloys. *Thermophysical Properties of Matter*, IFI/Plenum, v. 4, 1970. Disponível em: <<https://ci.nii.ac.jp/naid/10003571419/en/>>. 49
- 36 CALDWELL, F. R. Thermocouple materials. *Temperature, Its Measurement and Control in Science and Industry*, Reinhold, III, n. 2, p. 81–134, 1962. Disponível em: <<https://ci.nii.ac.jp/naid/10004062908/en/>>. 49, 50
- 37 BECK, J.; ARNOLD, K. *Parameter Estimation in Engineering and Science*. Wiley, 1977. (Probability and Statistics Series). ISBN 9780471061182. Disponível em: <[https://books.google.com.br/books?id=\\_qAYgYN87UQC](https://books.google.com.br/books?id=_qAYgYN87UQC)>. 53
- 38 HEINRICH, B.; HOFMANN, B. Beck, j. v.; blackwell, b.; st. clair, c. r., jr., inverse heat conduction. ill-posed problems. new york etc., j. wiley & sons 1985. xvii, 308 s., £ 46.00. isbn 0-471-08319-4. *ZAMM - Journal of Applied Mathematics and Mechanics / Zeitschrift für Angewandte Mathematik und Mechanik*, v. 67, n. 3, p. 212–213, 1987. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/zamm.19870670331>>. 53
- 39 WOODBURY, K. *Inverse engineering handbook*. [S.l.: s.n.], 2002. 1-466 p. 55

# Apêndices

# APÊNDICE A – Código Computacional para o Arduíno

```

// --- Bibliotecas Auxiliares ---
#include <LiquidCrystal.h>      //Biblioteca para o display LCD

//MONTAR LEITURA DE TENSÃO NO A1
//LIGAR RELE NO I/O 2 NF
//LIGAR LED NO I/O 4

// --- Protótipo das Funções Auxiliares ---
void keyboardRead();
void updateMenu();
void execMenu();
void solda24();
void solda30();
void solda32();

// --- Variáveis Globais ---
int adc_value = 0x00;          //armazena o valor digital do conversor AD - menus
int menu = 0x01;              //armazena o valor da posição no menu
float tensao;                 //armazena o valor da tensao nos capacitores
int aux_menu = 0x00;          //flag aux para atualizacao do menu

// -- Conexão relé -- Numeração
int qRelay1 = 0x02; // Porta Digital i/o conectada ao relé
int qRelay2 = 0x03;

//Flags de leitura dos botões
boolean right = 0x00, butt01 = 0x00,
        up     = 0x00, butt02 = 0x00,
        down   = 0x00, butt03 = 0x00,
        left   = 0x00, butt04 = 0x00,

```

```
    select = 0x00, butt05 = 0x00;

// --- Hardware do LCD ---
LiquidCrystal disp(8, //RS no digital 8
                  9, //EN no digital 9
                  4, //D4 no digital 4
                  5, //D5 no digital 5
                  6, //D6 no digital 6
                  7); //D7 no digital 7

void setup()
{
    disp.begin(16,2); //Inicializa LCD 16 x 2
    disp.setCursor(1,0); //Posiciona cursor na coluna 2, linha 1
    disp.print("Solda Capacitiva"); //Imprime mensagem

    //Configuração relé como saída
    pinMode(qRelay1,OUTPUT);
    pinMode(qRelay2,OUTPUT);

    digitalWrite(qRelay1,LOW); //abre relé s1
    digitalWrite(qRelay2,LOW); //abre relé s2

} //end setup

void loop()
{
    updateMenu(); // Geração e atualização do Menu (navegação)
    keyboardRead(); // Leitura dos botões
    execMenu(); //Execução do Menu

    // digitalWrite(qRelay1,HIGH); //abre relé s1
    // digitalWrite(qRelay2,HIGH); //abre relé s2

} //end loop
```

```

/*****

```

### FUNÇÃO PARA LEITURA DO TECLADO ANALÓGICO

Leu-se as respectivas tensões geradas na saída do teclado, para cada botão obtendo-se a seguinte tabela:

#### VALORES AD REPRESENTADOS PELAS TECLAS:

num	Nome	Tensão (V)	Digital
01	right	0,0000	0
02	up	0,7083	145
03	down	1,6102	330
04	left	2,4683	505
05	select	3,6205	741

Os valores da última coluna (Digital) são pertinentes à resolução ADC de 10 bits

Tensão Máxima = 5V

Valor Máximo ADC = 1024

Constante de Conversão =  $1024/5 = 204,8$

Multiplicou-se os valores da coluna Tensão (V) pela constante de conversão e arredondou-se para o inteiro mais próximo, obtendo-se assim os limites de cada uma das 15 teclas.

```

*****/

```

```

void keyboardRead()

```

```

{

```

```

    adc_value = analogRead(A0);          //Variável para leitura recebe valor AD de A

```

```

    // --- Testa se os botões foram pressionados ---

```

```
// Se foi pressionado, seta a respectiva flag
if      (adc_value < 50)                butt01 = 0x01;
else if (adc_value > 103 && adc_value < 200) butt02 = 0x01;
else if (adc_value > 250 && adc_value < 380) butt03 = 0x01;
else if (adc_value > 450 && adc_value < 550) butt04 = 0x01;
else if (adc_value > 700 && adc_value < 800) butt05 = 0x01;

// --- Testa se os botões foram liberados --- adc_value na condição botões sol
//
if (adc_value > 50 && butt01) //Botão right solto e flag butt01 setada?
{
    butt01 = 0x00; //Limpa flag butt01
    right  = 0x01; //Seta flag right
} //end right
if (adc_value > 200 && butt02) //Botão up solto e flag butt02 setada?
{
    butt02 = 0x00; //Limpa flag butt02
    up     = 0x01; //Seta flag up
} //end up
if (adc_value > 380 && butt03) //Botão down solto e flag butt03 setada?
{
    butt03 = 0x00; //Limpa flag butt03
    down   = 0x01; //Seta flag down
} //end down
if (adc_value > 550 && butt04) //Botão left solto e flag butt04 setada?
{
    butt04 = 0x00; //Limpa flag butt04
    left   = 0x01; //Seta flag left
} //end left

if (adc_value > 800 && butt05) //Botão select solto e flag butt05 setada?
{
    //Sim...
```

```
        butt05 = 0x00;                //Limpa flag butt04
        select  = 0x01;                //Seta flag select

    } //end left

} //end keyboardRead

//-----

void updateMenu() // Atualiza o menu a cada varredura
{

// MENU INICIAL

    if(aux_menu == 0x00)
    {
        switch(menu)
        {
            case 0: // Impede o contador de sair dos limites
                menu = 0x01;
                break;
            case 1:
                disp.clear();
                disp.print(">Solda 24AWG");
                disp.setCursor(0,1); //Posiciona cursor na coluna 1, linha 2
                disp.print(" Solda 30AWG"); //Imprime mensagem
                aux_menu = 0x01;
                break;
            case 2:
                disp.clear();
                disp.print(" Solda 24AWG");
                disp.setCursor(0,1); //Posiciona cursor na coluna 1, linha 2
                disp.print(">Solda 30AWG"); //Imprime mensagem
                aux_menu = 0x01;
                break;
        }
    }
}
```

```
case 3:
    disp.clear();
    disp.print(" Solda 30AWG");
    disp.setCursor(0,1);          //Posiciona cursor na coluna 1, linha 2
    disp.print(">Solda 32AWG"); //Imprime mensagem
    aux_menu = 0x01;
    break;
case 4:      // Impede o contador de sair dos limites
    menu = 3;
    break;
default:
    disp.clear();
    disp.print(" erro no menu");
    break;
}
}

// Atualização dos botões
if(up == 0x01)          //tecla up pressionada?
{                      //sim...
    aux_menu = 0x00;   //menu atualiza qnd botao atualiza
    menu--;
    up = 0x00;        //limpa flag da tecla
} //end if up

if(down == 0x01)      //tecla down pressionada?
{                      //sim...
    aux_menu = 0x00;   //menu atualiza qnd botao atualiza
    menu++;
    down = 0x00;      //limpa flag da tecla
} //end if down

}

//-----

void execMenu() // Execução das funções que vão fazer a soldagem
{
    if(right == 0x01)
```

```
{
  right = 0x00;
  switch (menu)
  {
    case 1:
      solda(840);
      menu = 0x01;
      aux_menu = 0x00;
      break;
    case 2:
      solda(600);
      menu = 0x01;
      aux_menu = 0x00;
      break;
    case 3:
      solda(400);
      menu = 0x01;
      aux_menu = 0x00;
      break;
    default:
      break;
  }
}

//-----

void solda(int ten_arduino) //Soldagem Bitola 24 AWG
{
  int cont = 0;

  tensao = analogRead(A1);

  do
  {
    cont++;
    disp.clear();
```

```
disp.print("Carregando.."); //Imprime mensagem
tensao = analogRead(A1);
delay(1000);

digitalWrite(qRelay1,HIGH); //fecha relé s1
tensao = analogRead(A1);

while (tensao < ten_arduino) //limite que garante tensão (47 V) no capacitor
{
    delay(1000);//LEITURA AQUI -----
    tensao=analogRead(A1); //Leitura da variável tensão
}

//delay(5000);//APROX 1 TAU
digitalWrite(qRelay1,LOW); //abre relé s1
//digitalWrite(qRelay2,LOW); //abre relé s2
delay(1000);
disp.clear();
disp.print("Executar solda"); //Imprime mensagem

// while (tensao < 1023) //limite que garante tensão (45 V) no capacitor
// {
//     delay(1000);//LEITURA AQUI -----
//     tensao=analogRead(A1); //Leitura da variável tensão
// }

delay(5000);

// while (tensao > 50)
// {
//     delay(1000);
//     tensao=analogRead(A1); //Leitura da variável tensão
// }
    tensao=analogRead(A1); //Leitura da variável tensão
}while (tensao > 300 || cont > 3);
}
```