

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**RODOLFO CAVOUR MORETTI SCHIAVI**

# **Processo GTAW com Oscilação do Arame**

**FLORIANÓPOLIS, 2020**

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA  
CATARINA - CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
CURSO SUPERIOR DE ENGENHARIA MECATRÔNICA**

**RODOLFO CAVOUR MORETTI SCHIAVI**

## **Processo GTAW com Oscilação do Arame**

Trabalho de conclusão de curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de engenheiro mecatrônico.

Orientador:

Prof. Dr. Nelso Gauze Bonacorso

**FLORIANÓPOLIS, 2020**

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor.

Moretti Schiavi, Rodolfo Cavour  
Processo GTAW com Oscilação do Arame / Rodolfo Cavour  
Moretti Schiavi ; orientação de Nelso Gauze Bonacorso.  
- Florianópolis, SC, 2020.  
60p.

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) - Instituto Federal  
de Santa Catarina, Câmpus Florianópolis. Bacharelado  
em Engenharia Mecatrônica. Departamento  
Acadêmico de Metal Mecânica.  
Inclui Referências.

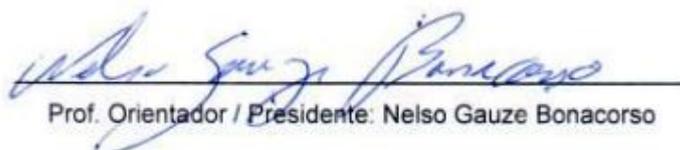
1. Diferencial de velocidade. 2. Oscilação do arame.  
3. Alimentação dinâmica do arame. 4. TIG. I. Gauze  
Bonacorso, Nelso . II. Instituto Federal de Santa Catarina.  
Departamento Acadêmico de Metal Mecânica. III.  
Título.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

**ATA DA BANCA FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE ENGENHARIA  
MECATRÔNICA DO INSTITUTO FEDERAL DE SANTA CATARINA – Nº 0067**

Aos 28 dias do mês de Setembro, de 2020, às 10 h 45 min, o estudante **Rodolfo Cavour Moretti Schiavi** apresentou o seu Trabalho de Conclusão de Curso para julgamento à Banca Examinadora constituída pelos seguintes integrantes: Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng (Orientador/Presidente da Banca/IF-SC Florianópolis), Prof. Jean Paulo Rodrigues, Dr. Eng (IF-SC Florianópolis) e Prof Erwin Werner Teichmann, Dr. Eng. (IF-SC Florianópolis). A sessão pública de defesa foi aberta pelo Presidente da Banca, que apresentou a Banca Examinadora e deu continuidade aos trabalhos, fazendo uma breve referência ao TCC que tem como título **Processo GTAW com Oscilação do Arame**. Na sequência, o estudante teve até 30 minutos para a exposição de seu trabalho, e cada integrante da Banca Examinadora fez a arguição após a apresentação do mesmo. Finalmente, foi aberto um espaço aos presentes para eventuais perguntas ou comentários sobre o trabalho apresentado. Ouvidas as explicações do estudante, a Banca Examinadora, reunida em caráter sigiloso, para proceder à avaliação final, deliberou pelo conceito 10,0 (dez). Foi dada ciência ao estudante que a versão final do trabalho deverá ser entregue até o dia **02/11/2020**, com as devidas alterações sugeridas pela banca. Nada mais havendo a tratar, a sessão foi encerrada às 12 h 10 min, dela sendo lavrada a presente ata, que, uma vez aprovada, foi assinada por todos os membros da Banca Examinadora e pelo estudante.

  
Prof. Orientador / Presidente: Nelso Gauze Bonacorso

\_\_\_\_\_  
Prof. Avaliador 1: Jean Paulo Rodrigues

\_\_\_\_\_  
Prof. Avaliador 2: Erwin Werner Teichmann

\_\_\_\_\_  
Acadêmico: Rodolfo Cavour Moretti Schiavi



INSTITUTO FEDERAL  
SANTA CATARINA

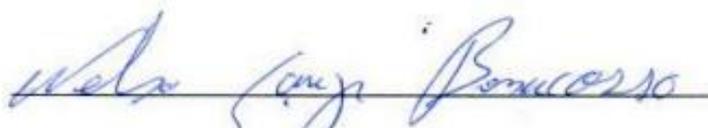
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO

SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS

## DECLARAÇÃO DE FINALIZAÇÃO DE TRABALHO DE CURSO

Declaro que o estudante **Rodolfo Cavour Moretti Schiavi**, matrícula nº 151005188-0, do Curso de Engenharia Mecatrônica, defendeu o trabalho intitulado **Processo GTAW com Oscilação do Arame**, o qual está apto a fazer parte do banco de dados da Biblioteca Hercílio Luz do Instituto Federal de Santa Catarina, Campus Florianópolis.

Florianópolis, 09 de NOVEMBRO de 2020.



Prof. Orientador do TCC: Nelso Gauze Bonacorso

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio incondicional. Provendo tudo que precisei para viver tão longe de casa. À minha Mãe, Mareli do Carmo Moretti Schiavi, que apesar das dificuldades das viagens, sempre me visitou para trazer um pouco de casa e me fazer companhia. Não menos importante, a meu pai, Wilson Schiavi, que de origem muito humilde, superou desafios na vida para proporcionar aos filhos a possibilidade de conquistas como o diploma universitário.

Ao Professor Nelso, que me orientou neste trabalho e em diversos outros ao longo da graduação, assim como em projetos de pesquisa e extensão, me proporcionando um grande conhecimento prático no desenvolvimento de projetos inovadores com seu vasto conhecimento e criatividade singular.

Aos professores que repartiram seu conhecimento para minha formação acadêmica e profissional. Em especial ao professor Jean Paulo Rodrigues pela sua prestatividade e paciência em me auxiliar com as documentações necessárias para meu intercâmbio, estágio e rematrículas a distância. Prestatividade e paciência também presentes em suas aulas e atendimentos.

Aos técnicos e demais funcionários do IFSC, que nos auxiliam e mantêm o Instituto operando. Em especial aos responsáveis técnicos Fagney José da Cunha, Charles Nuernberg da Silva e Giovani Camara pelo auxílio na fabricação de peças do projeto.

## RESUMO

Novas técnicas e métodos são constantemente implementadas nos processos de soldagem com o intuito de aumentar o rendimento e a qualidade dos resultados. Em meio a tais aprimoramentos tem-se a técnica de oscilação do arame, que se prova eficaz para acelerar o destacamento da gota e com isso aumentar o rendimento e previsibilidade do resultado final. Assim, o presente trabalho se propõe a aprimorar um sistema diferencial para alimentação oscilatória de arame para o processo GTAW. O mecanismo em questão foi inicialmente desenvolvido como dissertação de mestrado, resultando em uma patente depositada. Na sequência, aprimoramentos mecânicos foram realizados em um trabalho de conclusão de curso. Porém, devido a problemas de projeto em ambos os trabalhos realizados, somente foi possível comprovar o conceito fundamental do mecanismo diferencial, sem atingir resultados de soldagem satisfatórios. Um sensor digital para detectar o contato do arame de soldagem e poça de fusão foi desenvolvido para maximizar a taxa de fusão do arame via o incremento da frequência de oscilação do arame. Bons resultados foram obtidos no controle da velocidade de avanço do arame em malha aberta.

**Palavras-chave:** Diferencial de velocidade, Oscilação do arame, Alimentação dinâmica do arame, TIG.

## **ABSTRACT**

New techniques and methods are constantly implemented in the welding processes in order to increase the yield and the quality of the results. In the midst of such improvements, there is the wire oscillation technique, which proves to be effective in accelerating the detachment of the drop and thereby increasing the yield and predictability of the final result. Thus, the present work proposes to improve a differential system for oscillating wire feed for the GTAW process. The mechanism in question was initially developed as a master's dissertation, resulting in a patent filed. Subsequently, mechanical improvements were made as a graduation thesis. However, due to design problems in both works, it was only possible to prove the fundamental concept of the differential mechanism, without achieving satisfactory welding results. A digital sensor to detect the contact of the welding wire and fusion pool was developed to maximize the wire fusion rate by increasing the wire oscillation frequency. Good results were obtained in controlling the wire feed speed in open mesh.

**Palavras-chave:** Oscillatory wire feeding, Dynamic wire feeding, GTAW, TIG.

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
2	OBJETIVOS .....	11
2.1	Objetivo geral .....	11
2.2	Objetivos específicos.....	11
3	JUSTIFICATIVA.....	12
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	12
4.1	O processo GTAW .....	12
4.2	Alimentação dinâmica na soldagem GTAW .....	14
4.2.1	Produtos consolidados .....	14
4.3	O sistema de alimentação dinâmica em trabalhos anteriores ...	15
4.3.1	Patente .....	15
4.3.2	Dissertação de mestrado profissional de Volker .....	16
4.3.3	Monografia de conclusão de curso de Resena Junior.....	17
4.4	Trabalhos recentes na área de alimentação dinâmica .....	18
4.4.1	Effect of Dynamic Wire in the GTAW Process.....	18
4.4.2	Keyhole GTAW with Dynamic Wire Feeding Applied to Orbital Welding of 304L SS Pipes.....	18
4.4.3	Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco.....	19
5	DESENVOLVIMENTO.....	20
5.1	Componentes utilizados .....	20
5.1.1	O redutor planetário.....	21
5.1.2	Arduino Mega – ATmega2560.....	22
5.1.3	Driver didático .....	23
5.1.4	Motor de passo.....	24
5.2	Adaptações e reparos .....	25
5.2.1	Suporte dos motores .....	25

5.2.2	Engrenagens sol .....	26
5.2.3	Reparo no driver de acionamento .....	28
5.2.4	Acoplamento à tocha de soldagem .....	29
5.3	Acionamento .....	30
5.3.1	Acionamento dos motores.....	31
5.3.2	Geração dos passos.....	32
5.4	Mecanismo em malha aberta .....	35
5.4.1	Método de acionamento .....	35
5.4.2	Firmware .....	35
5.4.3	Funcionamento esperado.....	36
5.5	Sensor de realimentação.....	39
6	RESULTADOS .....	42
6.1	Ensaio iniciais.....	42
6.1.1	Problemas com a primeira versão do firmware .....	42
6.2	Ensaio com deslocamento nulo.....	43
6.3	Ensaio de velocidade do arame .....	45
6.4	Dispositivo na tocha .....	48
7	CONCLUSÃO .....	49
8	Referências .....	50
	APÊNDICE A – TABELA DO ENSAIO DE AVANÇO.....	52
	APÊNDICE B - FLUXOGRAMA.....	53

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Processo de soldagem GTAW .....	13
Figura 2 - Fonte de soldagem TIPTIG .....	15
Figura 3 - Fonte de soldagem TIGSpeed .....	15
Figura 4 - Desenho da patente depositada .....	16
Figura 5 - Mecanismo desenvolvido por Volker .....	17
Figura 6 - Mecanismo desenvolvido por Resena Junior .....	17
Figura 7 - Cordões de solda sem à esquerda e com alimentação oscilatória de arame à direita. Em a) Posição sobrecabeça; b) Vertical ascendente; c) Cordão em chapa com soldagem sobrecabeça. ....	18
Figura 8 - Macrografias do resultado da soldagem .....	19
Figura 9 - Transferência da gota e gráficos de tensão e corrente .....	20
Figura 10 - Diagrama eletroeletrônico .....	21
Figura 11 - Redutor planetário .....	22
Figura 12 - Arduino Mega .....	23
Figura 13 - Driver didático .....	23
Figura 14 - Correntes nas fases com acionamento em passo pleno no modo corrente .....	24
Figura 15 – Foto do motor de passo KTC-42HS60-1704 .....	24
Figura 16 - Curva de torque do motor de passo KTC-42HS60-1704 .....	25
Figura 17 - Elemento de fixação dos motores .....	26
Figura 18 - Mecanismo com furos de fixação em destaque .....	26
Figura 19 - Desenho técnico do motor de passo KTC-42HS60-1704 .....	27
Figura 20 - Engrenagem sol .....	27
Figura 21 - Motores com elementos acoplados .....	28
Figura 22 - Reparos no driver de acionamento .....	29
Figura 23 - Foto do dissipador soldado ao CI .....	29
Figura 24 - Acoplamento do mecanismo na tocha .....	30
Figura 25 - Peça de fixação na tocha .....	30
Figura 26 - Método de acionamento do arame .....	31
Figura 27 - Acionamento dos motores e resultado esperado no tambor .....	32
Figura 28 - Velocidade do tambor e pulsos aplicados nos motores .....	32
Figura 29 - Diagrama de funcionamento do temporizador em modo CTC .....	33

Figura 30 - Máquina de estados do firmware .....	36
Figura 31 – Posição do arame com deslocamento nulo.....	38
Figura 32 - Esquemático da simulação do sensor.....	40
Figura 33 - Fluxograma do firmware para controle do recuo.....	41
Figura 34 - Osciloscópio da simulação.....	41
Figura 35 - Pulsos de comando inadequados .....	42
Figura 36 - Ciclo no motor 1.....	43
Figura 37 - Frames capturados do deslocamento do arame .....	44
Figura 38 - Deslocamento do arame .....	44
Figura 39 - Deslocamento teórico e experimental .....	45
Figura 40 - Exemplo do ensaio de avanço do arame. ....	46
Figura 41 - Velocidade do arame teórico, experimental e erro.....	47
Figura 42 - Erro percentual da velocidade experimental .....	47
Figura 43 - Arame recuado e avançado .....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

GTAW – Gas-Shielded Tungsten Arc Welding

GMAW - Gas Metal Arc Welding

CMT – Cold Metal Transfer

TIG – Tungsten Inert Gas

INPI – Instituto nacional de propriedade industrial

PPS – Pulsos por segundo

CTC – *Clear Timer on Compare*

MU – Movimento uniforme

MUV – Movimento uniformemente variado

RPS – Rotações por segundo

DDP – Diferença de potencial

RC – Resistor-capacitor

FPS – Frames por segundo

## 1 INTRODUÇÃO

A soldagem a arco elétrico surgiu em meados de 1800 utilizando eletrodos de grafite. Posteriormente o eletrodo de carbono foi substituído por um eletrodo metálico, quando Oscar Kjellberg desenvolveu e patenteou, em 1907, um eletrodo revestido com um material não-condutor, que ao ser fundido libera uma proteção de CO<sub>2</sub>. Kjellberg também fundou a ESAB, que hoje é a maior fabricante de equipamentos e insumos de soldagem.

Na década de 40 e 50 novas técnicas foram desenvolvidas utilizando diretamente gases de proteção como Hélio, argônio e CO<sub>2</sub>. Criando os processos GTAW, *Gas-shielded Tungsten Welding*, e GMAW, *Gas metal arc welding*.

O processo GTAW é amplamente utilizada na indústria em função da qualidade proporcionada nas soldas de uniões e de revestimentos de superfícies. Por isso, o mesmo se adequa melhor a certas aplicações que envolvem soldagem de responsabilidade do que outros processos como o SMAW, *Shielded metal arc welding*, e o GMAW. A evolução do procedimento automatizado GTAW trouxe à tona uma técnica utilizada na soldagem manual, na qual o soldador avança e recua o arame durante a soldagem. Alguns fabricantes desenvolveram e aprimoraram essa técnica, tanto no processo GMAW com o sistema conhecido por CMT, Cold Metal Transfer, desenvolvido pela empresa Fronius, quanto na soldagem GTAW com o produto conhecido por TIPTIG® desenvolvido pela empresa TIP TIG USA.

O sistema de alimentação oscilatória tratado neste trabalho foi desenvolvido durante o mestrado do engenheiro Stuart Volkert, e resultou no depósito de uma patente no INPI, Instituto Nacional de Propriedade Intelectual. Com resultados de soldagem não satisfatórios ao ser aplicado, principalmente devido ao caráter inovador e complexo do mecanismo em conjunto com o limitado tempo para finalização da dissertação, a continuação do projeto se tornou tema de TCC, Trabalho de Conclusão de Curso, do aluno Volnei Resena Junior. Com isso o sistema teve sua mecânica revisada e um novo protótipo foi construído onde se obteve maior robustez e confiabilidade. O acionamento foi por motores de corrente contínua, substituindo os motores de passo nema 11 utilizados por Volker (2018).

Após as modificações realizadas por Resena Junior (2019), obtiveram-se ótimos resultados em relação à robustez e funcionamento do mecanismo, não obstante os motores CC sem realimentação de velocidade não garantiam o correto funcionamento do mecanismo pelas suas características operacionais em modo corrente, no qual a velocidade não depende exclusivamente da corrente aplicada em sua bobina, mas também do torque de carga em seu eixo.

Com isso em mente e também evitando o uso de realimentação para não aumentar o custo e a complexidade, se propõe no presente trabalho a utilização de motores de passo de maior torque em relação aos utilizados por Volker (2018) para corrigir o problema de falha no deslocamento do arame, existente em ambos os desenvolvimentos anteriores.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Alcançar resultados satisfatórios nos cordões de solda utilizando o processo GTAW com o sistema desenvolvido, através de modificações no acionamento e controle da oscilação automática do arame.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Trocar motores CC por motores de passo de alto torque;
- Adaptar o mecanismo de oscilação para a instalação dos motores de passo;
- Desenvolver o acionamento dos motores de passo para oscilar o arame;
- Obter resultados de soldagem em frequências fixas de oscilação do arame;
- Desenvolver o sensor digital para detectar o contato do arame na poça de fusão;
- Obter os resultados de soldagem em frequências variáveis de oscilação do arame via a realimentação do sensor digital de contato;
- Publicar os resultados obtidos.

### **3 JUSTIFICATIVA**

Os mecanismos atuais de alimentação dinâmica de soldagem, como TIPTIG, realizam a oscilação distante da tocha, o que causa um efeito mola no arame, indesejável para o processo, uma vez que interfere na amplitude da oscilação. Com isso, um mecanismo que realiza a oscilação inserido na tocha, mais próximo da poça de fusão evitaria tal efeito, proporcionando melhores resultados no processo.

Outro ponto a ser considerado é o desenvolvimento de um sensor digital de baixo custo para detectar o contato do arame na poça de fusão. Por sua vez, isso fará com que a frequência de destacamento da gota seja a máxima para cada situação de soldagem, resultando em uma taxa de fusão máxima.

### **4 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

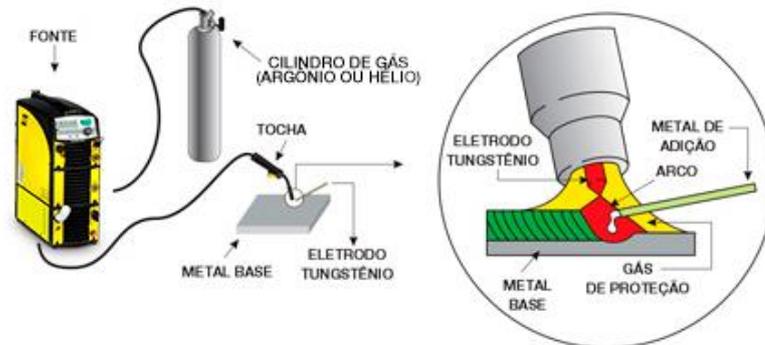
Neste capítulo será abordado o processo de soldagem GTAW, as tecnologias e trabalhos de referência publicados a respeito de alimentação dinâmica na soldagem GTAW.

#### **4.1 O processo GTAW**

A soldagem GTAW, popularmente conhecida como TIG, Tungsten Inert Gas, é um processo de união de metais ou revestimento que ocorre por meio de um arco voltaico produzido pela diferença de potencial entre um eletrodo de tungstênio não consumível e a peça. Quando a diferença de potencial é suficiente para romper a rigidez dielétrica do gás de proteção, forma-se o arco que ioniza a atmosfera inerte entre o eletrodo e a peça. O toque na peça seguido do afastamento do eletrodo de tungstênio com corrente reduzida é outra forma de abertura do arco. Tal fenômeno libera uma grande quantidade de energia, que é absorvida pela peça e pelo material de adição. Na soldagem GTAW é essencial a utilização de um gás de proteção para evitar a oxidação decorrente da alta temperatura, os gases mais utilizados são o hélio e argônio, utilizados separadamente ou em misturas. Diferente do processo GMAW, é possível realizar soldagens autógenas, ou seja, sem material de adição, com o

metal de base sendo responsável pela união e o único a receber a energia de soldagem. Na Figura 1 pode-se observar os componentes desse processo, inclusive o metal de adição sendo empregado.

**Figura 1: Processo de soldagem GTAW**



Fonte: ESAB (2020)

Esse processo pode ser utilizado para união de materiais, uniões de tubos, revestimento de superfícies, revestimentos de pás de turbinas de hidroelétricas para correção de desgastes, entre outros. Há também a preferência da soldagem GTAW em setores que requerem alta qualidade e confiabilidade, como oleodutos (Riffel et al, 2019).

Suas principais vantagens, segundo a empresa ESAB (2020), são:

- Elevado controle da poça de fusão;
- Ótimo acabamento;
- Ótima qualidade das propriedades mecânicas;
- Não apresenta escória, respingos ou fumos de soldagem;
- Possibilidade de soldagem de chapas muito finas;
- Soldagem de inúmeras ligas metálicas (aço, níquel, inoxidáveis, titânio, alumínio, magnésio, cobre, bronze e até mesmo ouro);
- Processo que visa a estanqueidade;
- Em determinadas espessuras e preparações não necessita de material de adição.

Também segundo a ESAB (2020), as principais desvantagens são:

- Baixas taxas de deposição;
- Necessidade de maior coordenação e experiência do soldador no controle da poça de fusão;
- Dificuldade de manter proteção adequada em ambientes com vento;
- Baixa tolerância a contaminantes.

As vantagens da soldagem GTAW mostram sua importância no cenário industrial. Não obstante, nas desvantagens nota-se que o campo de estudos de alimentação automática e a oscilação do arame podem contribuir para aumentar a aplicabilidade do processo. Sendo que, a alimentação dinâmica aumenta a taxa de deposição do metal de adição (PIKE, 2013), além disso, demonstra melhor controle da poça de fusão, segundo a empresa alemã EWM, fabricante do TIGSpeed®.

## **4.2 Alimentação dinâmica na soldagem GTAW**

A alimentação dinâmica na soldagem GTAW teve sua introdução no mercado com o desenvolvimento da tecnologia TIPTIG®, inventada e patenteada pelo Engenheiro Siegfried Plasch em 1999 (MIKE WILSON, 2007). Outros fabricantes entraram no mercado e a técnica se tornou fonte de estudo na área de soldagem.

### **4.2.1 Produtos consolidados**

Os principais fabricantes de sistemas de alimentação dinâmica são a TIPTIG® e EWM, fabricantes do TIPTIG®, Figura 2, e TigSpeed®, Figura 3, respectivamente. A TIPTIG®, pioneira no ramo, promete aumentos de até 300% na velocidade de soldagem, até 400% na taxa de deposição e uma diminuição de até 80% na diluição, comparado ao processo TIG convencional. O produto da TIPTIG® tem como frequência de oscilação do arame de 20 a 22Hz, enquanto a concorrente TIGSpeed® atinge de 1 a 16Hz.

**Figura 2 - Fonte de soldagem TIPTIG**



Fonte: TIPTIG®, 2020

**Figura 3 - Fonte de soldagem TIGSpeed**



Fonte: EWM-sales, 2020

#### **4.3 O sistema de alimentação dinâmica em trabalhos anteriores**

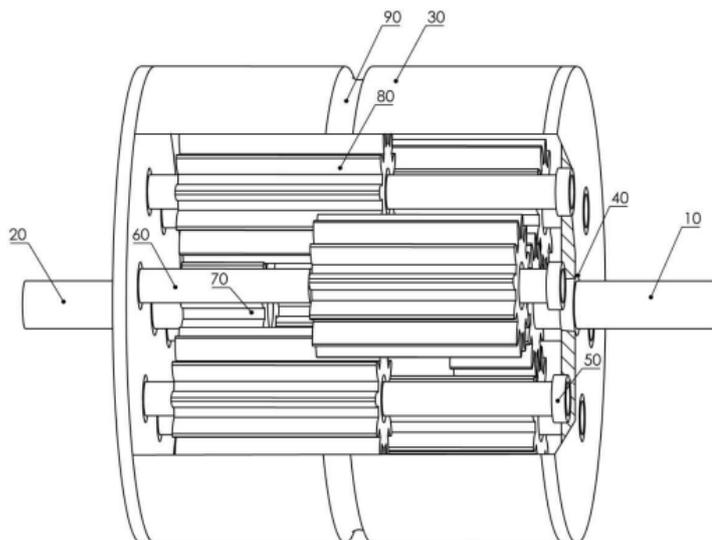
A presente monografia foi desenvolvida com base em trabalhos desenvolvidos na instituição. Os mesmos serão brevemente abordados neste capítulo.

##### **4.3.1 Patente**

O sistema de transmissão diferencial de velocidades e método de acionamento de Bonacorso; Volker; Schiavi, (2018) trata do princípio de funcionamento do mecanismo do presente trabalho. Devido a seu caráter inovador, se tornou uma patente depositada no INPI, Instituto Nacional de

Propriedade Industrial. A Figura 4 apresenta o desenho do dispositivo anexada ao depósito de patente. No qual, 10 e 20 representam os eixos dos motores; 30 a saída da transmissão diferencial; 40 e 50 os mancais de rolamento dos eixos; 60 os eixos das engrenagens planeta; 70 as engrenagens sol; e 80 as engrenagens planeta e 90 a ranhura em “V” do tambor onde o arame é inserido.

**Figura 4 - Desenho da patente depositada**

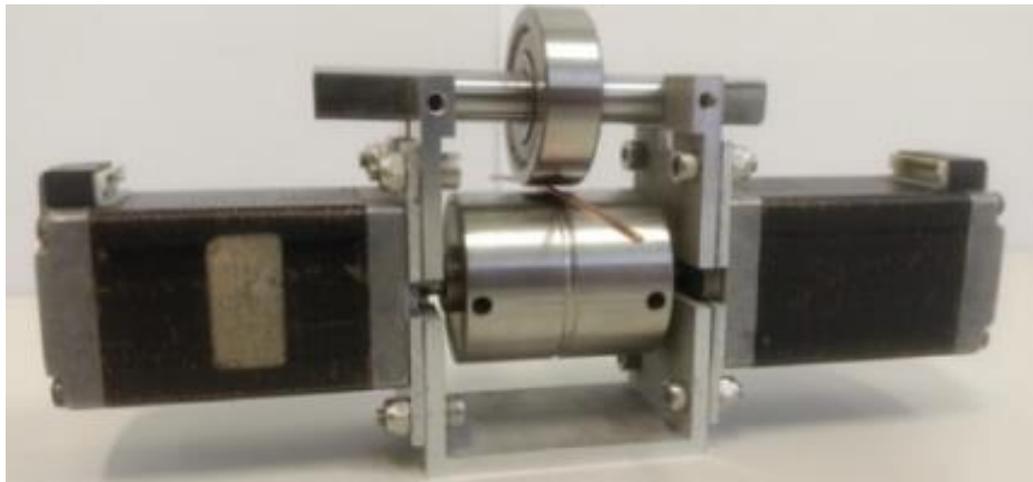


Fonte: Bonacorso; Volker; Schiavi, (2018)

#### 4.3.2 Dissertação de mestrado profissional de Volker

O trabalho de Volker (2018) proporcionou a comprovação do princípio de funcionamento do sistema proposto. Problemas com a precisão na fabricação de peças, assim como o baixo torque dos motores utilizados, não permitiram os resultados desejados em ensaios de soldagem, todavia os avanços obtidos permitiram que novos trabalhos aprimorassem o mecanismo. Na Figura 5 tem-se o dispositivo desenvolvido por Volker (2018).

**Figura 5 - Mecanismo desenvolvido por Volker**

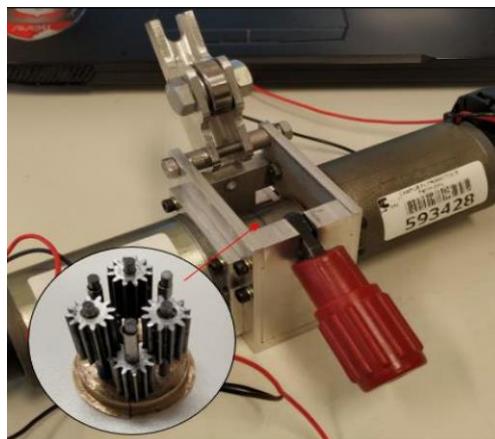


Fonte: Volker (2018)

#### 4.3.3 Monografia de conclusão de curso de Resena Junior

Com o intuito de resolver os problemas do trabalho de Volker (2018), foi proposto o tema de monografia de Resena Junior (2019); A mecânica foi revisada e novamente fabricada de modo a garantir uma inércia inferior, e diminuição das folgas, também substituiu-se os motores de passo Nema 11 por motores de corrente contínua com escovas, Figura 6. Apesar das novas implementações na mecânica terem sido satisfatórias, o acionamento em modo corrente através de motores CC sem realimentação de velocidade não se mostrou viável.

**Figura 6 - Mecanismo desenvolvido por Resena Junior**



Fonte: Resena Junior (2019)

O presente trabalho terá como ponto de partida grande parte protótipo fabricado por Resena Junior (2019), apenas com adaptações pontuais que visaram implementar o projeto atual.

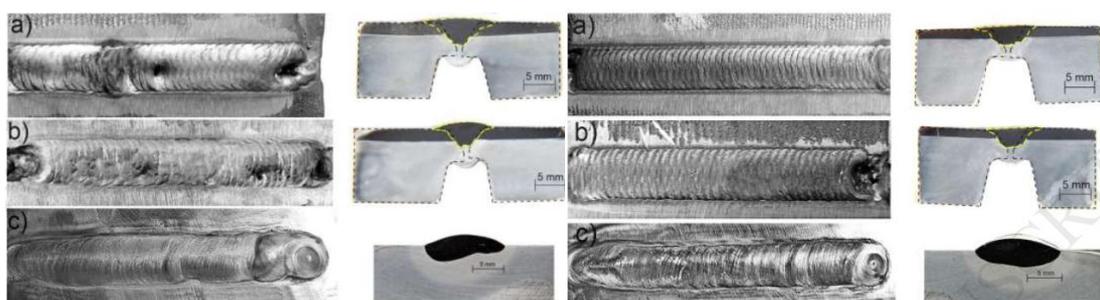
#### 4.4 Trabalhos recentes na área de alimentação dinâmica

As vantagens da oscilação do arame têm sido atestadas em diversos trabalhos. A seguir serão citados trabalhos recentes e relevantes na área em questão.

##### 4.4.1 Effect of Dynamic Wire in the GTAW Process

Utilizando um alimentador com frequência de 20Hz, Gonçalves e Silva RH, et al. (2019) demonstrou diminuição de defeitos e maior robustez no processo. Por meio de uma câmera com captura de 1000 frames por segundo e equipamentos para controle de iluminação, observou-se que a transferência do material fundido se tornou regular e com uma frequência igual à da oscilação. A melhora na qualidade do resultado é notória na Figura 7.

**Figura 7 - Cordões de solda sem à esquerda e com alimentação oscilatória de arame à direita. Em a) Posição sobrecabeça; b) Vertical ascendente; c) Cordão em chapa com soldagem sobrecabeça.**



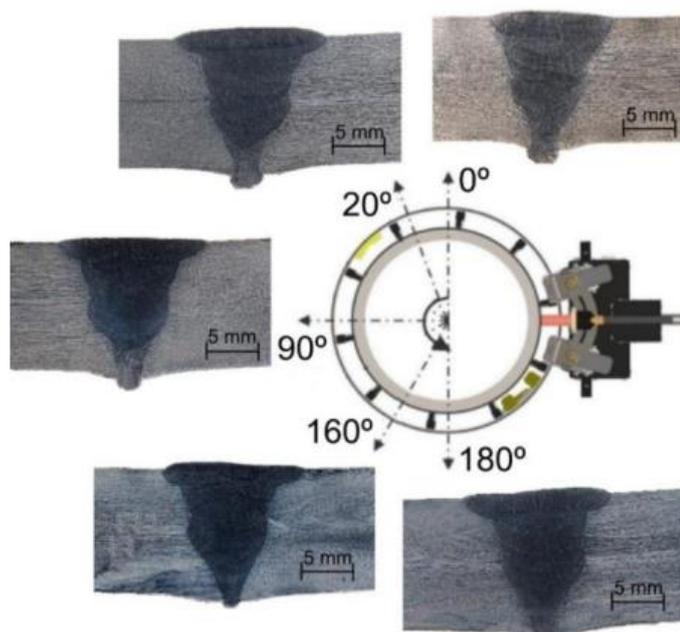
Fonte: Adaptado de Gonçalves e Silva, et al. (2019)

##### 4.4.2 Keyhole GTAW with Dynamic Wire Feeding Applied to Orbital Welding of 304L SS Pipes

O trabalho de Riffel KC, et al. (2019) utilizou a alimentação dinâmica em conjunto com o método *key hole* na soldagem orbital de tubos de aço inoxidável 304L.

Segundo os autores, o recuo e o avanço do arame resultou em uma deposição robusta de pequenas gotas, com repetibilidade e confiabilidade, o que garantiu um procedimento livre de defeitos, penetração completa na raiz e preenchimento total dos passes, como mostra a Figura 8. Também foi levantado pelos mesmos que uma alimentação constante do arame resultaria em contaminação do eletrodo devido a formação de gotas grandes na ponta do arame. Com isso, observa-se a importância da alimentação dinâmica em processos mais sensíveis como o do trabalho acima citado.

**Figura 8 - Macrografias do resultado da soldagem**

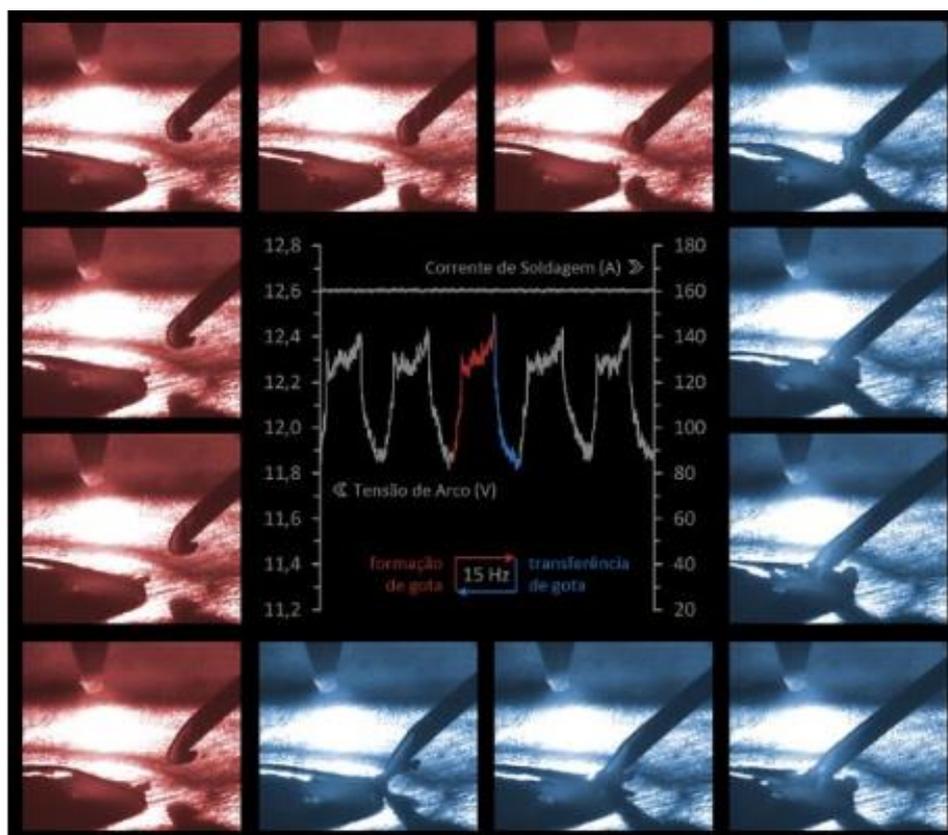


Fonte: Riffel KC, et al. (2019)

#### 4.4.3 Desenvolvimento e Avaliação de Técnicas para Pulsação da Alimentação de Arame em Soldagem a Arco

Jorge, et al desenvolveu dois protótipos para oscilação do arame e em seus ensaios com soldagem GTAW, registrou a tensão e corrente como demonstra a Figura 9. O trabalho demonstra que, em uma soldagem com oscilação de arame, há variações de tensão, quando há contato entre o arame e a poça de fusão e quando o mesmo sai da região do arco elétrico. Essa observação demonstra a possibilidade de realizar uma realimentação utilizando os picos de tensão para avançar e recuar o arame.

**Figura 9 - Transferência da gota e gráficos de tensão e corrente**



Fonte: JORGE et al. (2018)

## 5 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão apresentadas as informações referentes ao desenvolvimento do projeto.

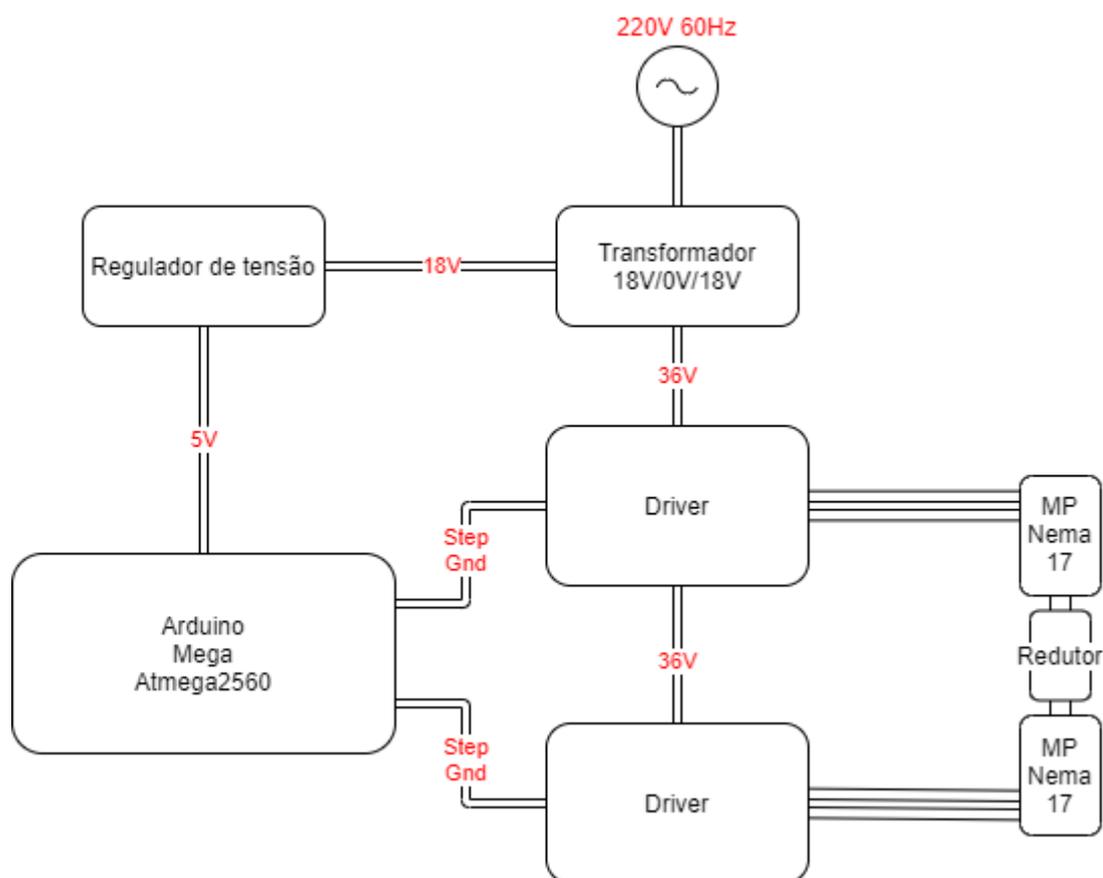
### 5.1 Componentes utilizados

Os componentes utilizados no presente trabalho foram:

- Redutor planetário;
- Placa de desenvolvimento Arduino Mega;
- Driver didático com CI L6208N;
- Transformador de 220V/18+18V-3A;
- Regulador de tensão 5V para o arduino;
- Motor de passo Nema 17 – KTC-42HS60-1704;

Na Figura 10 tem-se o diagrama dos componentes representando como os mesmos estão interligados e os principais sinais necessários para o funcionamento do equipamento. O driver utiliza o padrão Step/Dir, no entanto, como não há inversão no sentido de rotação, o sinal de Dir foi conectado direto ao Gnd, assim como o sinal de Enable.

**Figura 10 - Diagrama eletroeletrônico**



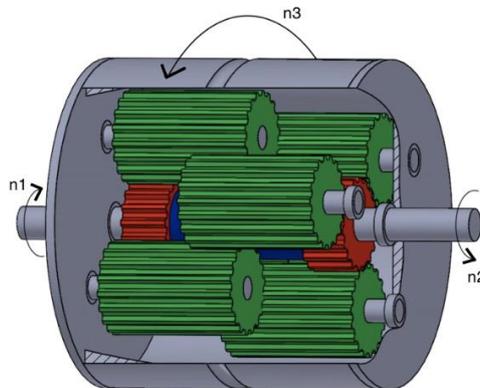
Fonte: Elaboração própria (2020)

### 5.1.1 O redutor planetário

O redutor planetário descrito nos capítulos anteriores é o elemento principal do sistema. O sistema diferencial de Bonacorso; Volker; Schiavi, (2018), Figura 11, permite a mudança de sentido do deslocamento do arame sem alterar o sentido de rotação dos motores, diminuindo assim os desgastes dessa operação. Segundo Volker (2020) e Resena Junior (2019) as relações de velocidade e torque no sistema são descritas pelas equações 1 e 2,

respectivamente. A equação da velocidade foi essencial para o desenvolvimento das etapas seguintes do trabalho.

**Figura 11 - Redutor planetário**



Fonte: Volker (2018)

$$n_3 = \frac{n_2 - n_1}{2} \quad (1)$$

$$T_3 = \frac{2 * [n_1 * T_1 + n_2 * T_2]}{n_2 - n_1} \quad (2)$$

No qual:

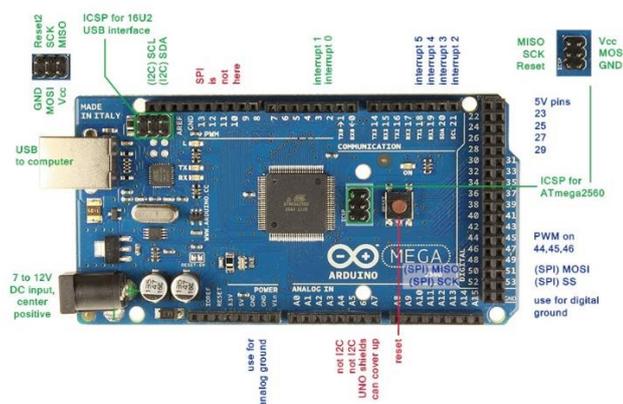
- $n_{1,2}$  = Rotação dos motores 1 e 2 (rps);
- $n_3$  = Rotação do tambor (rps);
- $T_{1,2}$  = Torque dos motores 1 e 2 (N.m);
- $T_3$  = Torque do tambor (N.m)

### 5.1.2 Arduino Mega – ATmega2560

A placa de desenvolvimento arduino mega, Figura 12, possui um microcontrolador ATmega2560, com os periféricos dispostos de modo a tornar a prototipagem mais simples e rápida. Além do módulo USART para comunicação serial, a placa dispõe de um regulador de tensão e um cristal oscilador de 16MHz.

A escolha do mesmo se deu pela familiaridade do autor com a linha ATmega e por possuir 3 ou mais temporizadores. A velocidade de processamento e a memória interna não foram avaliadas como críticas, portanto sabia-se que a escolha atenderia a tais critérios.

**Figura 12 - Arduino Mega**



Fonte: Internet (2020)

### 5.1.3 Driver didático

O driver em questão foi escolhido pois atendia aos critérios de corrente e tensão necessários para alimentar os motores. A alimentação do driver ocorre por meio de um transformador de 220V/18V+18V – 3A externo, sendo retificada por meio de uma ponte de diodos interna. Da fonte interna de cada driver obtém-se os 5Vcc regulados para a lógica do circuito integrado de potência L6208N e a tensão de aproximadamente 50 Vcc para a parte de potência deste CI que alimenta o motor de passo em modo corrente.

**Figura 13 - Driver didático**

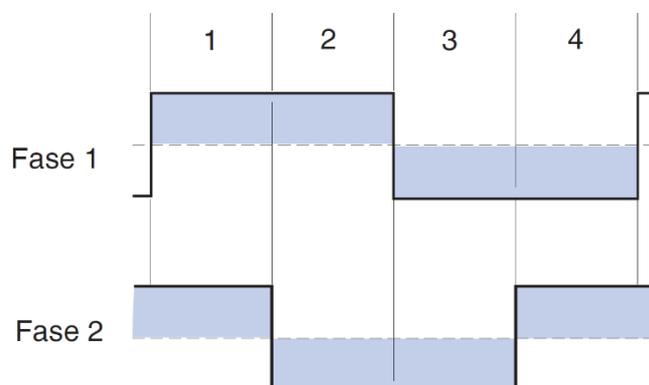


Fonte: Modificado de Bonacorso, et al (2008)

#### 5.1.4 Motor de passo

A tecnologia de motores de passo possui um bom custo benefício e fácil acionamento com controle de velocidade sem realimentação. Neste trabalho seu acionamento acontece por meio da alimentação alternante e com inversão de polaridade entre suas duas bobinas, no caso do motor bipolar escolhido. Ao enviar pulsos de onda quadrada ao driver, ele converte cada pulso nas etapas da Figura 14, que exemplifica a corrente nas bobinas do motor de passo, quando acionado em corrente.

**Figura 14 - Correntes nas fases com acionamento em passo pleno no modo corrente.**



Fonte: Parker Automation (2003)

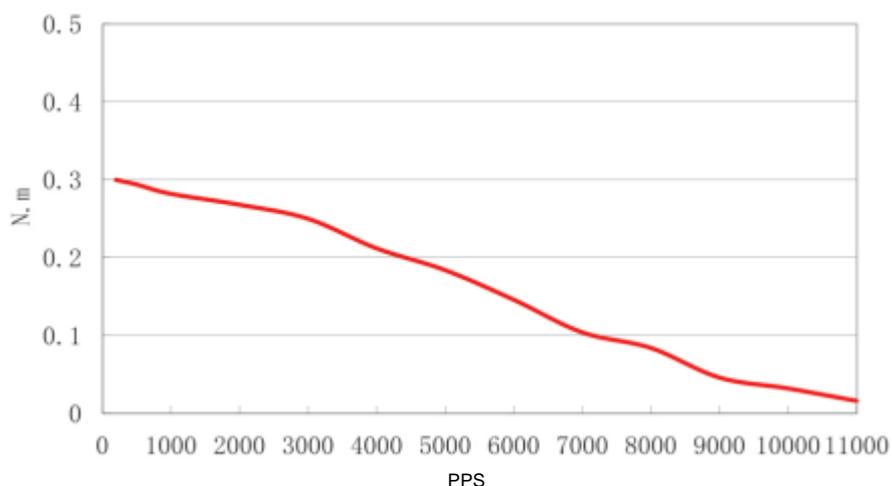
A seleção do motor Nema 17 – KTC-42HS40-1704, Figura 15, se deu pela sua compatibilidade dimensional com o projeto, possuindo uma massa de apenas 240g e um torque que atende a necessidade do projeto. A Figura 16 apresenta a curva de torque do motor. O mesmo operará entre 2000 PPS, pulsos por segundo, e 4000 PPS (1200 rpm), o que resultará em um torque entre 0,28 N.m e 0,20 N.m respectivamente.

**Figura 15 – Foto do motor de passo KTC-42HS40-1704**



Fonte: Kalatec (2020)

Figura 16 - Curva de torque do motor de passo KTC-42HS60-1704



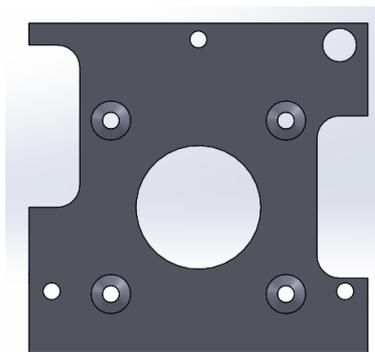
Fonte: Kalatec (2020)

## 5.2 Adaptações e reparos

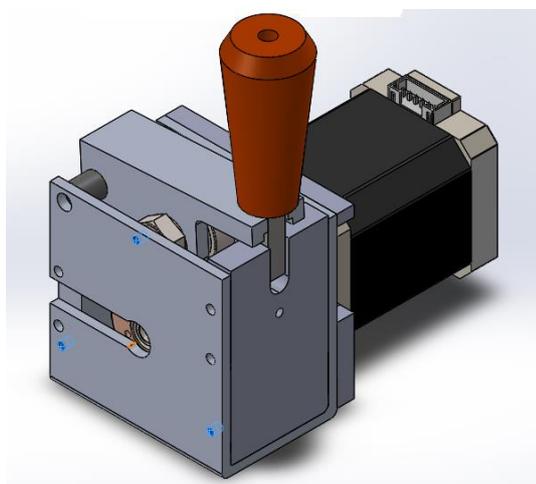
Algumas modificações na mecânica foram necessárias devido a diferenças entre os motores utilizados no trabalho de Resena Junior (2019), e os do presente trabalho. Não foram realizadas grandes modificações, tendo em vista que o protótipo teve sua mecânica desenvolvida com primazia. As alterações ocorreram somente nos suportes dos motores e nas engrenagens sol, que serão tratados individualmente em subcapítulos.

### 5.2.1 Suporte dos motores

Como o dispositivo desenvolvido e fabricado por Resena Junior (2019) utilizava motores de corrente contínua com escovas, com uma fixação distinta a requerida pelos novos motores Nema 17. Então, fez-se necessário fabricar novos suportes dos motores, como na Figura 17; Desenho técnico no anexo I. Também foi necessário furos para fixação do suporte na estrutura em “U”, os mesmo foram feitos em uma configuração triangular, devido à falta de espaço para o padrão de quatro pontos de apoio, como mostra a Figura 18 com os furos roscados em destaque.

**Figura 17 - Elemento de fixação dos motores**

Fonte: Elaboração própria (2020)

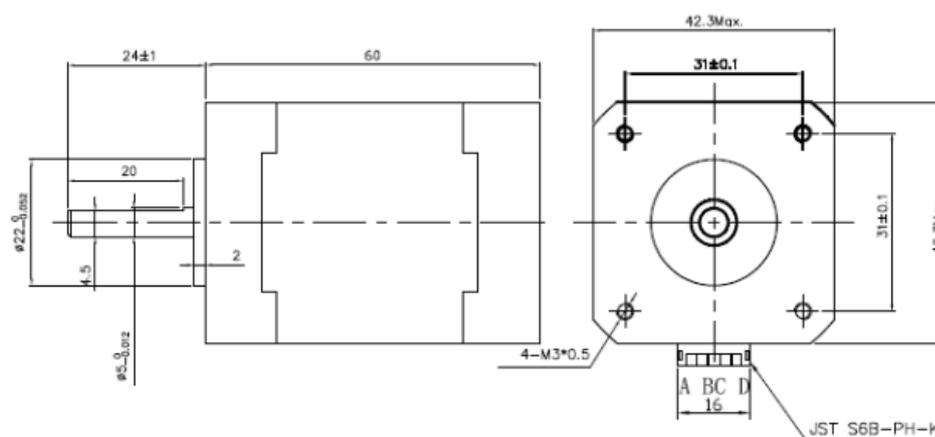
**Figura 18 - Mecanismo com furos de fixação em destaque**

Fonte: Elaboração própria (2020)

### 5.2.2 Engrenagens sol

No redutor planetário do dispositivo, as engrenagens sol são as entradas de rotação, sendo as mesmas acopladas diretamente no eixo dos motores. Os motores Nema 17 possuem seu eixo chanfrado, como mostra a Figura 19. Tendo isso em vista, as novas engrenagens sol, Figura 20, foram projetadas com a geometria negativa do eixo, possuindo o mesmo módulo (0,6mm) e número de dentes (12) de modo a garantir o acoplamento com as demais engrenagens do redutor.

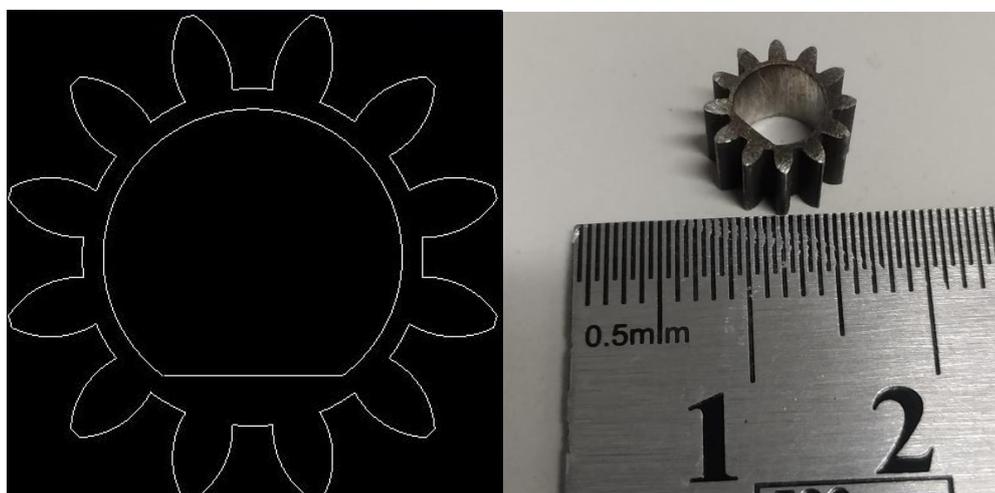
Figura 19 - Desenho técnico do motor de passo KTC-42HS60-1704



Fonte: Kalatec (2020)

O modelo da engrenagem foi obtido no SolidWorks®, tendo o furo modificado para o encaixe a geometria do eixo dos motores. O modelo foi exportado em DXF para geração do código G utilizado na usinagem na máquina de eletro erosão FW1U AgieCharmilles®. Foram realizadas duas usinagens no furo da engrenagem com o intuito de atingir um ajuste com leve interferência no acoplamento com os motores.

Figura 20 - Engrenagem sol



Fonte: Elaboração própria (2020)

De modo a impedir interferência dentro do redutor, o comprimento das engrenagens foi dimensionado para possuir no máximo 6,5mm. Com isso, utilizou-se uma materia prima de espessura de 12,5mm de aço inoxidável, então foi fabricada uma engrenagem longa que posteriormente foi cortada ao meio, resultando em 2 engrenagens de aproximadamente 6,1mm de

comprimento. Parte do comprimento foi perdida com a espessura do arame de corte de 0,18mm. Finalmente, as engrenagens foram acopladas nos motores, ajustadas na posição determinada no projeto e coladas com um vedante anaeróbico. Rolamentos para do redutor foram inseridos antes da fixação definitiva das engrenagens. Na Figura 21 é possível ver o resultado das engrenagens acopladas e os suportes dos motores fixadas aos mesmos.

**Figura 21 - Motores com elementos acoplados**

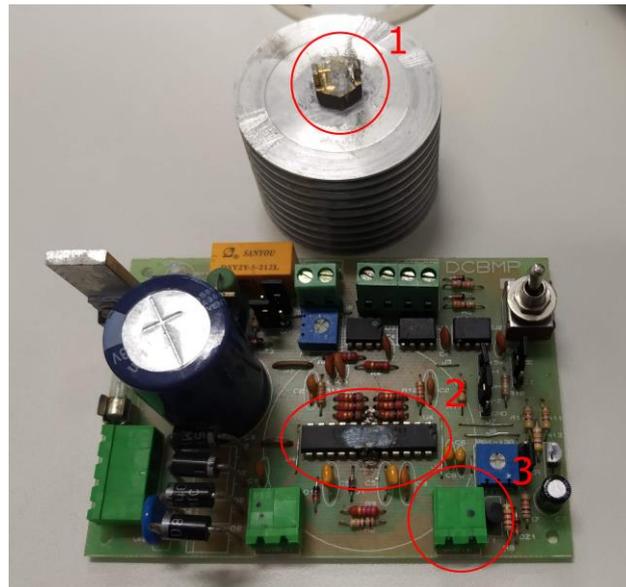


Fonte: Elaboração própria (2020)

### 5.2.3 Reparo no driver de acionamento

Dois problemas foram detectados no driver que estava sendo utilizado no desenvolvimento do projeto. O primeiro deles era uma folga no conector elétrico do motor de passo, elemento 3 da Figura 22. O mesmo foi ressoldado para retirar a folga. O outro problema encontrado estava na fixação do dissipador. A solda que fixava o elemento 1 no elemento 2, CI L6208N, havia rompido dos terminais 6,7 e 18,19. Para resolver foi necessário dessoldar o CI, soldar novamente os terminais ao dissipador e soldar novamente o CI à placa, como na Figura 23.

**Figura 22 - Reparos no driver de acionamento**



Fonte: Elaboração própria (2020)

**Figura 23 - Foto do dissipador soldado ao CI**



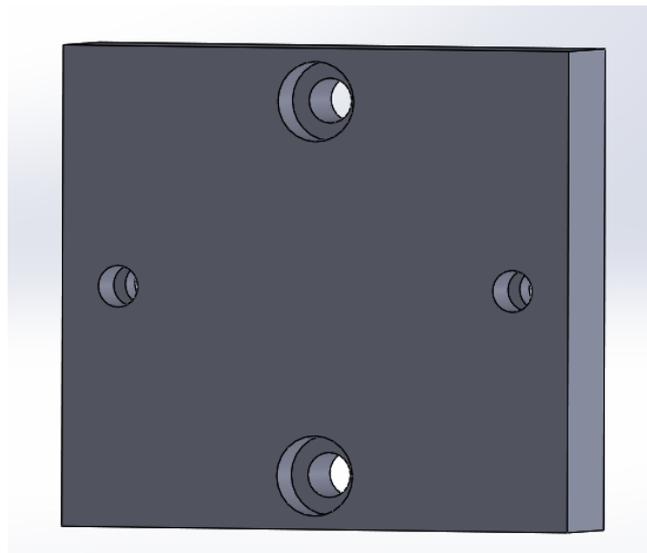
Fonte: Bonacorso, et al (2008)

#### 5.2.4 Acoplamento à tocha de soldagem

Com o dispositivo devidamente montado, o mesmo foi fixado a tocha por meio de um acoplamento fabricado por Volker (2018), Figura 24. Uma única peça em destaque na Figura 24 e isolada na Figura 25, que foi fabricada por meio de manufatura aditiva, para adaptar ao novo sistema.

**Figura 24 - Acoplamento do mecanismo na tocha**

Fonte: Elaboração própria (2020)

**Figura 25 - Peça de fixação na tocha**

Fonte: Elaboração própria (2020)

### 5.3 Acionamento

O método de acionamento busca produzir um movimento de avanço controlado e recuo repentino no arame. Para isso, idealizou-se o método da Figura 26, que tem seus estágios divididos em períodos. Do instante  $t_0$  ao  $t_3$ , ocorre o avanço do arame. Do instante  $t_3$  ao  $t_5$  ocorre o recuo do arame e entre os instantes  $t_5$  e  $t_6$  o arame mantém-se parado. Todas as rampas de velocidade

do arame possuem a mesma duração e, portanto, a mesma aceleração ou desaceleração.

Na primeira parte do gráfico da Figura 26 mostra-se o movimento oscilante do arame com velocidade média nula, isto é, a área de avanço do arame no intervalo  $t_0 - t_3$  é igual à área de retorno do arame do intervalo  $t_3 - t_5$ . Já a parte intermediária deste gráfico apresenta uma velocidade média de arame maior que zero, enquanto que a parte final mostra a velocidade média máxima do arame.

**Figura 26 - Método de acionamento do arame.**

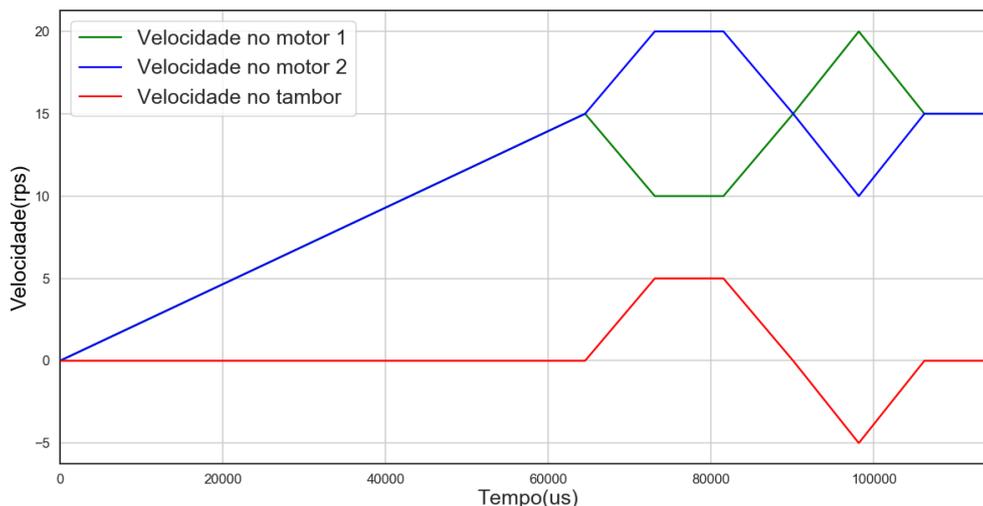


Fonte: Elaboração própria (2020)

### 5.3.1 Acionamento dos motores

De modo a obter o movimento do arame da Figura 26, implementou-se uma estratégia para acionamento dos motores de passo. Com base na equação 1 que descreve a relação de transmissão de velocidade, calculou-se a velocidade para cada estágio do ciclo. Na Figura 27 tem-se o acionamento calculado para ser aplicado aos motores, na qual implementou-se uma rampa de velocidade mais suave em ambos os motores de modo a evitar a movimentação do arame no início do funcionamento do mecanismo de oscilação.

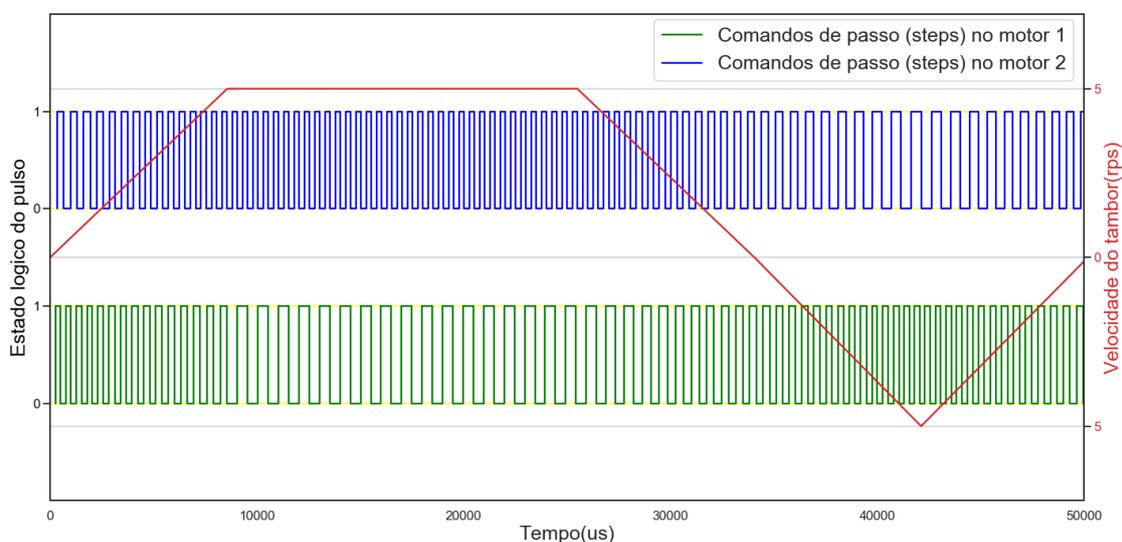
**Figura 27 - Acionamento dos motores e resultado esperado no tambor**



Fonte: Elaboração própria (2020)

Na Figura 28 simulou-se como deveria ocorrer a geração dos pulsos, comandos de passo (steps) para os motores de passo, para as situações de avanço e de recuo no ciclo de funcionamento.

**Figura 28 - Velocidade do tambor e pulsos aplicados nos motores**



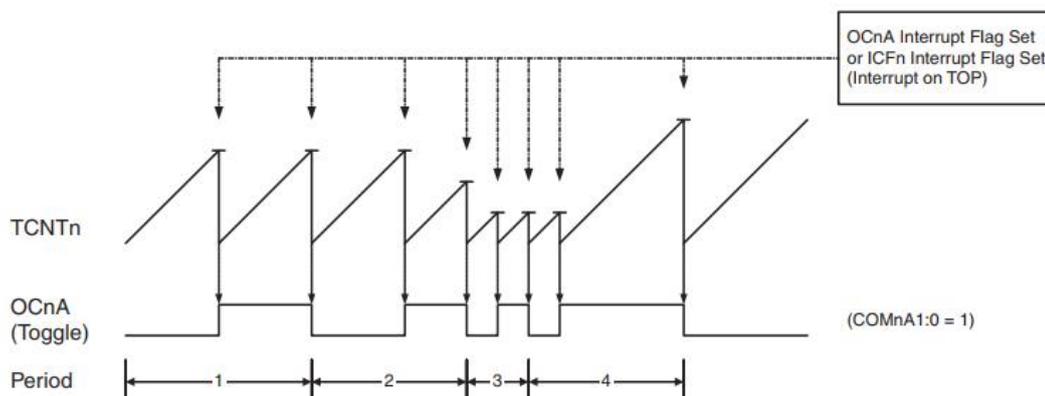
Fonte: Elaboração própria (2020)

### 5.3.2 Geração dos passos

A geração de pulsos neste projeto foi tratada como crítica devido a necessidade de se extrair o máximo de desempenho dos motores de passo. De modo a evitar atrasos nos sinais de comandos do microcontrolador, e diminuir

a complexidade do fluxo de funcionamento, os pulsos foram gerados com dois temporizadores de 16bits em modo CTC, *clear timer on compare*, realizando as operações de comparação de frequência por meio de hardware. O modo CTC disponibiliza um registrador de 16bits para determinar o valor da comparação com o timer que é incrementado até a comparação resultar verdadeira. A comparação verdadeira complementa o bit de saída da porta de geração de pulso (sinal de step do motor), possuindo uma porta de saída específica pré-configurada. A Figura 29 exemplifica o funcionamento do timer acima descrito.

**Figura 29 - Diagrama de funcionamento do temporizador em modo CTC**



Fonte: Adaptado de ATMEL (2014)

A equação 3 permite calcular a frequência para um determinado valor de  $OCRnA$ . Com a mesma, podemos derivar a equação 4 e assim determinar qual valor deve ser escrito no registrador  $OCRnA$  em relação a frequência desejada.

$$f_{OCnA} = \frac{f_{clk}}{2 * N * (1 + OCRnA)} \quad (3)$$

No qual:

- $f_{OCnA}$  = Frequência resultante (Hz);
- $f_{clk}$  = Frequência do clock do microcontrolador (Hz);
- $N$  = Preescaler;
- $OCRnA$  = Registrador definível.

Com o clock do microcontrolador igual a 16MHz, o preescaler configurado como 8, tem-se que o valor do registrador é proporcional ao inverso da frequência desejada.

$$OCRnA = \frac{f_{clk}}{2 * N * f_{OCnA}} - 1 = \frac{16 * 10^6}{2 * 8 * f_{OCnA}} - 1 = \frac{1 * 10^6}{f_{OCnA}} - 1 \quad (4)$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (5)$$

$$OCRnA = T_{OCnA} - 1 \quad (6)$$

No qual:

- $T_{OCnA}$  = Período de OCnA (us).

Manipulando a equação 4 pela relação entre período e frequência da equação 5, obtém-se que o valor do registrador equivale ao período da clock gerado, equação 6. Simplificando, assim, a lógica implementada na geração dos pulsos.

Com a geração dos pulsos em frequências fixas desenvolvida, foi necessário criar uma abordagem para alterar a frequência de modo a produzir uma aceleração. Para isso, utilizou-se da interrupção gerada pela comparação, modificando o registrador que determina o período, OCRnA, assim que atingia o valor determinado e a contagem se reiniciava. Os valores calculados por meio da equação 9 foram dispostos em uma lista e iterados a cada pulso produzido, gerando a aceleração desejada.

$$s(i) = 0.005 * i \quad (7)$$

$$T(i) = \sqrt{\frac{2 * (s(i) - s_i)}{a}} \quad (8)$$

$$P(i) = (T(i) - T(i - 1)) * 1000000, \text{ onde } T(0) = 0 \quad (9)$$

No qual:

- $s(i)$  = Posição final do rotor no índice  $i$ , considerando um motor com 200 pulsos por revolução;
- $s_i$  = Posição inicial do rotor do motor;

- $a$  = aceleração desejada;
- $T(i)$  = Tempo total para deslocar de  $s_i$  até  $s(i)$  (s);
- $P(i)$  = Valor a ser utilizado no registrador, correspondente ao período do pulso (us);

O fluxograma do apêndice B demonstra toda a lógica de aceleração.

## 5.4 Mecanismo em malha aberta

Com base nos produtos TIPTIG® e TIGSpeed®, optou-se em atingir, em malha aberta, uma frequência de oscilação de aproximadamente 20Hz.

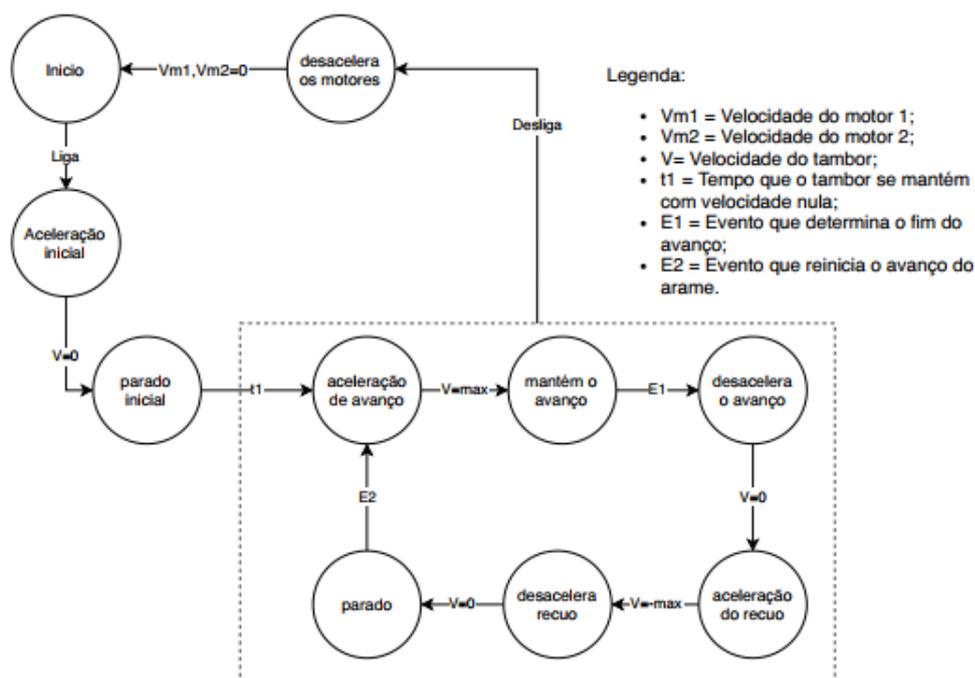
### 5.4.1 Método de acionamento

Para o devido funcionamento, foi desenvolvido o método de acionamento descrito na Figura 26. O objetivo do método de acionamento projetado é garantir o avanço e recuo do arame por meio das características de redução do redutor planetário e respeitando as características dos motores de passo.

### 5.4.2 Firmware

De modo a reproduzir o método de acionamento descrito anteriormente, foi desenvolvido um firmware em C++ na plataforma de desenvolvimento Atmel Studio 7. A sequência de funcionamento do firmware está descrito na máquina de estados da Figura 30, na qual o evento que determina o fim do avanço,  $E1$ , e o tempo que determina o reinício do avanço,  $E2$ , são dois temporizadores com tempos fixados de modo a produzir 20Hz.

Figura 30 - Máquina de estados do firmware



Fonte: Elaboração própria (2020)

### 5.4.3 Funcionamento esperado

Para comparação com os resultados dos ensaios que serão apresentados, esse capítulo tratará do funcionamento esperado do dispositivo.

#### 5.4.3.1 Deslocamento

Por meio das equações do MU, movimento uniforme, e do MUV, movimento uniformemente variado é possível descrever como ocorrerá o deslocamento. As equações 10, 11 e 12 descrevem o deslocamento do tambor, respeitando as condições descritas abaixo.

$$S_1(t_1) = \frac{a_1 * t_1^2}{2} \quad (10)$$

$$S_2(t_2) = S_1(t_{1f}) + V * t_2 \quad (11)$$

$$S_3(t_3) = S_2(t_{2f}) + V * t_3 + \frac{a_2 * t_3^2}{2} \quad (12)$$

De tal modo que os valores de  $t_1, t_2, t_3$  e  $k$  respeitem às seguintes condições:

Para o avanço:

- $50251 * k \leq t_1 \leq 8567 + 50251 * k$ ;
- $8567 + 50251 * k < t_2 \leq 17222 + 50251 * k$ ;
- $17222 + 50251 * k < t_3 \leq 25125 + 50251 * k$ ;
- $a_1 = 584$ ;
- $a_2 = -584$ ;
- $t_{1f} = 8567 + 50251 * k$ ;
- $t_{2f} = 17222 + 50251 * k$ ;

Para o recuo:

- $50251 * k + 25125 \leq t_1 \leq 33692 + 50251 * k$ ;
- $33692 + 50251 * k < t_2 \leq 42347 + 50251 * k$ ;
- $42347 + 50251 * k < t_3 \leq 50251 + 50251 * k$ ;
- $a_1 = -584$ ;
- $a_2 = 584$ ;
- $t_{1f} = 33692 + 50251 * k$ ;
- $t_{2f} = 42347 + 50251 * k$ ;

Em ambos:

- $\forall k \in Z_+$ ;

No qual:

- $S_n$  = Deslocamento (rot);
- $a_n$  = Aceleração (rps<sup>2</sup>);
- $t_n$  = Tempo (s);
- $V$  = Velocidade máxima do tambor, correspondente à 5rps;

O resultado do deslocamento das equações 10, 11 e 12 tem como unidade rps, rotações por segundo. No entanto, é mais interessante convertê-lo em deslocamento linear, que ocorrerá no arame. Para tal, utiliza-se a equação 13.

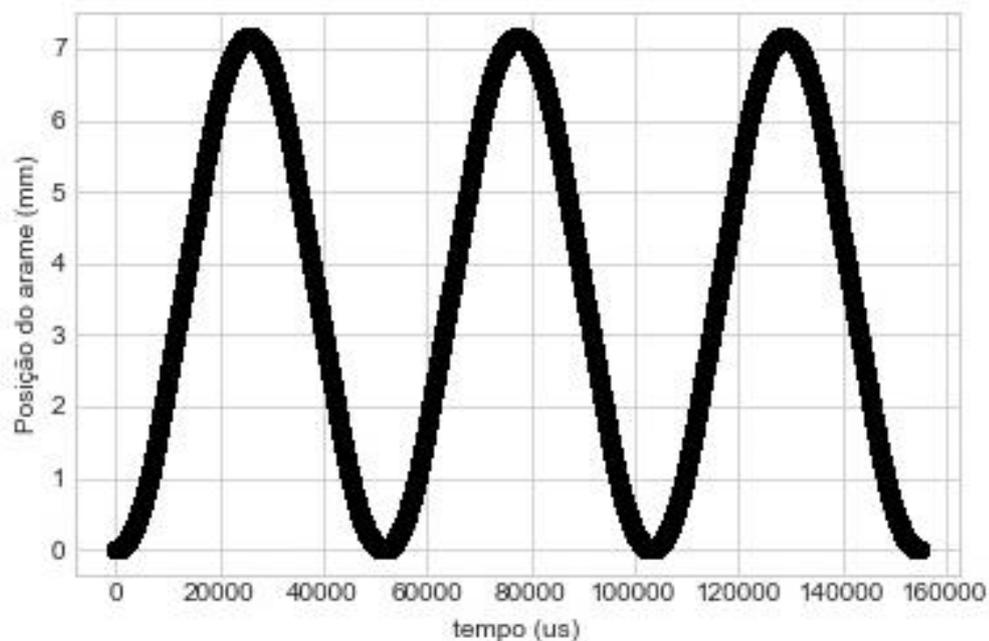
$$S_{linear} = S_{rotação} * \pi * D \quad (13)$$

No qual:

- $S_{linear}$  = Deslocamento linear (mm);
- $S_{rotação}$  = Deslocamento em rotações (rot);
- $D$  = Diâmetro do tambor (mm);

Considerando um deslocamento nulo do arame, ou seja, o avanço e recuo do arame duram o mesmo período, 25 ms, o deslocamento do arame teria um comportamento como o descrito na Figura 31.

**Figura 31 – Posição do arame com deslocamento nulo**



Fonte: Elaboração própria (2020)

Para a operação com avanço de arame, como descrita na Figura 26, a equação 11 não se aplica ao recuo, haja vista que deseja-se que o recuo ocorra somente com as rampas de aceleração e desaceleração.

#### 5.4.3.2 Velocidade de alimentação do arame

A velocidade de alimentação do arame dependerá exclusivamente do tempo que será mantido em estágio de avanço com velocidade constante. Portanto, a equação 14 descreve a velocidade de alimentação do arame.

$$V_a = n_p * t_p * V_r * n_c * 60 * \pi * D \quad (14)$$

No qual:

- $V_a$  = Velocidade de alimentação (m/min);
- $n_p$  = Número de pulsos;
- $t_p$  = Duração de um pulso, 504us;
- $V_r$  = Velocidade de rotação do tambor (rps);
- $n_c$  = Número de ciclos, 20;
- $D$  = Diâmetro do tambor, 26,5mm.

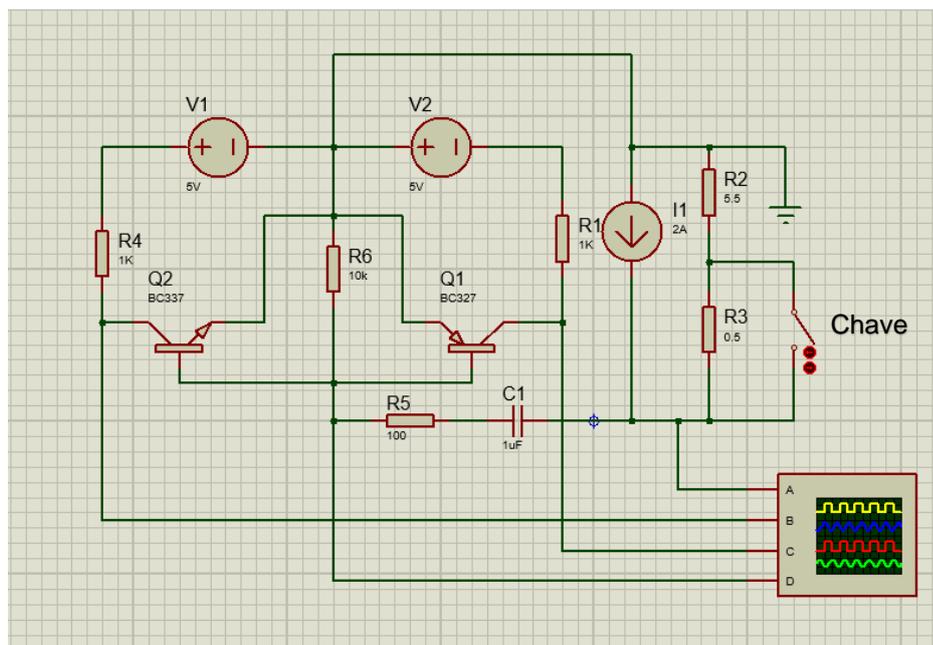
## 5.5 Sensor de realimentação

Observando os resultados de Jorge et al (2018) com a fonte de soldagem operando em modo corrente, chegou-se à conclusão de que a DDP, diferença de potencial do arco elétrico, entre o eletrodo e a peça reflete o posicionamento do arame em relação a poça de fusão. Se tratando de um condutor, a introdução do arame na região do arco elétrico modifica a impedância existente entre o eletrodo e a peça, causando uma queda abrupta da tensão do arco quando o arame entra em contato com a poça de fusão, como demonstra a Figura 9.

A variação de DDP é muito pequena para ser medida diretamente por um microcontrolador, além do fato do circuito principal ser uma fonte de corrente, e realizar a medição diretamente produziria uma tensão muito elevada devido à alta impedância na entrada do microcontrolador. Se tratando de uma variação de tensão em baixa frequência, avaliou-se que a introdução de um circuito passa alta poderia detectar a variação e acionar um transistor, de modo a aumentar a tensão o suficiente para acionar uma interrupção em uma das portas do microcontrolador.

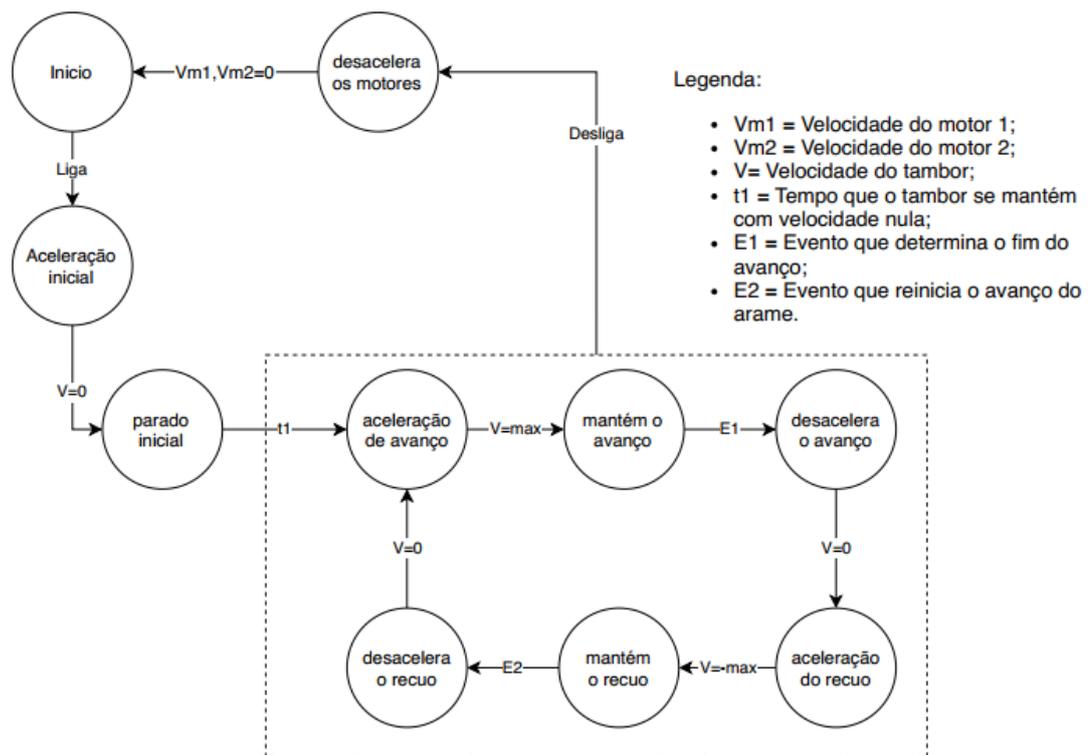
Dessa maneira, projetou-se um circuito RC, resistor-capacitor, de modo a acionar dois transistores, um para detectar o instante no avanço em que ocorre o contato do arame com a poça de fusão e outro para detectar o instante no recuo em que o arame sai da poça de fusão. Na Figura 32 tem-se o esquemático da simulação do sensor no Proteus®. A simulação possui algumas alterações em relação à situação real, haja vista que os simuladores consideram uma impedância para as chaves. Por isso utilizou-se uma fonte de corrente de apenas 2A e um divisor de tensão com resistências calculadas para produzir a mesma diferença de potencial registrada no trabalho de Jorge et al (2018). Simulando o contato do arame com a poça de fusão por meio da chave na Figura 32, utilizou-se o osciloscópio do simulador para produzir os sinais elétricos da Figura 34. O canal A representa a variação da tensão entre a poça de fusão e o eletrodo de tungstênio, enquanto que o canal D representa essa variação de tensão após o filtro passa alta. Por sua vez, esse sinal do canal D alimenta os circuitos das bases de ambos os transistores: um do tipo NPN e outro do tipo PNP. Na sequência, os canais B e C representam respectivamente as tensões de coletores do transistor NPN e do PNP. Nestes canais C e B nota-se uma variação de tensão de 5 volts com duração suficiente para acionar interrupções no microcontrolador e realizar a função dos eventos E1 e E2 da máquina de estados da Figura 33.

**Figura 32 - Esquemático da simulação do sensor**



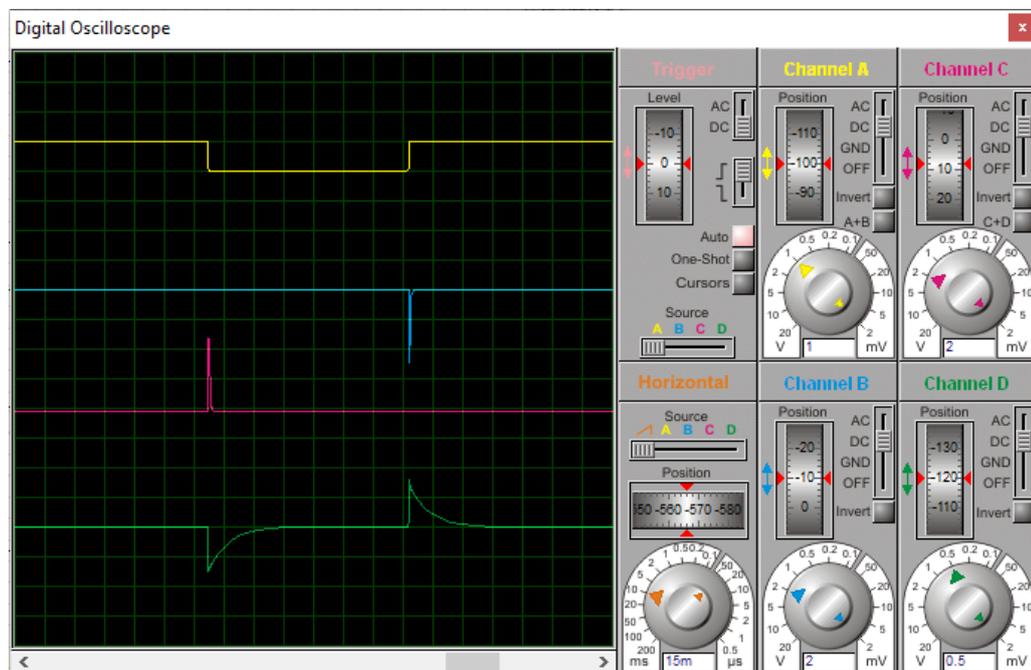
Fonte: Elaboração própria (2020)

Figura 33 - Fluxograma do firmware para controle do recuo



Fonte: Elaboração própria (2020)

Figura 34 - Osciloscópio da simulação



Fonte: Elaboração própria (2020)

## 6 RESULTADOS

Após o acoplamento dos novos motores ao mecanismo, alguns ensaios foram realizados para assegurar que o funcionamento estava ocorrendo como o previsto.

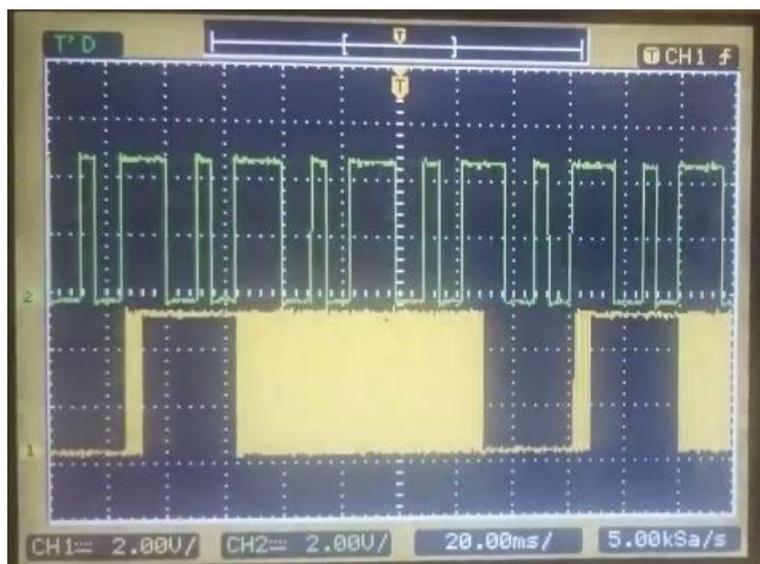
### 6.1 Ensaios iniciais

De modo a testar a geração de pulsos e comprovar a frequência do ciclo, foi utilizado um osciloscópio. As medições realizadas auxiliaram na resolução de problemas e a alcançar o resultado desejado.

#### 6.1.1 Problemas com a primeira versão do firmware

A primeira versão do firmware buscava modificar o período do pulso por meio de outro temporizador, todavia isso não funcionou como esperado, pois o registrador OCRnA era modificado fora de sincronismo com o contador TCTn, presentes na Figura 29. Esse assincronismo fazia com que o temporizador só estourasse no próximo ciclo de contagem, produzindo os sinais de steps de forma equivocada, como mostra o canal 1 do osciloscópio na Figura 35.

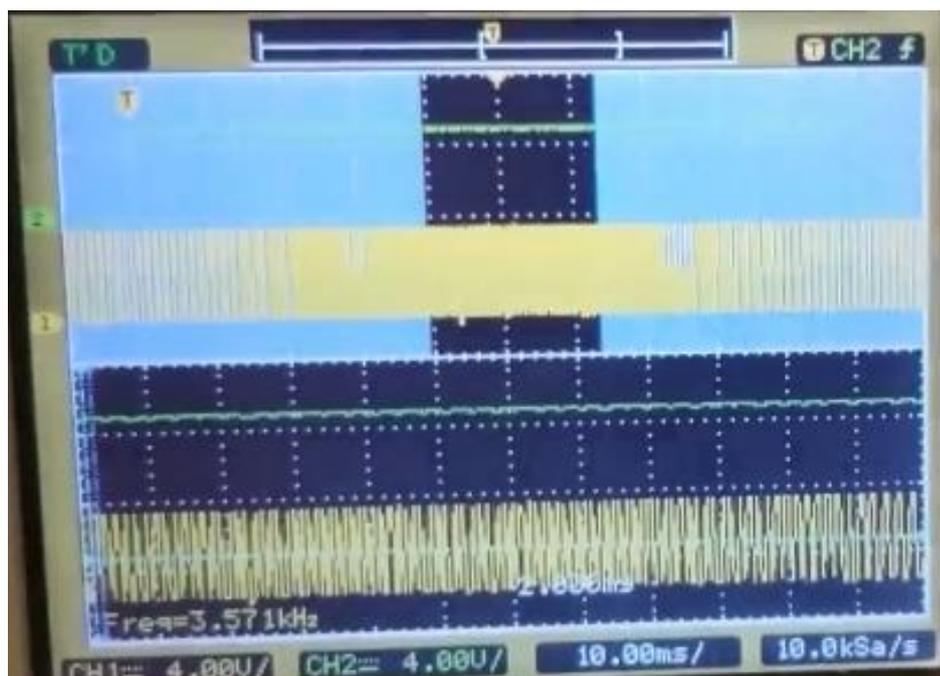
**Figura 35 - Pulsos de comando inadequados**



Fonte: Elaboração própria (2020)

Após chegar à conclusão do que estava produzindo o problema, a lógica de alteração do registrador foi modificada como explicada no Capítulo 5.3.2. Com isso, o comportamento dos pulsos passou a funcionar como esperado, como demonstra a Figura 36, na qual o canal 2 representa os pulsos gerados para acionamento do motor 1. A frequência obtida no canal 1 não representa o valor de frequência no estágio de avanço contínuo, mas uma média de toda a onda, visível na tela.

**Figura 36 - Ciclo no motor 1.**



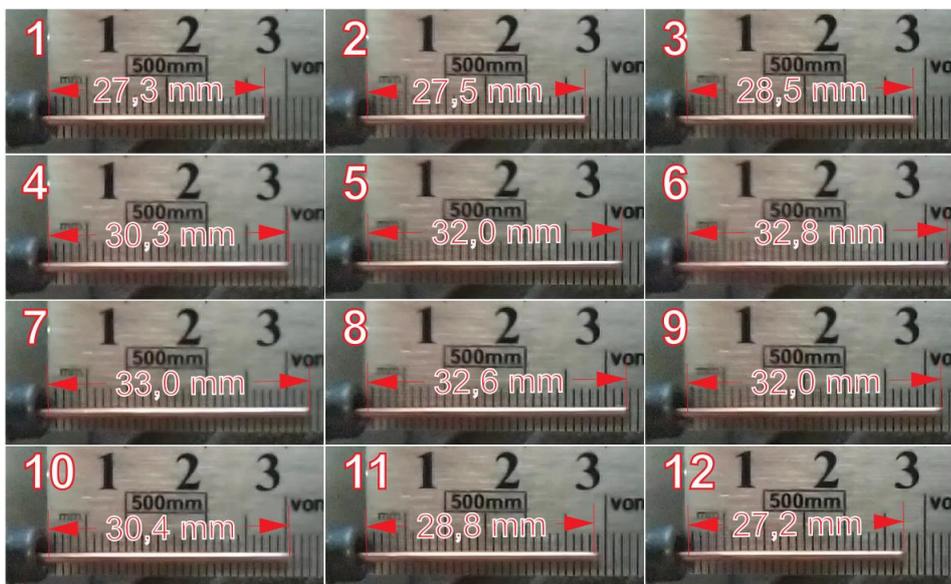
Fonte: Elaboração própria (2020)

## 6.2 Ensaio com deslocamento nulo

Para modificar o firmware com o intuito de produzir um deslocamento nulo no arame bastava modificar o firmware de modo que o tempo em velocidade constante também pudesse ser controlado no recuo do arame, como mostra o fluxograma da Figura 33. No qual, para um deslocamento nulo, E2 deve ser acionado por um temporizador com o mesmo atraso de E1. Para manter a frequência de 19,9Hz, estipulou-se o valor de E1 e E2 como 8655us. De modo a atingir a frequência acima citada, respeitando os limites dos motores de passo, as rampas de aceleração e desaceleração tem duração de 8235us.

Implementando o firmware acima descrito, foi realizada a filmagem do deslocamento do arame com uma câmera com 240fps, frames por segundo, podendo capturar até 12 imagens por ciclo. Utilizando um anteparo milimetrado, obteve-se os frames apresentados na Figura 37.

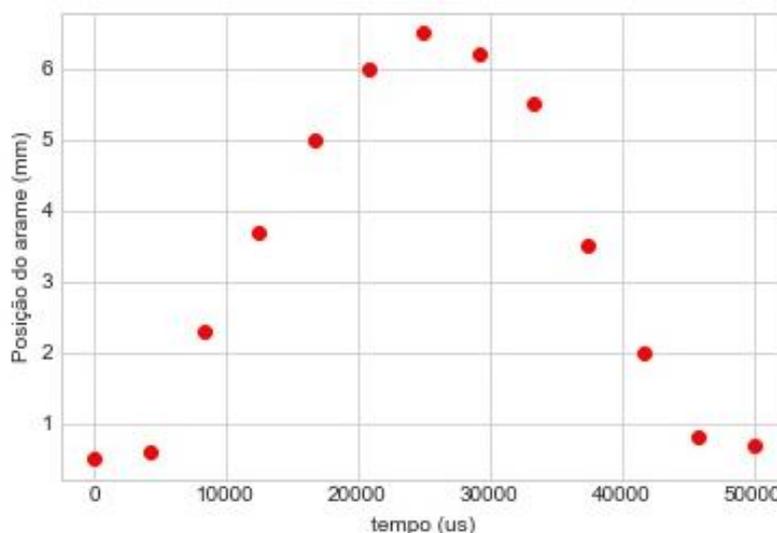
**Figura 37 - Frames capturados do deslocamento do arame**



Fonte: Elaboração própria (2020)

Utilizando as dimensões extraídas na Figura 37, e utilizando 26.5mm como 0mm, foi produzido o gráfico da Figura 38. O valor de 26,5mm foi utilizada para ajustar o gráfico na comparação apresentadas a seguir. Durante toda a gravação chegou-se a uma amplitude máxima de aproximadamente 6mm.

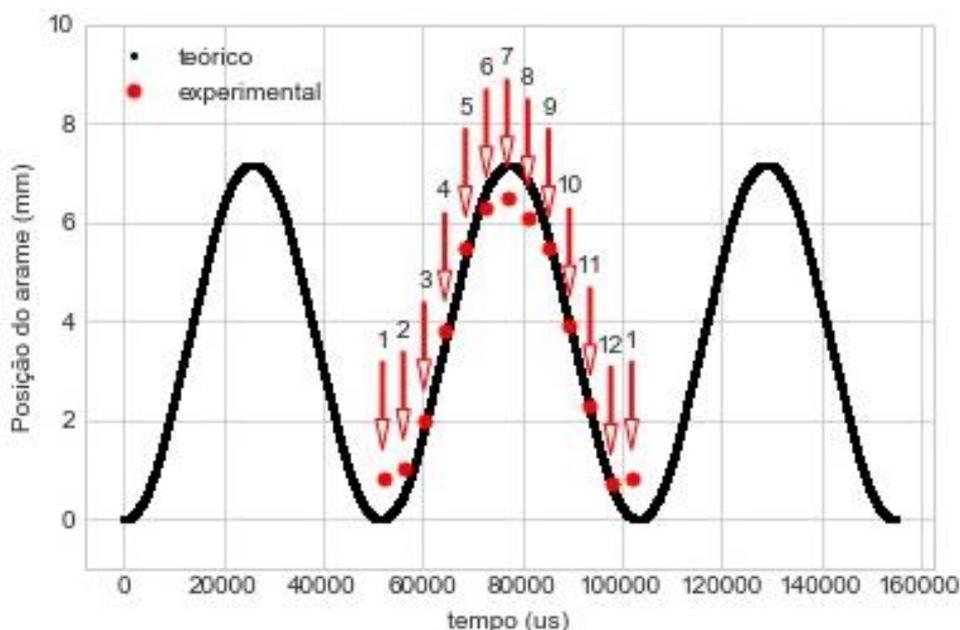
**Figura 38 - Deslocamento do arame**



Fonte: Elaboração própria (2020)

Inserindo os pontos experimentais no gráfico da Figura 31, com pequenos ajustes na amplitude e tempo inicial, tem-se o gráfico da Figura 39. Nele observa-se que o deslocamento está ocorrendo como o esperado. Algumas folgas na transmissão e atrasos no tempo de resposta dos motores de passo eram esperados. Todavia, o método de ensaio utilizado limitou a aquisição de informações mais precisas, devido a amostragem de apenas 12 pontos e a baixa resolução na estimativa do deslocamento.

**Figura 39 - Deslocamento teórico e experimental**



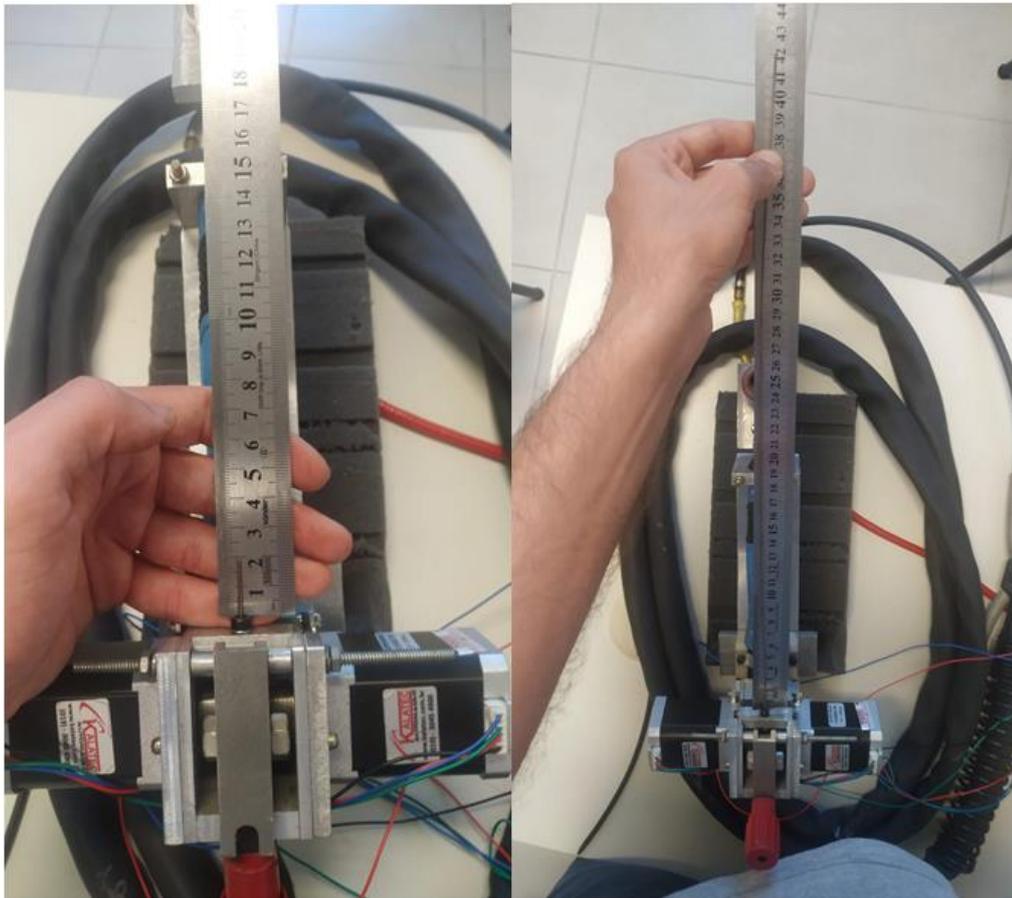
Fonte: Elaboração própria (2020)

### 6.3 Ensaio de velocidade do arame

Um dos parâmetros essenciais na soldagem GTAW automatizada é a velocidade do arame. Portanto, realizou-se um ensaio de deslocamento do arame incrementando o número de pulsos de avanço, desta vez, utilizando o firmware da Figura 30.

O ensaio consistiu em alterar o número de pulsos no avanço de modo a aumentar o deslocamento total do arame, acionando o dispositivo por 60 ciclos, aproximadamente 3 segundos. Foram realizados 3 ensaios com cada alteração de 1 a 34 pulsos de avanço. A Figura 40 exemplifica o ensaio realizado com 33 pulsos de avanço. No apêndice A tem-se os dados coletados no ensaio.

Figura 40 - Exemplo do ensaio de avanço do arame.



Fonte: Elaboração própria (2020)

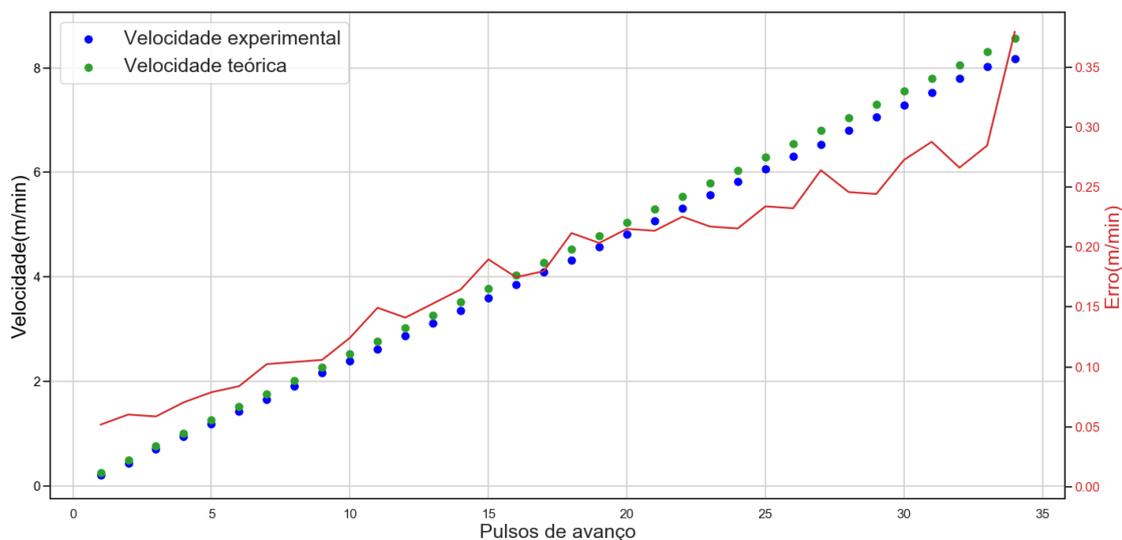
Os resultados foram então registrados e por meio da equação 15, obteve-se a velocidade de cada caso sendo apresentados na Figura 41, em comparação com a velocidade teórica, resultante da equação 14. É possível notar um comportamento linear com um pequeno desvio do resultado teórico.

$$V_m = \frac{S_m * 60}{n_c * 5,025 * 10^{-2}} \quad (15)$$

No qual:

- $V_m$  = Velocidade de média do arame (m/min);
- $S_m$  = Deslocamento médio (mm);
- $n_c$  = Número de ciclos;

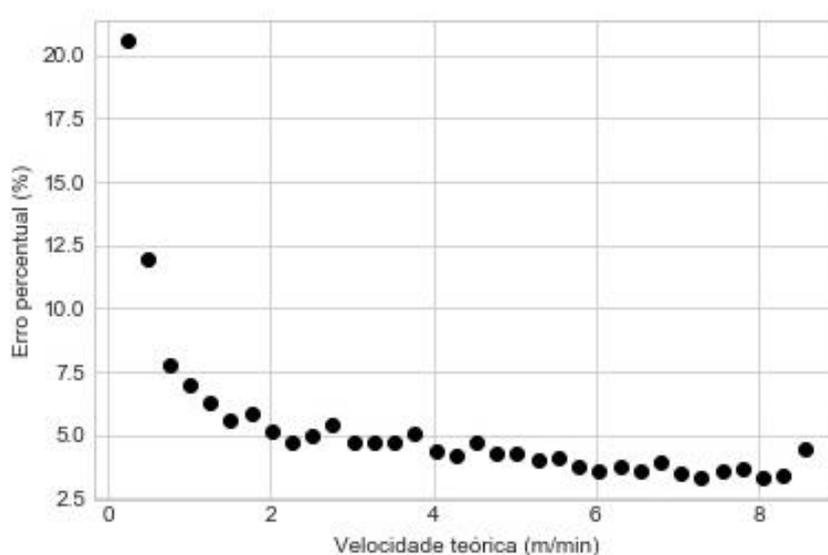
**Figura 41 - Velocidade do arame teórico, experimental e erro**



Fonte: Elaboração própria (2020)

De forma a avaliar o erro encontrado, foi criado o gráfico da Figura 42, com o erro percentual em cada uma das velocidades encontradas. Nota-se que o erro diminui à medida que a velocidade aumenta, haja vista que as folgas se tornam menos relevantes em maiores deslocamentos. Nas velocidades que deseja-se utilizar o dispositivo, entre 8 e 2 m/min, o erro fica entre 3,3 e 5,5% respectivamente.

**Figura 42 - Erro percentual da velocidade experimental**



Fonte: Elaboração própria (2020)

#### 6.4 Dispositivo na tocha

Com o dispositivo acoplado à tocha, como na Figura 24, foi registrado o avanço e recuo do arame em câmera lenta e obteve-se os frames da Figura 43. Nota-se que a amplitude alcançada é suficiente para retirar o arame da zona do arco elétrico. Aplicando o mesmo comando do ensaio de deslocamento nulo.

**Figura 43 - Arame recuado e avançado**



Fonte: Elaboração própria (2020)

## 7 CONCLUSÃO

Os resultados dos ensaios iniciais e com a câmera lenta provam que o funcionamento do mecanismo está ocorrendo como esperado. Devido a folgas inerentes de mecanismos com engrenagens, foram registrados erros inferiores a 6% nas velocidades de avanço de arame dentro da faixa de utilização do sistema, como demonstra o ensaio de velocidade de arame.

Infelizmente, o trabalho foi encerrado devido à paralisação das atividades presenciais no instituto em função do Covid-19, que ocorreu nas primeiras semanas de abril. A paralisação das atividades impediu a realização de mais ensaios, incluindo ensaios de soldagem, ensaios estes essenciais para a conclusão do funcionamento do mecanismo. Além dos ensaios com o dispositivo em malha aberta, também não foi possível testar o conceito do sensor de realimentação, tão pouco fabricar um protótipo e realizar um ensaio de soldagem.

Todavia, como citado anteriormente, os ensaios realizados atestam o funcionamento necessário para uma soldagem apropriada do mecanismo em malha aberta. Principalmente o controle e previsibilidade da velocidade de arame, parâmetro fundamental para uma soldagem adequada.

Como recomendação para trabalhos futuros, é essencial realizar os ensaios de soldagem para verificar o bom funcionamento do dispositivo em meio ao ambiente de soldagem. Também é importante fabricar e testar o funcionamento do sistema de realimentação.

## 8 Referências

VOLKER, S. et al. **Proposta de um sistema de transmissão diferencial de velocidades para alimentação oscilatória do material de adição na soldagem**. XLIVCONSOLDA, Congresso nacional de soldagem, setembro de 2018, Uberlândia MG.

RESENA JUNIOR, V. **Sistema de Alimentação Oscilatória do Arame para o Aumento do Desempenho dos Processos de Soldagem a Arco**. Trabalho de conclusão de curso, julho de 2019, Florianópolis, SC.

BONACORSO, N. G.; VOLKER, S.; SCHIAVI, R. C. M. **Sistema de transmissão de velocidades e método de acionamento**. INPI BR 1020180034219, 2018.

ESAB. **Revista Solução – ESAB 100 anos**. Disponível em: [http://www3.esab.com.br/revista\\_solucao\\_200505.pdf](http://www3.esab.com.br/revista_solucao_200505.pdf) Acesso em: Março de 2020

FRONIUS. **CMT**. Disponível em: <<https://www.fronius.com/pt-br/brasil/tecnologia-de-soldagem/competencias/processos-de-soldagem/cmt>>. Acesso em: Abril de 2020.

TIPTIG. **TIPTIG**. Disponível em: < <https://tiptig.com/>>. Acesso em: Abril de 2020.

Gonçalves e Silva RH, Correa Riffel K, Pompermaier Okuyama M, Dalpiaz G, **Effect of Dynamic Wire in the GTAW Process**, Journal of Materials Processing Tech. (2019), <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.01.033>

Riffel KC, Silva RHG, Dalpiaz G, Marques C, Schwedersky MB. **Keyhole GTAW with dynamic wire feeding applied to orbital welding of 304L SS pipes**. Soldagem&Inspeção.2019;24:e2418. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI24.18>

JORGE, V. et al. **Desenvolvimento e avaliação de técnicas para pulsação da alimentação de arame em soldagem a arco.** Soldagem e Inspeção, agosto 2018. Uberlândia MG.

Programa de Pós-graduação *Stricto Sensu* em Mecatrônica. **Diretrizes de Estruturação do Documento de Projeto de Dissertação de Mestrado – PDM**, 2010. Página da internet:, em Inscrições e Informes, Formulários.

Parker Automation, **Tecnologia Eletromecânica, Apostila 1600.231.01 BR**, outubro de 2003. Disponível em: <http://www.extranetparker.com.br/download/automation/eletromecanica/pdf/eletromecanica.pdf>. Acesso em: 27 de março de 2008

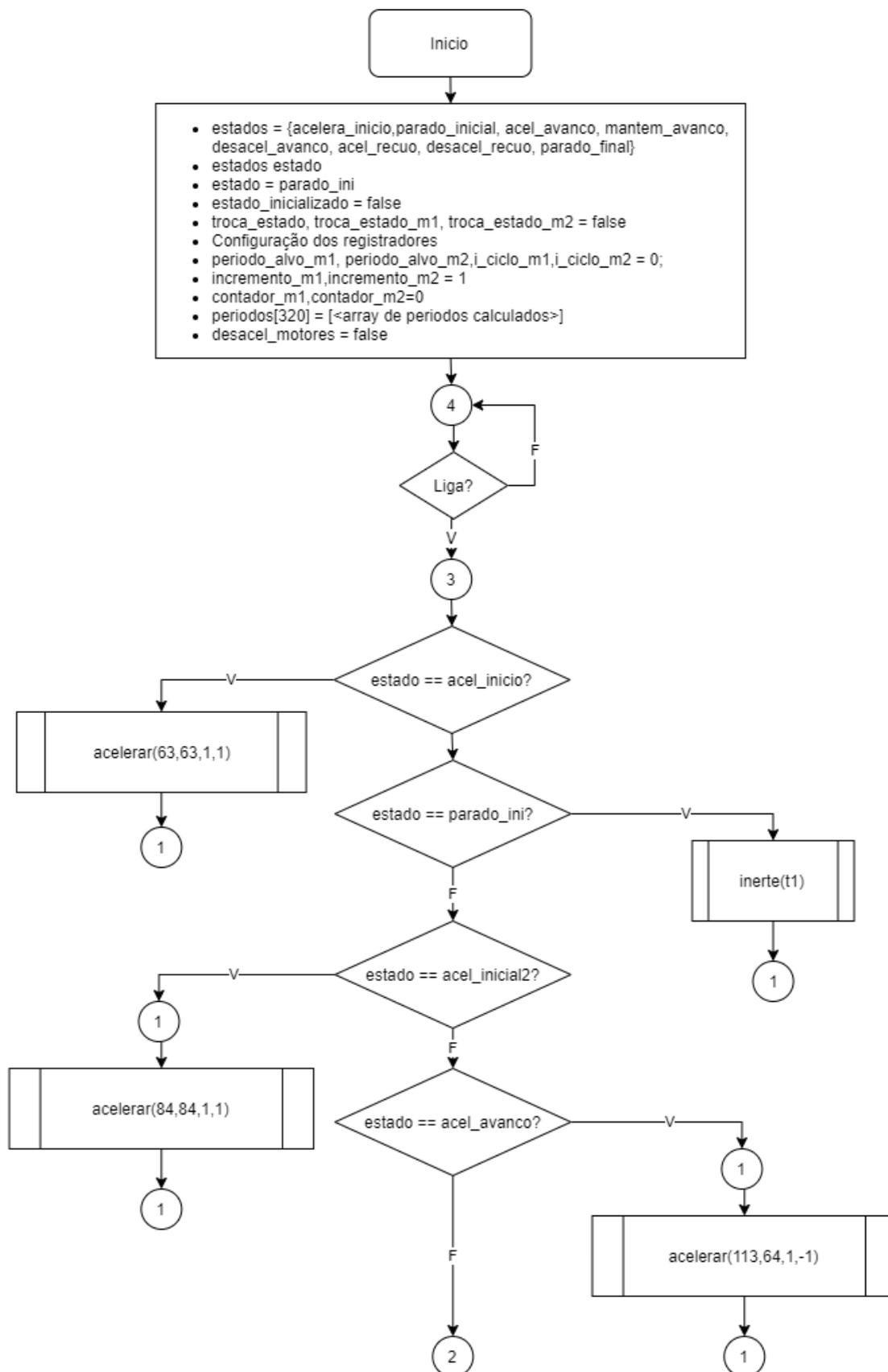
Processo de soldagem GTAW TIG. **ESAB**, 2020. Disponível em: <URL>. Acesso em: maio de 2020.

PIKE, G. **Evaluation of the Tip Tig Welding System, a Semi-automatic Hot Wire GTAW Process**, Newport News: Newport News Shipbuilding, 2013.

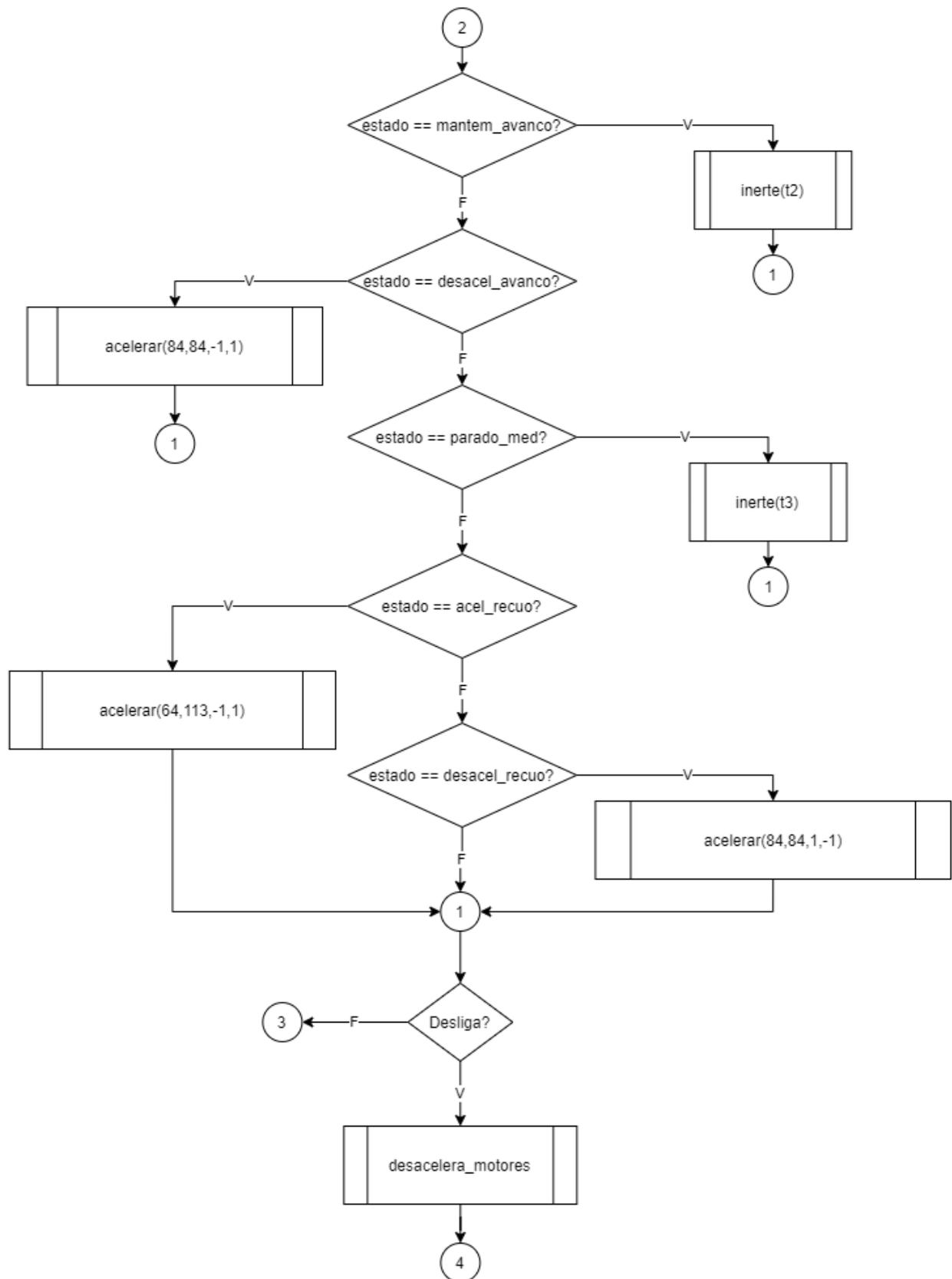
## APÊNDICE A – TABELA DO ENSAIO DE AVANÇO

Nº de pulsos avançando	Deslocamento 1(mm)	Deslocamento 2(mm)	Deslocamento 3(mm)	Deslocamento médio(mm)	Deslocamento teórico (mm)	Erro (mm)
1	10	10	10	10	12.6	2.6
2	22	22.5	22	22.2	25.2	3.0
3	35	35	34.5	34.8	37.8	2.9
4	47	47	46.5	46.8	50.4	3.5
5	59	59	59	59	62.9	3.9
6	72	71.5	70.5	71.3	75.5	4.2
7	83	83	83	83	88.1	5.1
8	95.5	95.5	95.5	95.5	100.7	5.2
9	108	108	108	108	113.3	5.3
10	120	120	119	119.7	125.9	6.2
11	132	130	131	131	138.5	7.5
12	144	144	144	144	151.1	7.1
13	155	157	156	156	163.6	7.6
14	168	168	168	168	176.2	8.2
15	179	179	180	179.3	188.8	9.5
16	193	193	192	192.7	201.4	8.7
17	205	205	205	205	214	9.0
18	216	215	217	216	226.6	10.6
19	229	229	229	229	239.2	10.2
20	241	241	241	241	251.8	10.8
21	253	255	253	253.7	264.3	10.7
22	266	265	266	265.7	276.9	11.0
23	279	278	279	278.7	289.5	10.9
24	291	292	291	291.3	302.1	10.8
25	302	304	303	303	314.7	11.7
26	316	316	315	315.7	327.3	11.6
27	327	326	327	326.7	339.9	13.2
28	341	339.5	340	340.2	352.5	12.3
29	353	353.5	352	352.8	365	12.2
30	364	365	363	364	377.6	13.6
31	378	373	376.5	375.8	390.2	14.4
32	390	390	388.5	389.5	402.8	13.3
33	401	400.5	402	401.2	415.4	14.2
34	409	408	410	409	428	19.0

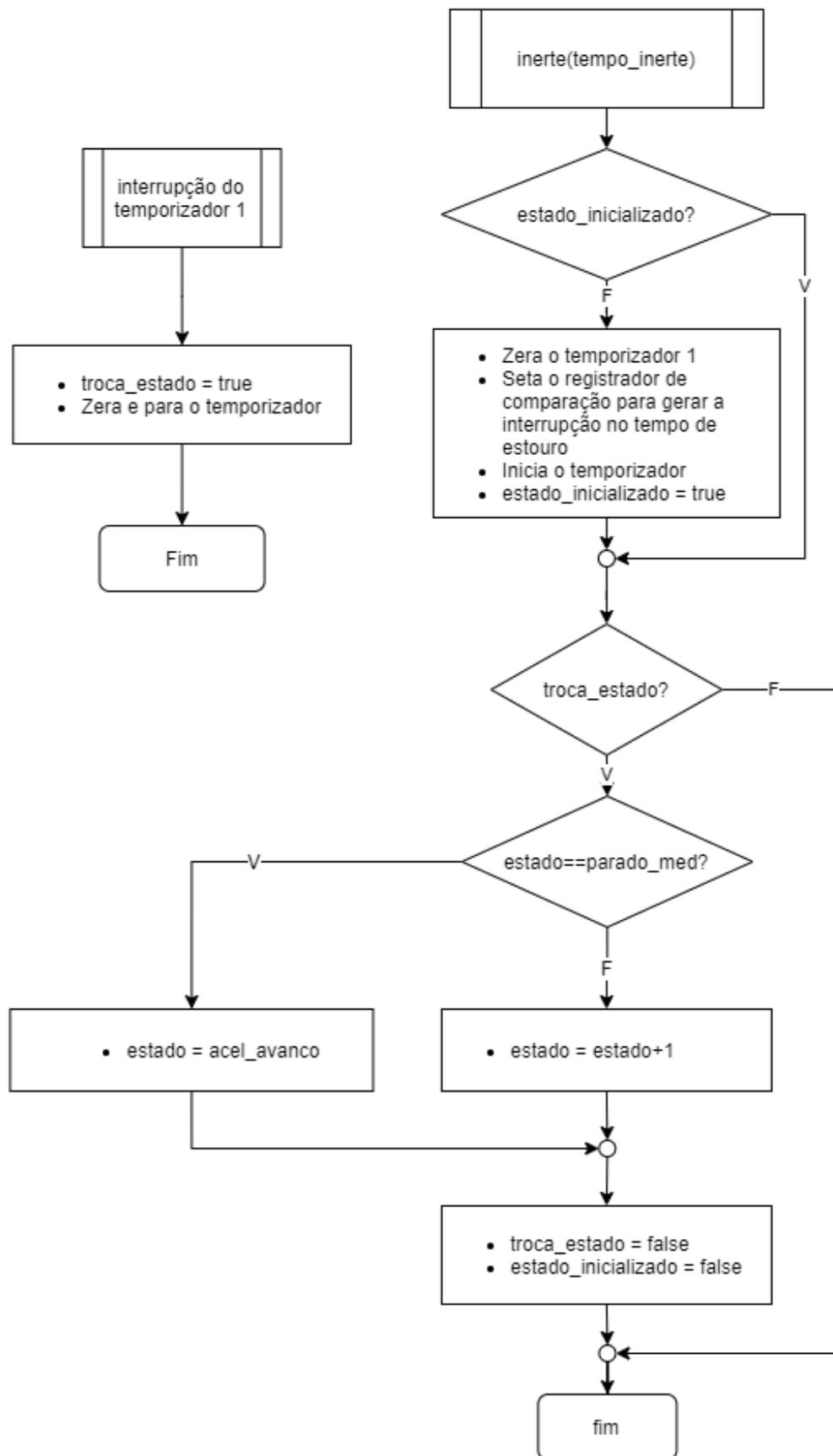
## APÊNDICE B - FLUXOGRAMA



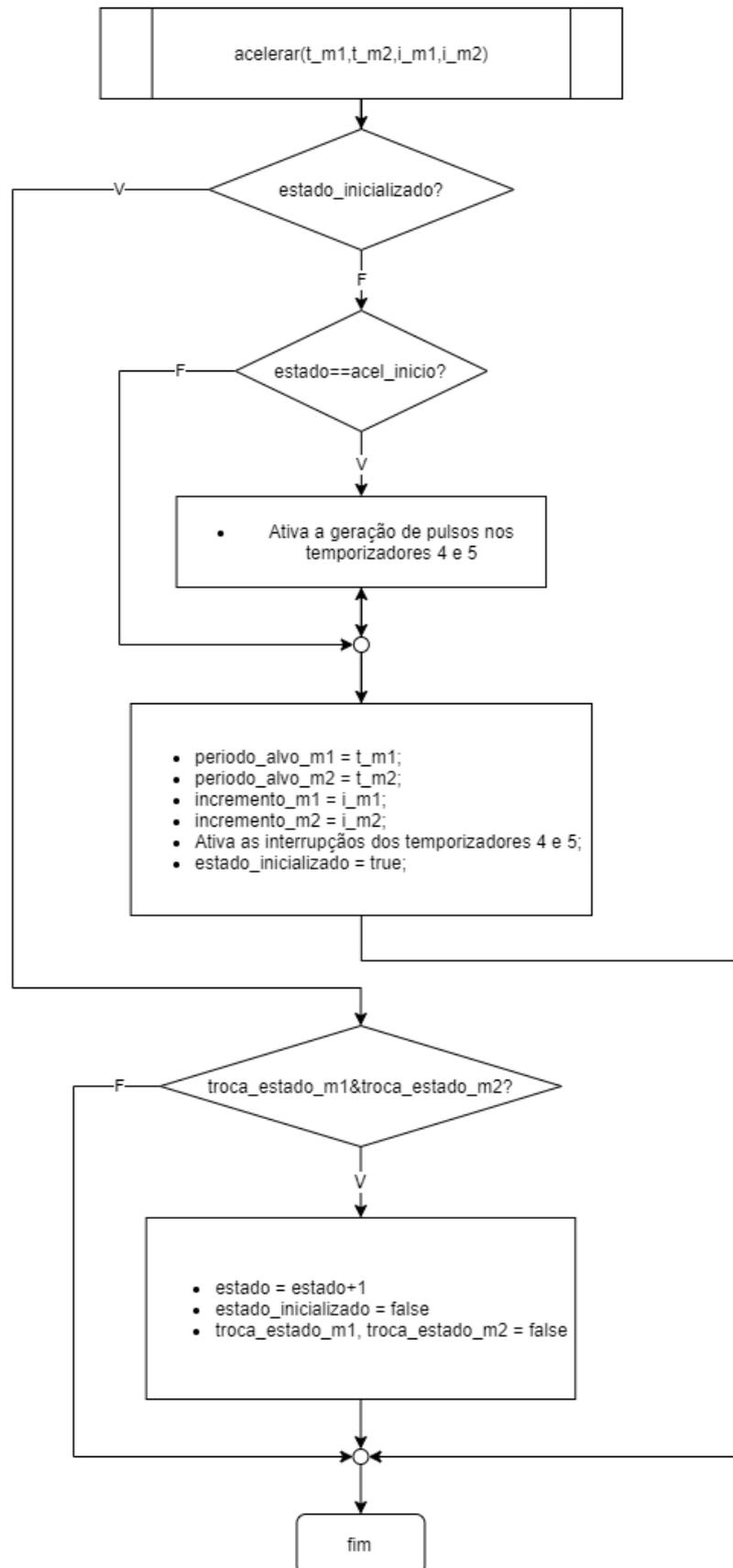
## APÊNDICE B - FLUXOGRAMA



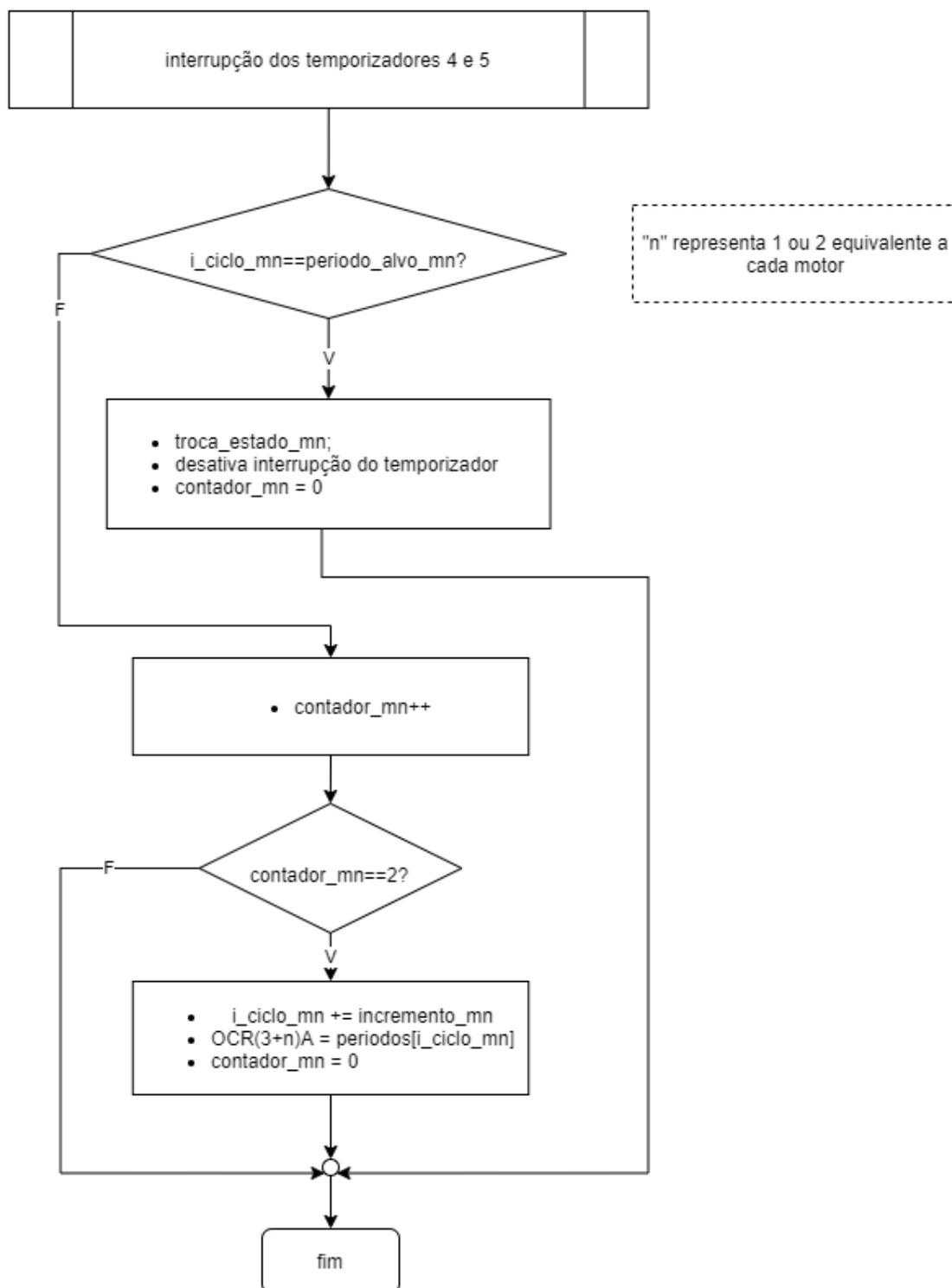
## APÊNDICE B - FLUXOGRAMA



## APÊNDICE B - FLUXOGRAMA



## APÊNDICE B - FLUXOGRAMA



**APÊNDICE B - FLUXOGRAMA**