

**RAFAEL PEREIRA PIRES**

**PLANEJAMENTO E CORREÇÃO DE TRAJETÓRIAS  
EM MANIPULADOR DE SOLDAGEM**

**FLORIANÓPOLIS, 2014**



**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA  
CAMPUS FLORIANÓPOLIS  
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE METAL-MECÂNICA  
MESTRADO PROFISSIONAL EM MECATRÔNICA**

**RAFAEL PEREIRA PIRES**

**PLANEJAMENTO E CORREÇÃO DE TRAJETÓRIAS  
EM MANIPULADOR DE SOLDAGEM**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Mecatrônica.

Professor Orientador:  
Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng.

**FLORIANÓPOLIS, 2014**

CDD 671.52

P667p

Pires, Rafael Pereira

Planejamento e correção de trajetórias em manipulador de soldagem [DIS] / Rafael Pereira Pires; orientação de Nelso Gauze Bonacorso. – Florianópolis, 2014.

1 v.: il.

Dissertação de Mestrado (Mecatrônica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Inclui referências.

1. Manipulador de soldagem. 2. Automação de soldagem. 3. Oscilação. 4. Trajetórias. I. Bonacorso, Nelso Gauze. II. Título.

Sistemas de Bibliotecas Integradas do IFSC

Biblioteca Dr. Hercílio Luz – Campus Florianópolis

Catalogado por: Ana Paula F. Rodrigues Pacheco CRB 14/1117

# **PLANEJAMENTO E CORREÇÃO DE TRAJETÓRIAS EM MANIPULADOR DE SOLDAGEM**

**RAFAEL PEREIRA PIRES**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Mecatrônica e aprovada na sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Mecatrônica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Florianópolis, 16 de dezembro de 2014

---

Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Orientador

---

Roberto Alexandre Dias, Dr. Eng. – Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

---

Nelso Gauze Bonacorso, Dr. Eng. – Membro Titular

---

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr. Eng. – Membro Titular

---

Mario Lucio Roloff, Dr. Eng. – Membro Titular



## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao professor orientador Nelso Gauze Bonacorso pela atenção e cumplicidade na condução deste trabalho, e especialmente por suas inestimáveis orientações e conselhos a um aluno oriundo da computação que ousou se aventurar nas áreas de automação e soldagem. Sou também grato aos colegas Ivan Luiz Hubert, pelo alto astral e compartilhamento de sua vasta experiência profissional e de vida, e Vitor Pinto da Cunha, pela prontidão em resolver os contratemplos relacionados ao protótipo e em obter os dados dimensionais das macrografias.

Agradeço ainda ao corpo docente do IF-SC e aos colegas nas disciplinas pelas discussões, descontrações e ensinamentos oportunizados na fase inicial do curso. Ao corpo técnico-administrativo agradeço especialmente a Malu Pereira, pela presteza e dedicação com as quais sempre me atendeu, e Cassiano Bonin, pela atenção dispensada ao transmitir os resultados de seu trabalho, ao qual demos prosseguimento.

À minha esposa, Natália Ordobás Bortolás, agradeço pelo apoio e companheirismo diuturnos e, é claro, pelas elogiadas composições gráficas com as quais me presenteou e que integraram a artigos e a esta dissertação. Agradeço ainda a meus pais, Jorge Luiz Machado Pires e Rejane Pereira Pires, e irmãos, Gaspar e Bárbara, que, embora longe, me acompanham e torcem pelo meu êxito.

Por fim, mas não menos importante, agradeço à Secretaria de Estado da Educação de Santa Catarina pela concessão de bolsa de estudos através do Fundo de Apoio à Manutenção e ao Desenvolvimento da Educação Superior – FUMDES.



## RESUMO

Robôs industriais e manipuladores de soldagem desempenham um papel essencial à indústria ao automatizar, com qualidade, rapidez e repetitividade, um processo manual lento e insalubre. Tal importância se reflete na diversidade de equipamentos oferecidos pelos fabricantes. Esses equipamentos, entretanto, ainda possuem alto custo de aquisição e manutenção, além de limitações quanto às suas funcionalidades. Este trabalho propõe um sistema computacional para execução de soldas em um manipulador cartesiano de cadeia cinemática mista de baixo custo, projetado e construído integralmente em ambiente acadêmico. O foco do sistema está na oferta de opções de oscilações da tocha de soldagem que é conduzida pelo braço mecânico do manipulador, associada à possibilidade de correção da trajetória via operador durante a execução, e de alteração de parâmetros da fonte de soldagem em sincronia com a oscilação. Ao usuário é facultada a escolha dentre trajetórias sem oscilação, com oscilação longitudinal, transversal e combinações de ambas, além de poder criar oscilações customizadas. Todas elas podem ser dispostas ao longo de um eixo linear qualquer, dentro da área de trabalho, e em eixo circular. Durante a execução, ao perceber desvios causados pelo calor do arco elétrico ou falhas de fixação ou de alinhamento no preparo das juntas, o operador pode corrigir parâmetros da geometria de oscilação, de posicionamento da trajetória ou velocidade de execução. Além disso, é possível determinar diferentes parâmetros de soldagem de acordo com a oscilação, possibilitando assim a experimentação de abordagens que busquem melhores resultados em soldagens de união e de revestimento. As estratégias de construção do sistema, algoritmos e modelagens matemáticas foram corroboradas empiricamente através da condução de ensaios de plotagem de trajetórias e de soldagens. O protótipo desenvolvido demonstrou ser adequado e capaz de executar procedimentos de soldagem em instituições de ensino tecnológico, dada sua tamanha flexibilidade, e de ter potencial para utilização na indústria e em campo.

**Palavras-chave:** Trajetórias. Oscilação. Sincronismo. Automação da soldagem. Soldagem de revestimento. Soldagem de união.

## ABSTRACT

Industrial robots and welding manipulators play an essential role in the industry by automating a manual slow and unhealthy process with quality, speed and repeatability. Such importance is reflected in the equipment diversity offered by the manufacturers. These devices, however, still have high acquisition and maintenance costs, besides some limitations in their functionality. This dissertation proposes a computational system for welding executions on a low cost Cartesian manipulator with mixed kinematic chain, designed and built entirely in an academic environment. At the system's heart is the offering of a range of welding torch oscillations that is driven by a mechanical arm, along with the possibility of operator-driven path corrections while running. It also allows the changing of welding source parameters in sync with the oscillation. The user can choose among trajectories without oscillation, with longitudinal or transverse oscillations and combinations of both, besides being able of creating custom oscillations. All of them can be arranged along an arbitrary linear axis within the work area, and along a circular axis. During execution, the operator can correct oscillation geometry parameters, path positioning and running speed when realizing the occurrence of deviations caused by arc heat or fixation and alignment failures. In addition, it is possible to determine different welding parameters according to the oscillation, thus enabling the testing of approaches that seek better results in joining and coating welds. The system design strategies, algorithms and mathematical models have been confirmed empirically by conducting trajectories plot and welding trials. The prototype proved to be suitable and able to perform welding procedures in technological education institutions, given its great flexibility. Besides that, it has potential to be used in industry and in the field.

**Keywords:** Trajectories. Oscillations. Synchronism. Welding automation. Coating. Joining.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Componentes envolvidos no procedimento de soldagem GMAW em (a); e detalhe no arco e poça em (b) [11] (Adaptado) .....	26
Figura 2 Possíveis situações para o ângulo de ataque da tocha [12] (Adaptado).....	27
Figura 3 Manipuladores de Soldagem: em (a) Universal Bug-O-Matic [9]; em (b) Tartilope V4 [14] .....	28
Figura 4 Em (a), movimento <i>switch-back</i> [19]; em (b) parametrização [20] (Adaptado).....	30
Figura 5 Padrões de oscilações para soldagem em (a) [11] Trajetórias oferecidas pelo TartilopeV4 em (b) [21].....	30
Figura 6 Mecanismo rotacional acoplado à tocha (a) e a trajetória gerada (b) [23] (Adaptado) .....	31
Figura 7 Oscilação Duplo Oito [12] (Adaptado).....	32
Figura 8 Cordão obtido com seguimento automático da junta, através dos dados obtidos do sensor de arco [28].....	33
Figura 9 Soldagem de união de peças com chanfro em V: vista superior do desalinhamento em (a) e lateral dos desníveis e afastamentos em (b) [18] (Adaptado).....	33
Figura 10 Sensor de imagem e laser para seguimento de junta [38] .....	34
Figura 11 Operador humano controlando correções durante soldagem [40] .....	35
Figura 12 Em (a) seção transversal de cordões com eletrodo em polaridade positiva e negativa; em (b) estratégia para melhorar soldagens de revestimento; em (c) polaridades aplicadas por área da seção transversal [5] (Adaptado).....	37
Figura 13 Equipamentos envolvidos no sistema de soldagem automática desenvolvido [45].....	39
Figura 14 Em (a) Modelo CAD; em (b) protótipo construído, com a indicação dos eixos.....	41
Figura 15 Mecanismo mecânico de orientação da tocha de soldagem: (a) <i>pitch</i> (b) <i>roll</i> (c) Fotografia do manipulador [8].....	42
Figura 16 Diagrama do sistema eletroeletrônico do manipulador de soldagem .....	43
Figura 17 Gabinete Eletroeletrônico com indicação dos principais componentes.....	44
Figura 18 Detalhamento do acionamento do manipulador e da fonte de soldagem [44].....	45
Figura 19 Tela do <i>software</i> .....	48

Figura 20 Disposição funcional dos módulos de <i>software</i> .....	50
Figura 21 Fluxograma com o procedimento de busca de zeros .....	52
Figura 22 Diagrama das classes envolvidas na definição e execução de trajetórias .....	53
Figura 23 Fluxograma do procedimento principal no Executor de Trajetórias .....	54
Figura 24 Gráficos horários da velocidade para a obtenção da velocidade a ser comandada.....	55
Figura 25 Tela de configuração da trajetória <i>switch back</i> .....	56
Figura 26 Tela de configuração das trajetórias Triangular e Trapezoidal .....	57
Figura 27 Parâmetros para o cálculo das velocidades da ferramenta nas oscilações trapezoidal e triangular .....	58
Figura 28 Caminho da tocha na trajetória Triangular com <i>Switch Back</i> .....	60
Figura 29 Tela de determinação dos parâmetros da trajetória Triangular com <i>Switch Back</i> .....	60
Figura 30 Formação da trajetória circular com base em movimento elipsoide.....	62
Figura 31 Parâmetros de comprimento na trajetória circular .....	63
Figura 32 Variação de parâmetros na geração da trajetória circular.....	64
Figura 33 Formação da trajetória duplo oito com base na circular .....	65
Figura 34 Edição de uma nova trajetória customizada .....	66
Figura 35 Utilização da nova trajetória criada pelo usuário.....	66
Figura 36 Exemplo de solda de união em superfície inclinada e sistema de coordenadas de referência do manipulador .....	68
Figura 37 Tela de configuração dos pontos inicial e final e ângulo ao redor do eixo longitudinal.....	69
Figura 38 Inclinação da trajetória ao redor do eixo longitudinal .....	69
Figura 39 Rotações para adequar a trajetória ao vetor determinado pelos pontos inicial e final.....	70
Figura 40 Possível aplicação da soldagem em eixo curvilíneo .....	71
Figura 41 Tela de configuração das trajetórias em eixo circular .....	72
Figura 42 Mapeamento dos pontos definidos no sentido do eixo X a uma função arbitrária de acordo com a correspondência entre a abscissa dos pontos e comprimento de arco da função.....	73
Figura 43 Trajetória circular transformada para disposição em eixo circular .....	75
Figura 44 Execução sem variação na orientação da tocha em (a); e com variação em (b) .....	76

Figura 45 Perfis do mecanismo diferencial de orientação e da tocha de soldagem com indicação dos segmentos entre ponto fixo e ponta da tocha.....	77
Figura 46 Obtenção da compensação do desvio da trajetória causado pelo mecanismo mecânico de orientação da tocha.....	78
Figura 47 Diagrama de sequência do procedimento de correção das trajetórias [45].....	79
Figura 48 (a) Fluxograma do trecho de sincronismo no executor de trajetórias; (b) Exemplo dos comandos ( $p,v$ ) e efeito na trajetória.....	80
Figura 49 Caneta esferográfica anexada ao braço robótico em (a); Detalhe na plotagem em (b).....	81
Figura 50 Plotagem e medição das dimensões obtidas com caneta esferográfica anexada ao braço robótico.....	82
Figura 51 Corte transversal em (a) e (c) e vista superior em (b) e (d) de soldagens de revestimento com variação na inclinação da tocha.....	83
Figura 52 Parâmetros geométricos do cordão de solda em corte transversal [50].....	83
Figura 53 Corte transversal em (a) e (c) e vista superior em (b) e (d) de soldagens de revestimento com execução de diferentes oscilações.....	85
Figura 54 Soldagem de topo de peças com chanfro em V. Em (a) visão superior; em (b) macrografia.....	86
Figura 55 Soldagem de junta em ângulo de 90°. Em (a) fotografia com indicação da inclinação da tocha; em (b) vista de perfil da junta; e em (c) vista frontal do cordão.....	87
Figura 56 Correção de trajetórias: eixo longitudinal em (a) e (b), amplitude em (c) e (d), frequência em (e) e (f) e velocidade em (g).....	89
Figura 57 Vista frontal e lateral da variação na orientação da tocha na trajetória circular com a correspondente compensação nos eixos de posicionamento.....	91
Figura 58 Ensaio de trajetória triangular disposta em eixo circular.....	92
Figura 59 Troca de polaridade na oscilação <i>switch back</i> com sincronismo com fonte de soldagem.....	92
Figura 60 Macrografias e visão superior dos cordões de solda obtidos ao variar a polaridade no eletrodo.....	94
Figura 61 Sequência de rotações para orientação 3D com os ângulos de Euler.....	110
Figura 62 Gráfico do comprimento de arco para função quadrática ...	111
Figura 63 Método de Newton-Raphson aplicado ao comprimento do arco.....	111
Figura 64 Trajetória em duplo oito disposta em eixo parabólico.....	112

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Informações fornecidas pelas instâncias de Trajetória ao Executor de Trajetórias para cada ponto.....	53
Tabela 2. Caraterísticas geométricas dos cordões obtidos dos ensaios com variação no ângulo de ataque .....	84
Tabela 3. Caraterísticas geométricas dos cordões em variadas oscilações .....	85
Tabela 4 Parâmetros das oscilações da soldagem de topo em camadas	87
Tabela 5 Medidas geométricas dos cordões obtidos variando a polaridade no eletrodo.....	94
Tabela 6 Lista de parâmetros a serem usados com CMD_GET_PARAM e CMD_SET_PARAM .....	116

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>CAD</b>	<i>Computer Aided Design</i>
<b>CC-</b>	Corrente Contínua, polaridade negativa
<b>CC+</b>	Corrente Contínua, polaridade positiva
<b>CNC</b>	Comando Numérico Computacional
<b>CRC</b>	<i>Cyclic Redundancy Check</i>
<b>DBCP</b>	Distância entre Bico de Contato e Peça
<b>GMAW</b>	<i>Gas Metal Arc Welding</i>
<b>GTAW</b>	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i>
<b>IHM</b>	Interface Homem Máquina
<b>MIG</b>	<i>Metal Inert Gas</i>
<b>MAG</b>	<i>Metal Active Gas</i>
<b>PC</b>	<i>Personal Computer</i>
<b>SPI</b>	<i>Serial Peripheral Interface</i>
<b>STL</b>	<i>Standard Template Library</i>
<b>TIG</b>	<i>Tungsten Inert Gas</i>
<b>UML</b>	<i>Unified Modeling Language</i>

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	Definição do problema .....	19
1.2	Objetivos e contribuições .....	20
1.3	Escopo do trabalho .....	21
1.4	Estrutura do texto.....	22
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	25
2.1	Soldagem a arco elétrico.....	25
2.2	Manipuladores de Soldagem.....	27
2.3	Sistemas para soldagem.....	28
2.4	Oscilações.....	29
2.5	Correção de trajetórias.....	32
2.6	Sincronismo .....	35
3	MANIPULADOR DE SOLDAGEM .....	39
3.1	Desenvolvimento Mecânico .....	40
3.2	Desenvolvimento Eletroeletrônico .....	42
4	DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL .....	47
4.1	Modelagem do software .....	49
4.1.1	Comunicação .....	50
4.1.2	<i>Homing</i> .....	51
4.2	Trajetoárias.....	52
4.2.1	<i>Switch back</i> .....	56
4.2.2	Triangular e Trapezoidal.....	57
4.2.3	Triangular com <i>Switch Back</i> .....	59
4.2.4	Circular .....	61
4.2.5	Duplo Oito.....	65
4.2.6	Customizadas.....	65

4.2.7	Rotação das Trajetórias e Plano Inclinado .....	67
4.2.8	Trajetórias em Eixo curvilíneo .....	71
4.3	Correção de trajetórias via operador.....	78
4.4	Sincronismo com fonte de soldagem.....	79
5	RESULTADOS EXPERIMENTAIS .....	81
5.1	Validação da Mecânica .....	81
5.2	Soldagens de Revestimento.....	82
5.3	Soldagens de União.....	86
5.4	Correção de Trajetórias via operador .....	88
5.5	Trajetórias em Eixo Circular .....	90
5.6	Sincronismo com Fonte de Soldagem .....	92
6	CONCLUSÕES.....	95
6.1	Trabalhos Futuros.....	97
	REFERÊNCIAS .....	99
	APÊNDICES.....	107
	APÊNDICE 1 – Ângulos de Euler .....	109
	APÊNDICE 2 – Transformação em eixo parabólico .....	111
	ANEXOS.....	113
	ANEXO 1 - Comandos enviados aos drivers.....	115



# 1 INTRODUÇÃO

A soldagem a arco elétrico é um processo essencial à indústria. Sua utilização possibilita tanto a manutenção de componentes, como o revestimento de caldeiras em usinas termoeletricas, quanto a fabricação de peças que compõem todo tipo de máquinas. Embora sua importância seja inequívoca, a automatização do processo de soldagem em algumas situações é ainda um desafio.

A maioria dos robôs de soldagem encontra-se instalada em linhas de produção, especialmente na indústria automobilística [1]. Os robôs antropomórficos são os mais utilizados com essa finalidade. Eles possuem grande liberdade de deslocamento e são capazes de realizar movimentos similares aos do braço humano. Todavia, são pesados e necessitam de uma fixação rígida para sua base, o que torna difícil sua utilização em campo. Além disso, eles possuem alcance limitado e requerem espaço suficiente para a livre movimentação dos segmentos que o compõem, o que os tornam inapropriados para ambientes confinados ou soldagens de longa extensão.

Locais de difícil acesso e corpos de grandes dimensões, como os encontrados na indústria naval [2], bem como juntas em posições não triviais como em linhas de dutos viárias [1] impõem dificuldades à automatização do processo de soldagem. Isso contribui para o predomínio, nessas situações, da utilização de soldagem manual. A dependência nesse tipo de processo traz problemas que vão desde a escassez de mão de obra, passando pela saúde do trabalhador, até a falta de qualidade e repetitividade no resultado obtido.

O exercício dessa atividade requer treinamento e experiência, além de boa resistência física, já que eventualmente é necessária a permanência do soldador por longos períodos em posições desconfortáveis e, ainda, em locais sujeitos a altas temperaturas. Não obstante, adversidades adicionais são impostas pela natureza insalubre do processo, pois o arco elétrico gera ruído, radiação ultravioleta, respingos e gases tóxicos. Tudo isso faz com que a quantidade de profissionais capacitados seja limitada e com que aqueles que exercem a atividade fiquem fatigados depois de pouco tempo de trabalho, o que acaba por se refletir em baixo desempenho de produção e na qualidade do resultado almejado.

A soldagem automática, além de suprimir a maior parte dos efeitos negativos ao operador, é capaz de reproduzir trabalhos por

longos períodos, com qualidade, precisão e repetitividade [3]. Com uma concepção mecânica apropriada para transporte e instalação em campo, os manipuladores de soldagem viabilizam as vantagens advindas da automatização em uma maior quantidade de cenários quando comparados aos robôs antropomórficos. Isso decorre principalmente do modo de locomoção sobre trilhos, que podem ser adaptáveis a diferentes superfícies e comprimentos, e da natureza compacta do braço robótico.

Contudo, a concepção mecânica isoladamente não é suficiente para garantir bons resultados em procedimentos de soldagem. Uma série de outros fatores acrescentam obstáculos à execução de cordões de solda adequados. Alterações de geometria causadas pelo calor do arco elétrico são intrínsecas ao processo, e devem ser levadas em consideração para que efeitos satisfatórios sejam alcançados. Além disso, falhas humanas na produção das juntas ou em seu posicionamento também podem contribuir para resultados não exitosos. Esses entraves podem ser mitigados com a adaptação das trajetórias durante a execução dos cordões de solda.

Além dos variados tipos de oscilações possíveis para a movimentação da tocha e de seu posicionamento preciso e adaptável a distorções, a fonte de soldagem também desempenha um papel essencial. Ela é responsável pela manutenção, durante a execução, dos parâmetros designados, que incluem a tensão ou corrente de soldagem e a velocidade de alimentação do arame. Há trabalhos que exploram a alternância desses parâmetros em sincronia com a trajetória executada, em especial a polaridade no eletrodo, a fim de se obter melhores resultados em soldagens de união [4] e revestimento [5].

Os manipuladores de soldagem disponíveis no mercado ou descritos na literatura possuem deficiências normalmente relacionadas a um conjunto de limitações, dentre as quais: flexibilidade da trajetória, rapidez de deslocamento, precisão de posicionamento e orientação da tocha e/ou elevado custo de aquisição e manutenção. Por essas razões, o Grupo de Desenvolvimento de Máquinas Automáticas Especiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina desenvolveu um manipulador cartesiano de cadeia cinemática mista para a execução de procedimentos tradicionais e avançados de soldagem automatizada. Mais do que a superação de deficiências encontradas em outros equipamentos, o protótipo construído exclusivamente em ambiente acadêmico permite ainda a livre experimentação de soluções tecnológicas em seu desenvolvimento e de técnicas de soldagem na sua utilização, sem as limitações impostas por soluções comerciais protegidas por propriedade industrial [6].

Como é de se supor, um trabalho como esse tem natureza multidisciplinar. As principais linhas de desenvolvimento envolveram mecânica, eletroeletrônica e computação, que serão abordadas em profundidade crescente neste trabalho. O foco a ser aqui discutido envolve especialmente o desenvolvimento computacional das funcionalidades que dão azo à flexibilidade e à distinção do manipulador frente às aplicações a que se destina.

### 1.1 Definição do problema

Conforme mencionado, a construção do manipulador de soldagem foi ensejada em razão de carências observadas em equipamentos similares e dos potenciais ganhos acadêmicos oriundos do seu desenvolvimento e utilização. Dentre essas carências, o estudo para minimização dos custos de fabricação focou no acionamento dos eixos. Foram cotejadas as opções de *drivers* de motores disponíveis no mercado e as características de cada um deles, para enfim chegar em uma proposta que fosse, ao mesmo tempo, viável tecnicamente, eficiente e com o menor custo por eixo [7].

Em seguida, passou-se ao projeto e desenvolvimento mecânico. Nesse ponto, buscou-se oferecer flexibilidade ao aumentar a quantidade de possibilidades de orientação da tocha com eixos rotacionais paralelos ao fim da cadeia cinemática em série, e ainda viabilizar a execução de trajetórias com boa rigidez, alta dinâmica e velocidade de operação [8]. Em especial, dedicou-se à máxima redução de folgas na transmissão, principalmente no eixo longitudinal, problema que acomete boa parte dos manipuladores disponíveis no mercado [9] [10].

Por fim, era necessário explorar o potencial do equipamento através da execução de trajetórias de soldagem e, ainda, permitir sua adaptação durante a execução a fim de compensar os desvios inerentes ao processo. Além disso, a sincronia entre trajetória e fonte de soldagem também deveria ser suportada, aumentando a gama de possíveis experiências com o manipulador. Diante dessas demandas, o presente trabalho foi proposto. A questão aqui investigada foi: Como estabelecer um sistema que controle a execução de trajetórias com a possibilidade de correção via operador, e que seja flexível para permitir a experimentação de novas ideias relacionadas a oscilações e também sua sincronização com a mudança de parâmetros de soldagem?

## 1.2 Objetivos e contribuições

O objetivo geral é desenvolver os algoritmos computacionais que executem trajetórias flexíveis em um manipulador de soldagem. Por flexíveis, entende-se a possibilidade de adaptação durante a execução através da correção de parâmetros e o oferecimento de mecanismos que auxiliem na experimentação de novas ideias para a geometria de oscilações, variações de velocidade e sincronização com a fonte de soldagem.

Os objetivos específicos são:

- Definir os requisitos do sistema
- Caracterizar o sistema de comunicação do software com os servos *drivers* e a fonte de soldagem;
- Elencar as principais trajetórias utilizadas em procedimentos de soldagem; identificar suas similaridades, diferenças e a relação que possuem com as variáveis que as definem através de modelagens matemáticas;
- Relacionar os cálculos de cinemática pertinentes com as trajetórias e projetar a arquitetura de software e algoritmos do sistema;
- Estabelecer um modo de descrição de trajetórias que contemple a possibilidade de manipulação das variáveis de interesse em qualquer momento, além da fácil inclusão de novas propostas de oscilação;
- Implementar, medir e avaliar as proposições.

Alcançados os objetivos, as contribuições seriam diversas. No âmbito institucional, poder-se-iam incluir as possibilidades de:

- Experimentação ampla do manipulador no teste de trajetórias com diferentes tipos de oscilações, frequências, velocidades e sincronia com fonte de soldagem, para as já existentes ou para novas ideias de oscilação;
- Demonstrações práticas a estudantes dos efeitos da manipulação de parâmetros, inclusive da adequação de determinadas técnicas a soldagens de revestimento ou de união;
- Realização de pesquisas sistemáticas desses efeitos para a proposição de técnicas de soldagens inovadoras em

trabalhos de conclusão de curso, mestrados e artigos científicos.

Para as comunidades acadêmica e industrial, seriam contribuições deste trabalho:

- Descrição de uma solução reproduzível, no todo ou em partes, de um software para execução e correção de trajetórias de soldagem;
- Descrição matemática de determinadas trajetórias e de sua disposição em eixo não linear;
- Estudo comparativo de trajetórias e variáveis que as definem;
- Demonstração da viabilidade do sistema proposto, com baixo custo e alto potencial comercial e acadêmico;
- Aplicação industrial.

### **1.3 Escopo do trabalho**

O enfoque da dissertação se dará em 3 linhas principais, todas sob o ponto de vista da soldagem a arco elétrico: (1) Trajetórias; (2) Correção; e (3) Sincronia. Elas serão exploradas com a finalidade de propor as soluções que integrarão o software de comando do manipulador de soldagem.

As trajetórias serão abordadas de modo a apontar a maneira pelas quais serão suportadas e descritas no software, permitindo a flexibilidade desejada. Isso será importante para sua adaptação durante a execução, e para a adição de novas ideias de oscilações. Também será contemplado o processo de disposição das trajetórias em eixo não linear, apontando a capacidade do manipulador na realização de processos mais complexos, em juntas curvilíneas.

A correção das trajetórias durante a execução será feita através da alteração dos parâmetros que as descrevem. O método de entrada para as correções será, em princípio, ignorado. Para fins de validação, elas serão feitas através do teclado do computador, em alusão a correções manuais realizadas pelo operador em interfaces homem-máquina, ou pela interface gráfica.

O sinal de sincronia da trajetória com a fonte de soldagem será tratado do ponto de vista da comunicação e do suporte dado a ele no software. Esse suporte ocorrerá na definição da trajetória e na sua execução.

Por estar este trabalho contido no âmbito de área multidisciplinar, as discussões aqui desenvolvidas podem tangenciar áreas correlatas. Para delimitar o escopo e evitar a indução errônea sobre o conteúdo desta dissertação, cumpre mencionar os temas que, embora relacionados, não serão abordados:

- Trajetórias não planares. Ainda que o manipulador tenha capacidade de executá-las, somente trajetórias planares serão alvo de discussão. Isso porque elas contemplam a quase totalidade das aplicações em soldagem. Contudo, será discutida e suportada a determinação de inclinação do plano da trajetória, o que faz com que os três eixos cartesianos tenham que operar em sincronia, tal qual na execução de trajetórias não planares;
- Correções automáticas da trajetória. Embora se fará menção a elas no referencial teórico, este trabalho se limitará ao suporte à correção dos parâmetros que definem as trajetórias. Todavia, oferecerá uma interface de software extensível para caso se queira, no futuro, adicionar sensores e malhas de controle para a correção automática. Conforme já mencionado, para fins de validação, a entrada das correções ocorrerá de forma manual, pelo teclado ou interface gráfica;
- Questões de metalurgia. Tipos de materiais, gases de proteção e transformações físico-químicas decorrentes do processo de soldagem não serão discutidas. A menção a técnicas de soldagem e os resultados esperados pela sua aplicação ocorrerá exclusivamente em razão de sua relação com a trajetória ou sinal de sincronia com a fonte de soldagem.

#### **1.4 Estrutura do texto**

Este trabalho encontra-se organizado em seis capítulos. No Capítulo 1, é feita a ambientação ao assunto delineando a motivação para o desenvolvimento de um manipulador de soldagem e apresentando as raízes dos problemas que serão abordados. Em seguida, define o problema a ser resolvido, os objetivos a serem alcançados e as contribuições que o sucesso em seu cumprimento traria. Por fim, estabelece os limites da pesquisa e descreve o restante do texto.

O Capítulo 2 resgata da literatura as bases que suportam o desenvolvimento. São descritos manipuladores e suas limitações, as oscilações clássicas de soldagem, trabalhos que tratam da correção automática e manual das trajetórias em tempo de execução e também da utilização da alternância de parâmetros da fonte de soldagem em sincronia com a trajetória. As descrições destacam ainda as diferenças entre esses trabalhos e o que é aqui proposto.

A construção do manipulador, com a descrição da mecânica e eletroeletrônica, é apresentada no Capítulo 3. Nele é pormenorizada a infraestrutura sobre a qual o software será construído, tornando possível a compreensão do caminho percorrido pelos comandos até os motores ou à fonte de soldagem, bem como da maneira como se dá essa comunicação.

No Capítulo 4, os temas discutidos no segundo capítulo, juntamente com as escolhas aplicadas ao projeto, acompanhadas de sua justificativa, são repisados. Além disso, a arquitetura, os esquemas, modelos matemáticos, estratégias e algoritmos utilizados são detalhados, incluindo ainda o apontamento das vantagens e desvantagens das alternativas.

Os experimentos de plotagem e ensaios de soldagem realizados, acompanhados dos resultados obtidos, estão descritos no Capítulo 5. Por derradeiro, no Capítulo 6, é feito um breve retrospecto do que fora proposto, das abordagens utilizadas, avaliações e resultados obtidos, juntamente com uma análise crítica do trabalho. O capítulo se encerra com a descrição de ideias para possíveis extensões em trabalhos futuros.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa e o desenvolvimento de soluções, alvos desta dissertação, encontram-se ligados ao arco elétrico em manipuladores de soldagem. Por essa razão, na seção 2.1 será feita uma introdução ao processo. Na seção 2.2, serão levantados alguns manipuladores utilizados com esse fim e, na seção 2.3, sistemas de controle de execução de procedimentos de soldagem serão descritos. Em seguida, passar-se-á para a discussão das linhas sobre as quais o sistema de execução proposto é baseado. Na seção 2.4 serão descritas algumas oscilações utilizadas em soldagens de união e revestimento. A seção 2.5 abordará trabalhos que tratam da correção de trajetórias durante a execução de cordões. Por fim, na seção 2.6, trabalhos que envolvem o sincronismo entre trajetória e fonte de soldagem serão caracterizados.

### 2.1 Soldagem a arco elétrico

A soldagem a arco consiste na fusão de material metálico com o calor do arco elétrico gerado entre um eletrodo e o material de base sobre o qual a soldagem é feita. Esse arco é gerado a partir de uma fonte de energia elétrica, ou fonte de soldagem. No processo de soldagem, pode ser utilizada corrente contínua ou alternada e o eletrodo pode ser consumível ou não. No ar que forma a atmosfera em torno do arco, há umidade e gases que contaminam a poça de fusão. Por essa razão, utilizam-se gases para protegê-la. Os processos de soldagem a arco podem ser classificados pela maneira como esses gases são gerados (eletrodo revestido, fluxo) ou injetados, pelo tipo de gás (ativo ou inerte) e pela característica do eletrodo ser ou não consumível.

Neste trabalho, o processo de soldagem empregado é o GMAW (*Gas Metal Arc Welding*), ou MIG/MAG (*Metal Inert Gas / Metal Active Gas*), ainda que as soluções propostas não sejam limitadas exclusivamente a ele. Nesse processo de soldagem, o eletrodo é um arame consumível, continuamente alimentado. Ele atua, ao mesmo tempo, como eletrodo e material de deposição, já que, depois de fundido, passa a fazer parte da poça de fusão junto com o material de base. Como gás de proteção, utiliza-se principalmente alguma combinação entre argônio, oxigênio e/ou gás carbônico. A Figura 1 ilustra a interação entre os componentes envolvidos no processo, com detalhe para a transferência do material de adição à poça de soldagem.

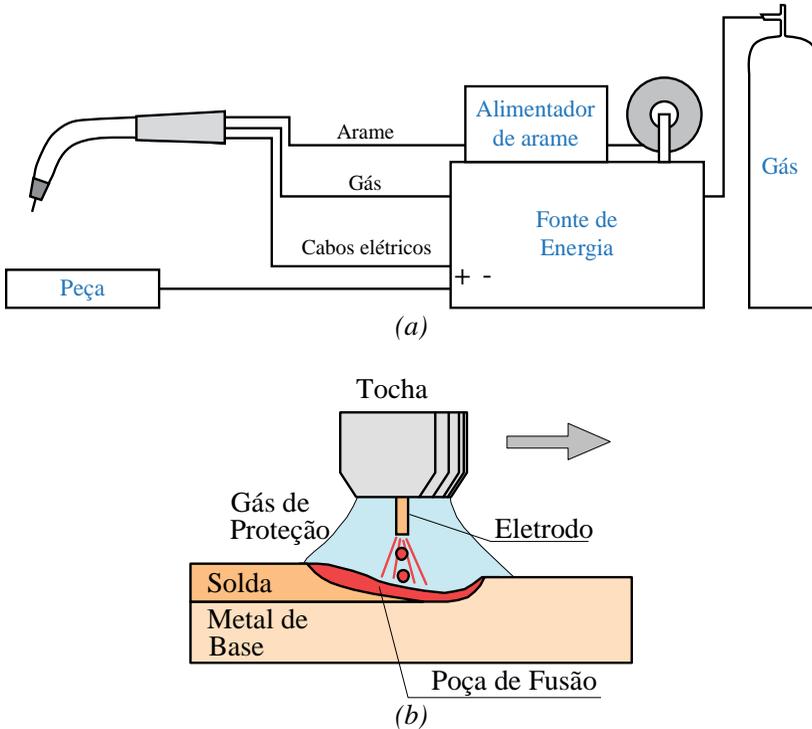


Figura 1 Componentes envolvidos no procedimento de soldagem GMAW em (a); e detalhe no arco e poça em (b) [11] (Adaptado)

O ângulo de ataque é um importante parâmetro que determina a condução da poça de soldagem. A Figura 2 ilustra as três situações relativas entre a tocha e o sentido do cordão. No primeiro caso, com a técnica de empurrar, o arco elétrico incide sobre o metal fundido sendo adicionado, ocasionando maior espalhamento. No último, o material de adição tende a ficar atrás do arco, enquanto ele incide diretamente sobre a peça. Assim, cada técnica produz diferentes resultados de largura, penetração e reforço do cordão de solda obtido.

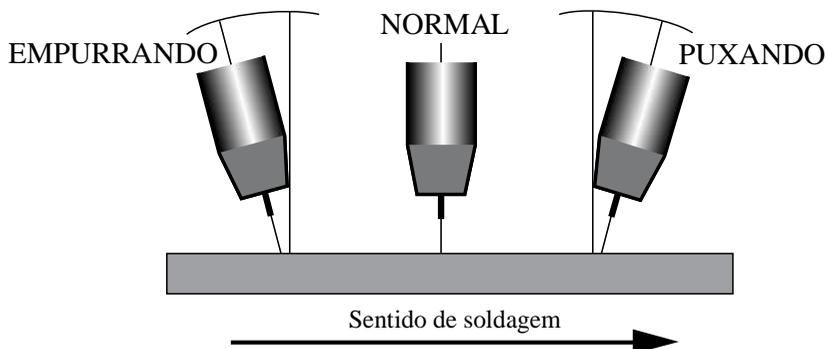


Figura 2 Possíveis situações para o ângulo de ataque da tocha [12] (Adaptado)

## 2.2 Manipuladores de Soldagem

Muitos manipuladores de soldagem estão disponíveis no mercado. Há soluções que são específicas à soldagem orbital de tubulações; outras, a soldagens de grandes extensões via deslocamento sobre trilhos lineares, como o manipulador no qual este trabalho foi aplicado.

O Universal Bug-O-Matic, Figura 3a, da empresa Bug-O Systems [9], é um manipulador com dois graus de liberdade orientado a aplicações de soldagens. Seu braço mecânico pode ser implantado em trilhos retilíneos ou circulares, para soldagem de tubos, e pode ser disposto em todas as posições. Ele contém um oscilador que permite a execução de trajetórias triangulares, trapezoidais e quadrangulares. Permite a manipulação da velocidade de soldagem, velocidade e amplitude da oscilação e correção do eixo de soldagem. Além disso, ele faculta a anexação de um dispositivo de controle automático da altura, através de sensor de corrente elétrica. Entretanto, não realiza oscilações no sentido longitudinal nem permite a variação de inclinação da tocha.

O TartilopeV4 (Figura 3b), da empresa SPS [13], é um manipulador de soldagem com quatro graus de liberdade, mas realiza oscilações apenas no sentido transversal. Ele faculta ainda a execução de formas pré-programadas, como retângulos, circunferências e triângulos, além de formas customizadas formadas por segmentos retilíneos. Ademais, é capaz de realizar o seguimento de junta com sensor de arco elétrico, ou manual, controlado pelo operador.



Figura 3 Manipuladores de Soldagem: em (a) Universal Bug-O-Matic [9]; em (b) Tartilope V4 [14]

Diferentemente dos supracitados, o manipulador de soldagem desenvolvido no projeto ao qual esta dissertação integra possui cinco graus de liberdade. Além dos três eixos seriais cartesianos (X, Z e Y), há dois eixos paralelos para determinar a orientação da tocha (A e B). Todos eles podem ser corrigidos manualmente pelo operador durante a execução. Mais do que oscilações nas direções longitudinal e/ou transversal, a liberdade de movimentação no eixo cartesiano que determina a altura da tocha (Z) permite também a inclinação do plano de soldagem. Além disso, o manipulador desenvolvido possui mais opções de oscilações e, ainda, a possibilidade de comandar a troca de parâmetros da fonte de soldagem de forma sincronizada com a trajetória.

### 2.3 Sistemas para soldagem

Alguns sistemas complexos foram propostos para soldagem em robôs antropomórficos. Incluindo a análise do projeto da peça em sistemas CAD (*Computer Aided Design*), propôs-se um modelo funcional que compreende etapas de planejamento de movimentação livre de colisões e sensoriamento da execução da soldagem [15]. Outra proposta [16] apresenta um sistema com controle via rede do robô, incluindo sensoriamento visual para seguimento de junta.

Para manipuladores de soldagem, similares à proposta deste trabalho, propuseram-se softwares para determinação de parametrização e execução de trajetórias predefinidas em soldagem orbital, com a utilização de IHM (Interface Homem Máquina) [1]. Outro trabalho, que envolve a possibilidade de correção durante a execução [2], direcionava-se à soldagem naval e era executado em computador ligado a monitor

com tela sensível ao torque para parametrização. Diferentemente da desta proposta, nenhuma delas aborda simultaneamente a execução de trajetórias customizadas, em eixo não linear e a sincronização com a fonte de soldagem.

## 2.4 Oscilações

O cordão de solda linear, ou *filetado*, produzido sem qualquer tipo de oscilação, é o mais simples: trata-se da condução da ferramenta no sentido longitudinal do cordão. A largura do cordão resultante, entretanto, é limitada, e depende da velocidade aplicada no deslocamento da tocha. Velocidades mais baixas causam maior deposição de material por unidade de comprimento e produzem, portanto, cordões mais largos. Por outro lado, como consequência, fazem com que a produtividade seja menor e a tocha fique por mais tempo sobre a mesma região, causando uma maior penetração do metal de adição no metal de base. Em soldagens de revestimento, o desejável são cordões largos, com pouca penetração e obtidos no menor tempo possível. Essas, dentre outras, são as variáveis para as quais se busca o melhor conjunto de valores para os parâmetros de movimento e de soldagem.

Com oscilação apenas no sentido longitudinal, o *switch back* [17] é utilizado especialmente para a execução do passe de raiz em soldagens de união multicamadas [18]. Trata-se do avanço da ferramenta seguido por um retrocesso sobre a poça de soldagem, como mostra a Figura 4a. Tipicamente, o comprimento do avanço é igual ao dobro do de recuo, fazendo com que a tocha passe por três vezes sobre os segmentos ao longo do cordão (Figura 4b). O objetivo é alongar a poça de fusão para maior distribuição do arco voltaico na direção longitudinal de execução do cordão de solda. O efeito da oscilação longitudinal da tocha minimiza a ocorrência de mordeduras e perfurações na soldagem de chapas metálicas de pequena espessura e escorrimento de material fundido em passes de raiz, bem como aumenta a produtividade em ambas as situações, via incremento da velocidade limite de soldagem.

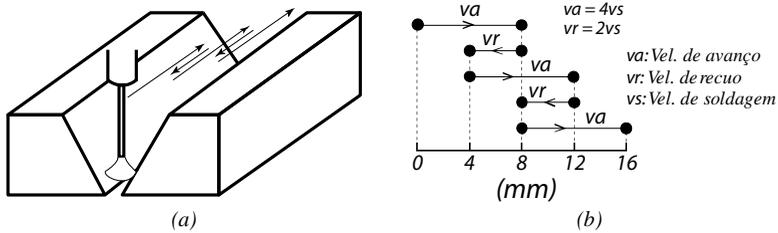


Figura 4 Em (a), movimento *switch-back* [19]; em (b) parametrização [20]  
(Adaptado)

As técnicas de soldagem com oscilação transversal consistem no deslocamento lateral do eletrodo em relação ao eixo da solda, e servem, entre outras razões, para que se obtenha um cordão mais largo ao conduzir a poça de fusão espalhando o material de adição e, assim, tornando mais suave o ciclo térmico de soldagem [11]. Além disso, elas permitem a redução de sobreposições e o suporte da poça de fusão em soldagens fora de posição. Na Figura 5a são mostrados alguns possíveis padrões de oscilação e, na Figura 5b, os suportados pelo TartilopeV4: triangular, trapezoidal e retangular.

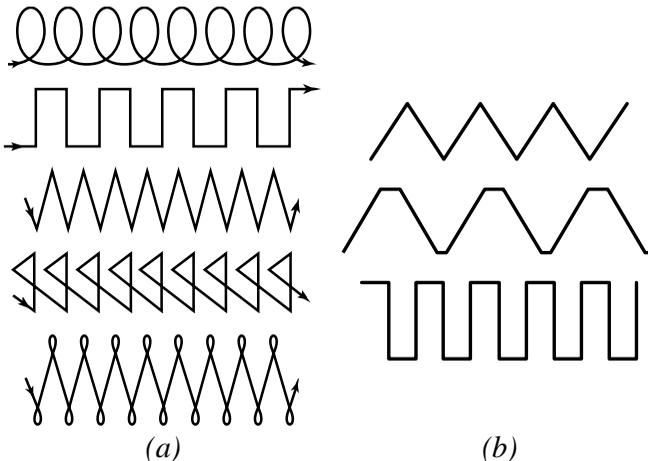


Figura 5 Padrões de oscilações para soldagem em (a) [11] Trajetórias oferecidas pelo TartilopeV4 em (b) [21]

A simples oscilação da tocha na direção transversal durante o avanço no sentido do cordão produz uma trajetória triangular ou sinusoidal, a depender da rapidez com que ocorre a inversão no sentido

da oscilação. A trajetória trapezoidal pode ser obtida da mesma maneira, mas com a inclusão de uma interrupção temporária da oscilação transversal nas extremidades. Alguns trabalhos utilizam mecanismos acoplados diretamente no cabeçote do equipamento para realizar esse tipo de padrão. Dentre esses mecanismos, podem-se citar aparatos mecânicos que convertem o movimento rotacional de motores em uma oscilação pendular [22], permitindo o alcance de altas frequências. Da mesma forma, trajetórias similares são obtidas com motores que oscilam movimentando a tocha em torno de seu próprio eixo [23], fazendo com que as arestas da trajetória se tornem similares a arcos de circunferência (Figura 6).

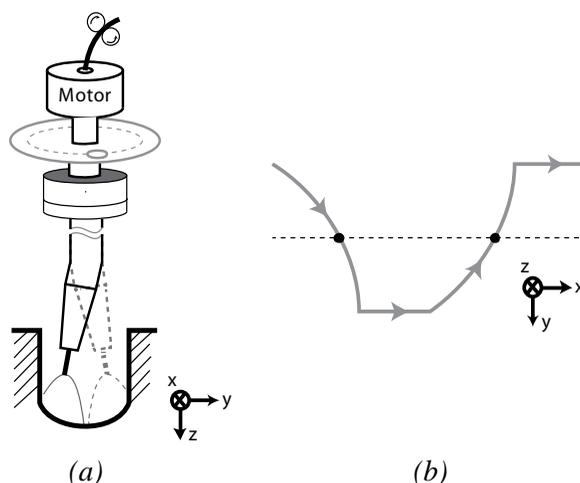


Figura 6 Mecanismo rotacional acoplado à tocha (a) e a trajetória gerada (b) [23] (Adaptado)

Buscando aliar as vantagens do *switch back* com as de oscilações transversais, propôs-se [24] [25] a combinação das duas técnicas. De forma semelhante, em que o movimento da tocha faz o arco elétrico retornar a trechos já percorridos ao mesmo tempo em que ocorre variação de posição na direção transversal, oscilações como a circular (Figura 5a superior) e duplo oito (Figura 7) reúnem características como o aumento de largura do cordão com diferenciada dinâmica na transferência de calor e condução da poça de soldagem.



Figura 7 Oscilação Duplo Oito [12] (Adaptado)

Normalmente, o conjunto de oscilações disponíveis em manipuladores e robôs antropomórficos é limitado a um pequeno número. Além disso, raros são os equipamentos que permitem a determinação de oscilações customizadas e variação de velocidade dentre os seus segmentos. Neste trabalho, buscamos oferecer boa flexibilidade nesse aspecto, como será detalhado adiante.

## 2.5 Correção de trajetórias

A correção de trajetórias em equipamentos automáticos para soldagem tem sido amplamente abordada na literatura. Sua relevância ancora-se principalmente na viabilização do seguimento de juntas, seja pela sua disposição em eixo não linear, por falhas de usinagem e alinhamento ou pelas alterações geométricas sofridas pelas peças durante o processo de soldagem em razão do calor do arco elétrico.

Sempre presente nesse tipo de soldagem, o arco elétrico pode ter seus atributos monitorados, como corrente ou tensão. De fato, diversos trabalhos utilizam essa monitoração para correção automática [26] [27]. A corrente de soldagem é diretamente afetada pela Distância entre o Bico de Contato e a Peça [28], também conhecida por seu acrônimo, DBCP. Estimando a DBCP com base nessa medição, determina-se também uma aproximação da geometria da junta em relação à tocha de soldagem, permitindo assim o seguimento. A Figura 8 mostra um cordão obtido com essa técnica. Além da DBCP, propôs-se a utilização do sensor de arco rotacional, em que o eletrodo gira conforme se movimenta ao longo da junta [29], para a estimativa e correção da inclinação da tocha [30] e também para a detecção do ponto final do cordão [31].

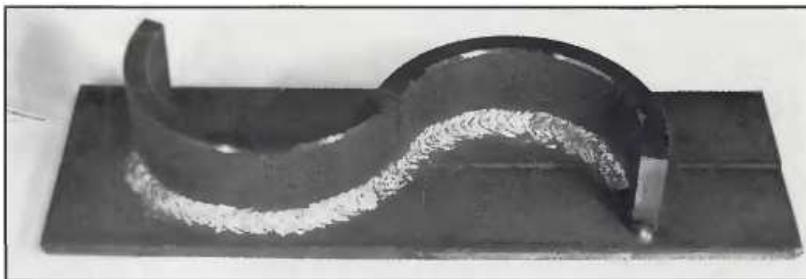


Figura 8 Cordão obtido com seguimento automático da junta, através dos dados obtidos do sensor de arco [28]

O sensor de arco pode ser usado em outros tipos de juntas [32], como as com chanfro em V. Para esse tipo de soldagem, um controlador foi proposto [18] com o objetivo de reagir a desalinhamentos, desníveis e variações na largura do vão entre as peças (Figura 9). Nesse controlador, eram operadas as variáveis de: corrente, velocidade de alimentação do arame, amplitude de oscilação, comprimento de avanço e recuo do *switch back* e velocidade de soldagem. Todas elas foram levadas em consideração para o controle da largura e altura do passe de raiz, com resultados satisfatórios.

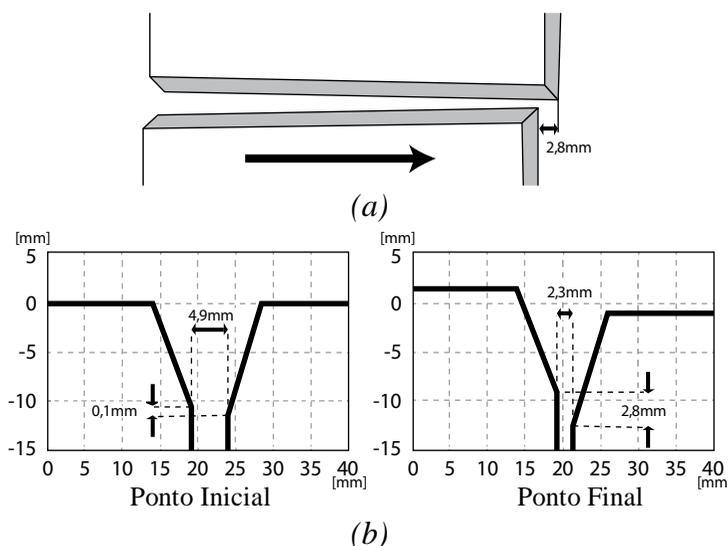


Figura 9 Soldagem de união de peças com chanfro em V: vista superior do desalinhamento em (a) e lateral dos desníveis e afastamentos em (b) [18] (Adaptado)

Além do sensor de arco, outros sensores podem ser adicionados à célula de soldagem. Para lidar com superfícies irregulares em soldagens ao longo das circunferências interna e externa de rodas para tratores agrícolas, utilizou-se [20] sensores indutivos que corrigiam, durante a execução, a distância entre a tocha e a chapa. Sem que houvesse contato com a peça, os sensores afixados à tocha determinavam o afastamento ou aproximação entre elas, de forma que essa distância permanecesse sempre dentro dos limites mínimo e máximo estabelecidos.

Outra técnica amplamente utilizada combina a emissão de um feixe laser com a captura da imagem refletida. Já em 1983 [33], utilizava-se sensores óticos para guiar a tocha de soldagem ao longo da linha da junta, com um arranjo como o da Figura 10. Diversos trabalhos utilizaram, posteriormente, visão computacional para o seguimento de juntas [24] [34] [35], inclusive para sistemas teleguiados, em que o operador manipula a tocha remotamente, propícios para ambientes hostis, como locais com radiação nuclear ou subaquáticos [36]. Além do seguimento de junta, o sensor que capta o feixe de laser refletido pode ser utilizado para a medição do volume do chanfro [37], permitindo a adaptação do equipamento de soldagem a seus desvios geométricos e garantindo o total preenchimento da junta.

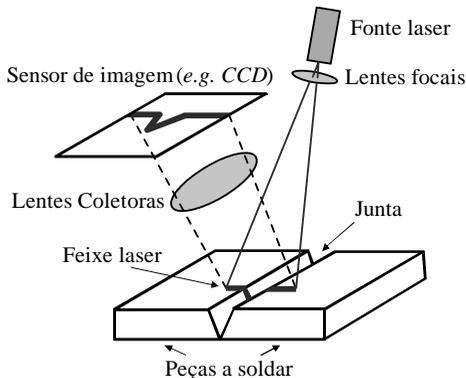


Figura 10 Sensor de imagem e laser para seguimento de junta [38]

Abordagens compostas por mais de um sensor também foram propostas, combinando sensor de arco com visual [39], ou um operador humano e sensor visual [40]. O emprego de operadores humanos pode ser considerado uma abordagem multissensorial, já que eles são capazes de captar imagem, áudio e vibrações. Com efeito, tentou-se absorver a técnica de soldadores [40], que ainda não são substituíveis em situações

em que somente a experiência é capaz de produzir soldagens de qualidade. Através do monitoramento visual da poça de soldagem ao mesmo tempo em que o operador utilizava um *joystick* para controlar a tocha, como ilustra a Figura 11, estabeleceu-se um modelo de controle da corrente de soldagem com base nas informações coletadas. A aplicação desse modelo ocasionou níveis de penetração adequados, apesar das diferentes condições de soldagem empregadas.

A correção manual de trajetórias, embora seja dificultosa em sistemas CNC (Comando Numérico Computacional) como Mach3 [41], é contemplada em praticamente todos os equipamentos de deslocamento de tocha. Entretanto, a possibilidade de implantação da correção automática é encontrada somente em algumas marcas de robôs industriais dedicados a soldagem.

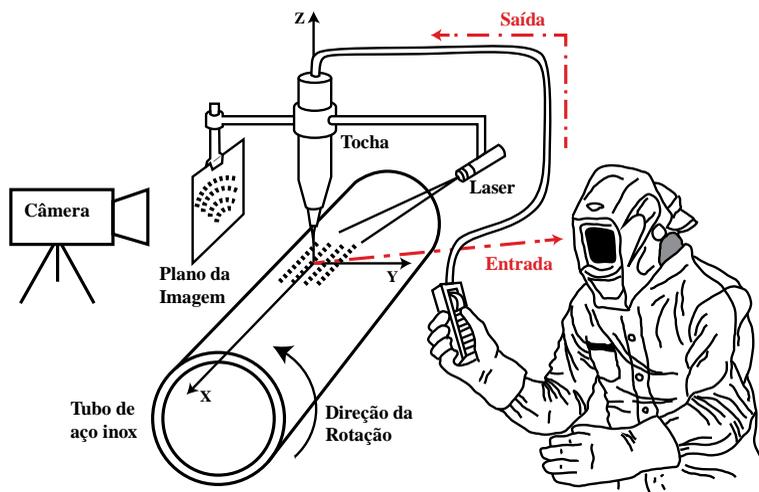


Figura 11 Operador humano controlando correções durante soldagem [40]

## 2.6 Sincronismo

O sincronismo do sistema de execução de trajetórias permite que, durante a realização do cordão, seja alterado o conjunto de parâmetros da fonte de soldagem. Isso possibilita, por exemplo, a variação de corrente ou tensão de operação conforme a geometria da oscilação, dando maior liberdade de experimentação de estratégias que busquem os melhores atributos para determinada aplicação. De fato, esse procedimento é explorado em alguns trabalhos, especialmente a inversão de polaridade no eletrodo. A razão disso está ligada às

consequências do sentido da corrente elétrica nos resultados obtidos, que alteram a transferência metálica, a taxa de fusão de arame e geometria do cordão de solda resultante [42].

A utilização do eletrodo com polaridade positiva possibilita uma penetração profunda, desejável em soldagens de união de chapas grossas, e um arco estável. Já o eletrodo em polaridade negativa ocasiona um menor aquecimento no metal base e aumento na quantidade fundida de arame. Por essas razões, em soldagens de união, a polaridade negativa no eletrodo é mais adequada para chapas finas [43] e chanfros maiores, pois deposita mais material de adição e funde menos a chapa, evitando mordeduras e perfurações. A alternância de polaridade durante a soldagem possibilita a obtenção de maior qualidade quando as juntas ou a espessura das chapas mudam ao longo da soldagem [44].

Em soldagens de revestimento, cordões de solda devem ser justapostos para cobrir uma superfície. A geometria resultante da soldagem com o eletrodo em polaridade negativa, entretanto, não é propícia para esse tipo de procedimento, embora a baixa penetração normalmente obtida seja vantajosa. Com formato circular em sua seção transversal, o cordão resultante da soldagem com o eletrodo em CC- (Corrente Contínua, polaridade negativa - Figura 12a inferior) tende a provocar a ocorrência de áreas não preenchidas pelo material de adição e de outras com ausência de fusão no metal de base. Essas características indesejáveis comprometem a qualidade do resultado, favorecendo a ocorrência de corrosão e fissuras que diminuem a vida útil do revestimento. Por outro lado, a geometria do cordão resultante da soldagem com o eletrodo em CC+ (Figura 12a superior) é adequada para a colocação de cordões adjacentes. Contudo, a penetração obtida com essa configuração é demasiadamente alta.

Com a finalidade de agregar as vantagens da aplicação de ambas as polaridades no eletrodo, propôs-se [5] a sincronia da trajetória com a inversão de polaridade conforme a Figura 12b. A região central da oscilação triangular é executada com polaridade negativa, para que ocorra baixa penetração na maior parte do cordão. Já nas extremidades, para evitar a excessiva convexidade, utiliza-se polaridade positiva. Assim, obtém-se um resultado com baixa penetração e com geometria adequada à justaposição de outros cordões (Figura 12c), características ideais para soldagens de revestimento.

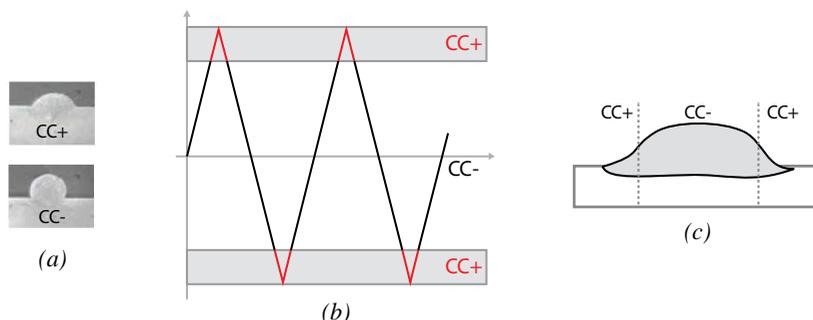


Figura 12 Em (a) seção transversal de cordões com eletrodo em polaridade positiva e negativa; em (b) estratégia para melhorar soldagens de revestimento; em (c) polaridades aplicadas por área da seção transversal [5] (Adaptado)

Tal estratégia só pode ser efetivada de forma parametrizável se houver ciência do controle de trajetórias sobre a alternância do sinal que causa a troca de polaridade na fonte de soldagem. No trabalho [4], por exemplo, o sinal que define o sentido do movimento no eixo longitudinal em oscilação *switch back*, enviado pelo controlador, é também enviado como sinal de sincronização da trajetória com a fonte de soldagem, responsável pela inversão de polaridade. Para o caso da Figura 12b isso não seria possível, já que não há inversão de sentido nos instantes de permuta entre CC- e CC+. Sensores de posição talvez fossem capazes de solucionar adequadamente o problema, embora sejam pouco flexíveis a diferentes configurações de oscilação e dos momentos em que ocorre a alternância de parametrização da fonte. No trabalho aqui proposto, a troca poderá ocorrer em qualquer instante do ciclo de oscilação, como será mostrado adiante.



### 3 MANIPULADOR DE SOLDAGEM

Neste capítulo, serão apresentadas as principais características mecânicas, seção 3.1, e eletroeletrônicas, seção 3.2, que influenciam na modelagem computacional do sistema de execução de trajetórias sobre o manipulador de soldagem desenvolvido. O manipulador cartesiano e seu gabinete eletroeletrônico foram projetados visando à correta integração com os outros componentes do sistema da Figura 13, para viabilizar procedimentos de soldagem.

Os projetos foram conduzidos para que, com baixo custo de desenvolvimento, fosse flexível o suficiente para abranger uma gama de aplicações em soldagens de união e revestimento. Outras características buscadas foram: uma boa rigidez e a alta dinâmica da estrutura mecânica para permitir o aumento da produtividade e ainda propiciar a experimentação de diferentes trajetórias com a possibilidade de correções de seus parâmetros durante a execução.

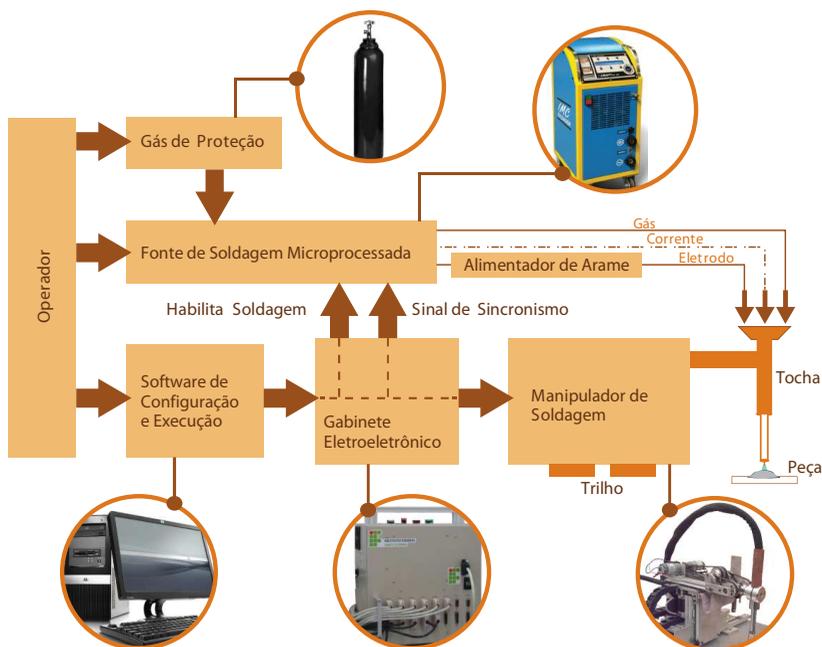


Figura 13 Equipamentos envolvidos no sistema de soldagem automática desenvolvido [45]

Nesse sistema, para executar um determinado procedimento, o operador insere os parâmetros de soldagem GMAW na fonte (velocidade de arame, tensão ou corrente elétrica, etc.) e os de movimento no computador (tipo de trajetória, velocidade de soldagem, tempos de parada, amplitude, frequência de oscilação, etc.). Além disso, é possível alternar programas de soldagem de forma sincronizada com o movimento de oscilação da tocha através sinal digital de sincronismo entre o gabinete eletroeletrônico do manipulador e a fonte de soldagem.

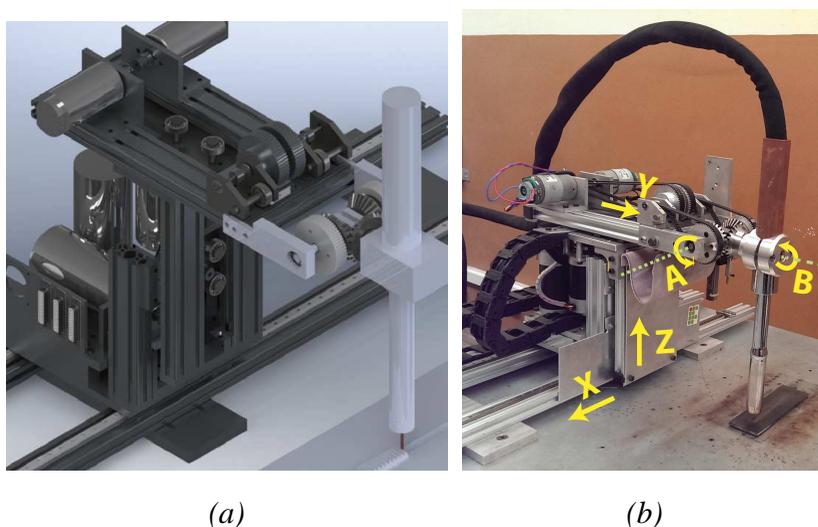
A determinação da trajetória é feita no software executado em um computador com porta paralela. Uma série de trajetórias sem oscilação, ou com oscilações transversais, longitudinais e combinadas estão disponíveis para utilização, além da possibilidade de adição de oscilações customizadas. Os parâmetros da trajetória definidos pelo operador podem ser ainda alterados manualmente após o início da execução da trajetória. Isso permite que a tocha acompanhe eventuais alterações geométricas da junta que sejam percebidas durante a execução da soldagem.

Os comandos digitais enviados através da porta paralela pelo software chegam ao gabinete eletroeletrônico, que realiza as adaptações necessárias nos sinais e os encaminha aos servos *drivers*, responsáveis pela execução dos comandos através da movimentação dos motores. Além de atuar na interface com os servos *drivers*, o gabinete encaminha ainda os sinais digitais de comunicação com a fonte de soldagem.

A seguir serão abordadas as características mecânicas pertinentes a este trabalho e, na sequência, as eletroeletrônicas.

### 3.1 Desenvolvimento Mecânico

O manipulador cartesiano, Figura 14, possui um espaço de trabalho (XZY) de 875 x 100 x 175 mm e cinco graus de liberdade distribuídos ao longo de uma cadeia cinemática mista: três eixos lineares da cadeia cinemática em série para posicionamento (XZY), seguidos por dois rotacionais da cadeia cinemática paralela para a orientação (A e B) da tocha [8]. Ele é capaz de executar trajetórias filetadas e também com oscilação longitudinal e/ou transversal com as técnicas de puxar ou empurrar a poça de fusão. Além disso, ele foi projetado para operar tanto em campo quanto em plantas industriais, podendo ser instalado em qualquer posição: plana, horizontal, vertical, etc. O trilho sobre o qual o manipulador se movimenta é modular, permitindo que o eixo X seja prolongado através da conexão de outros segmentos.



(a) (b)  
 Figura 14 Em (a) Modelo CAD; em (b) protótipo construído, com a indicação dos eixos

Na Figura 14b são indicados os cinco graus de liberdade do manipulador. Conforme mencionado, os três eixos da cadeia cinemática em série, XZY, são responsáveis pelo posicionamento da tocha. Durante as oscilações, eles são comandados de forma coordenada de acordo com a trajetória e os parâmetros determinados no software, conforme será pormenorizado na seção 4.2.

Os dois eixos da cadeia cinemática paralela, todavia, são responsáveis por determinar a orientação da tocha. Em um mecanismo diferencial com três engrenagens cônicas, duas ligadas aos motores via polia e correia dentada e a terceira acoplada ao suporte da tocha de soldagem, conforme Figura 15, dois tipos de movimentos são comandados. Quando ambas as engrenagens ligadas aos motores giram no mesmo sentido ao redor do eixo X, produzem um movimento na direção vertical, ou *pitch*, como ilustrado na Figura 15a, que corresponde ao movimento angular A na Figura 14b. Já quando essas mesmas engrenagens giram em sentidos opostos ao redor do eixo X, direcionam a tocha em outra direção, *roll*, conforme ilustrado na Figura 15b, que corresponde ao movimento angular B, Figura 14b. Assim, as técnicas de empurrar ou puxar a peça de soldagem podem ser empregadas, além de permitir o controle de orientação da tocha em trajetórias em eixo circular, como será explicado na seção 4.2.8.

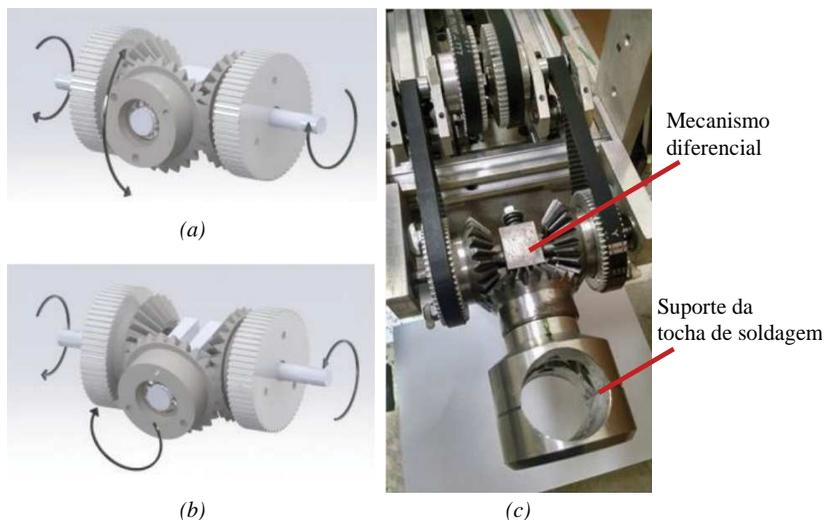


Figura 15 Mecanismo mecânico de orientação da tocha de soldagem:  
 (a) *pitch* (b) *roll* (c) Fotografia do manipulador [8]

### 3.2 Desenvolvimento Eletroeletrônico

Os dispositivos do sistema eletroeletrônico do manipulador de soldagem estão interligados de acordo com o diagrama da Figura 16. As setas grossas representam as conexões de alimentação e sinais de potência, enquanto que as setas finas são sinais de comando de baixa intensidade. Além do acionamento dos cinco eixos no braço mecânico, há um freio eletromagnético que prende o eixo X quando o manipulador de soldagem for desabilitado via circuito de proteção. Essa segurança é fundamental principalmente quando se está operando nas posições de soldagem vertical e sobrecabeça.

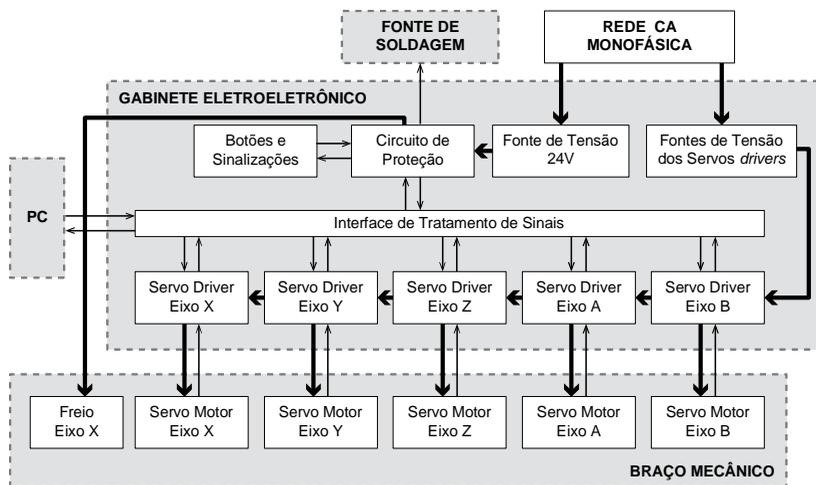


Figura 16 Diagrama do sistema eletroeletrônico do manipulador de soldagem

No gabinete eletroeletrônico da Figura 17, estão contidos os servos *drivers*, os circuitos de potência e a interface de tratamento de sinais que efetua a lógica de proteção dos servos *drivers* e a adaptação dos sinais recebidos do computador para que sejam encaminhados a eles e à fonte de soldagem. A comunicação entre o computador e o gabinete é realizada através da porta paralela do PC. Sua utilização se justifica pela possibilidade de comandar simultaneamente todos os eixos através de comandos digitais de posição e velocidade [7], deixando o gerenciamento das curvas de aceleração, velocidade e malhas de controle por conta dos servos *drivers*.

Os sinais digitais da porta paralela do computador acionam simultaneamente os servos *drivers* dos cinco servos motores do braço mecânico, habilitam e desabilitam a soldagem, e determinam a sincronia dos parâmetros de soldagem com o movimento de oscilação da tocha. A segurança do sistema é garantida por um circuito de proteção, como mostra a Figura 18. Os servos *drivers* e a fonte são desabilitados e o computador é notificado (EMERG) se qualquer uma de três condições for satisfeita: (1) botão de emergência pressionado pelo operador; (2) algum dos servos *drivers* reportar erro; e (3) sinal de habilitação (HAB) enviado pelo software for interrompido. Esse sinal, que é periódico, busca evitar que a máquina opere indevidamente a partir de fontes de comandos digitais não autorizadas.

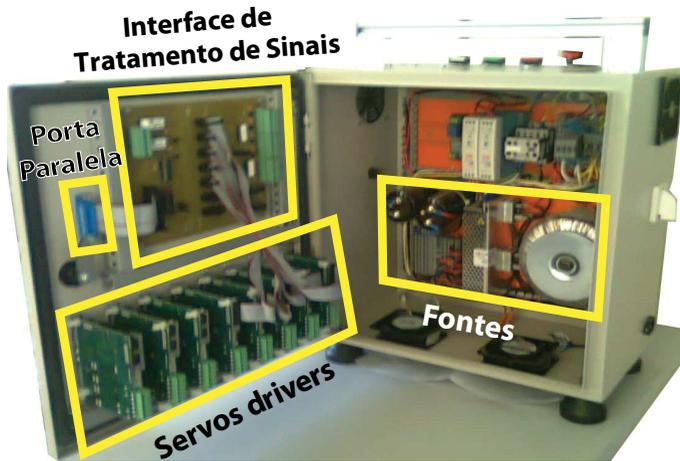


Figura 17 Gabinete Eletroeletrônico com indicação dos principais componentes

Também por segurança, o sinal de habilitação do arco elétrico só é enviado à fonte de soldagem se todas as seguintes condições forem satisfeitas: (1) Botão de habilitação do arco no gabinete estiver acionado (botão branco); (2) Circuito de proteção não tiver detectado qualquer problema; e (3) *Software* enviar sinal de habilitar a fonte pela porta paralela (ARC). Além desse sinal, o *software* envia pela porta paralela o sinal de sincronismo da trajetória com a fonte de soldagem (SYNC), que é retransmitido diretamente a ela.

A comunicação com os servos *drivers* ocorre através do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). Nesse protocolo, um dispositivo mestre (*Master*) inicia a comunicação gerando um sinal digital periódico (CLK) que determina quando devem ser lidos os bits transmitidos de forma serial pelo sinal MOSI (*Master Output Slave Input*). A resposta do dispositivo escravo (*Slave*) ocorre pelo sinal MISO (*Master Input Slave Output*) com base naquele mesmo sinal periódico gerado pelo mestre. O computador, no sistema desenvolvido, opera no papel de mestre e cada driver no de escravo. O sinal CLK, ou *clock*, é comum para todos os servos *drivers*. Já o sinal MOSI de cada um deles é ligado a um pino distinto da porta paralela. Isso permite que comandos específicos a cada um sejam entregues a todos eles precisamente no mesmo instante.

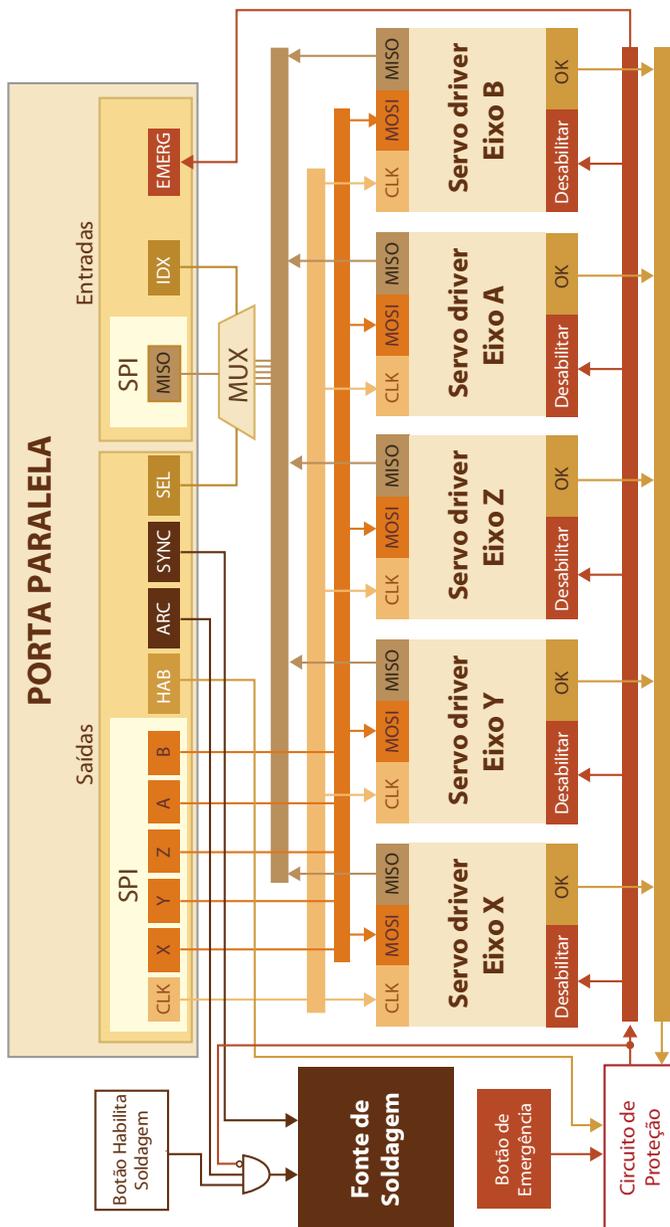


Figura 18 Detalhamento do acionamento do manipulador e da fonte de soldagem [44]

O número limitado de pinos de entrada na porta paralela motivou a multiplexação do retorno de informações dos drivers, evitando a necessidade de ocupação de uma quantidade de pinos igual ao número de eixos, que pode potencialmente chegar a sete. Para alternar o servo *driver* cuja resposta será lida na entrada MISO da porta paralela do computador, um sinal é enviado à placa eletrônica para selecioná-lo (SEL), e outro (IDX) é retornado para sinalizar quando o primeiro da sequência está ativo. Assim, o software é capaz de escolher de qual servo *driver* será lida a resposta qualquer que seja o estado inicial: basta alternar o valor lógico em SEL até ser notificado por IDX de que o primeiro está ativo. A partir de então, aplica-se um número determinado de inversões no sinal em SEL para se chegar ao driver desejado e ler sua resposta.

## 4 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

Este capítulo abordará os aspectos envolvidos no projeto e desenvolvimento do *software* de configuração e execução das trajetórias. O capítulo está subdividido em quatro seções, que vêm logo após uma descrição do processo de utilização do software com o intuito de executar um cordão de solda. Na primeira seção, 4.1, a estrutura geral do *software* será introduzida, incluindo a descrição de seus principais módulos e, em especial, comunicação e *homing*. Em seguida, seção 4.2, serão abordadas as questões envolvidas na determinação das trajetórias e nas transformações a que elas são submetidas a fim de adequá-las aos parâmetros determinados pelo usuário. Na seção 4.3 as correções serão discutidas e, por fim, a questão do sincronismo da trajetória com a fonte de soldagem será abordada na seção 4.4.

O *software* para parametrização e execução de trajetórias é utilizado nos procedimentos de inicialização do manipulador, na determinação dos parâmetros necessários à execução de trajetórias e sincronismo com a fonte, e na sua efetiva execução. A Figura 19 reproduz uma tela do software. Assim que o programa é iniciado e a conexão é especificada (para o caso de haver mais de uma porta paralela no computador), a aba “Status” é apresentada com o resultado da tentativa de comunicação com os servos *drivers* e a resposta dada por cada um deles. Caso algum servo *driver* notifique erro na inicialização, o circuito eletroeletrônico do gabinete deve ser verificado e reinicializado.

O primeiro procedimento a ser executado, assim que o software for iniciado e estabelecer com sucesso a comunicação com o gabinete eletroeletrônico, é a busca de zeros, ou *homing*, através do botão “Buscar Zeros” posicionado na parte superior esquerda da tela. Como inicialmente a posição dos eixos é indeterminada, suas posições iniciais devem ser encontradas para que sejam estabelecidas as referências de posicionamento. Somente após concluída a busca de zeros, o software permite a movimentação do braço mecânico. Do contrário, os limites de curso dos eixos poderiam ser alcançados e, se isso ocorresse com alta velocidade, poderiam ocorrer danos em componentes mecânicos.

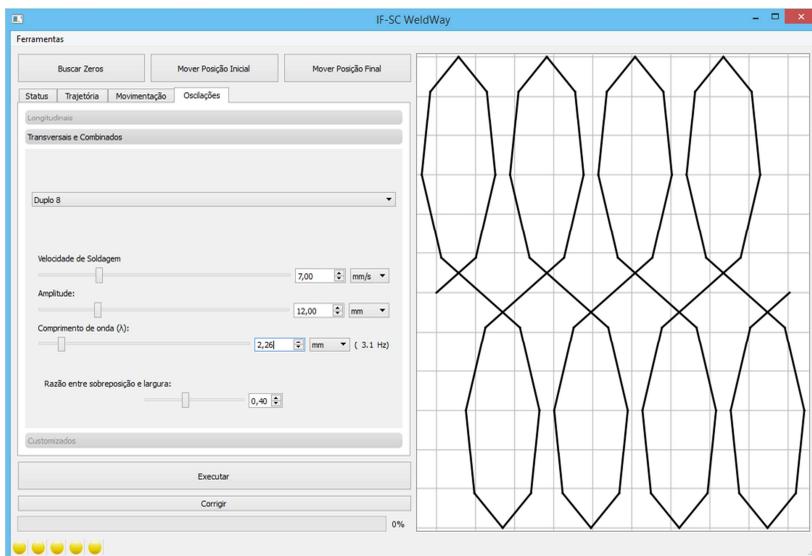


Figura 19 Tela do *software*

Em seguida, deve-se determinar os pontos inicial e final da trajetória, caso ela seja linear, ou o centro e o ponto inicial, caso seja circular. Para fazê-lo, o operador pode movimentar o braço robótico através da entrada de coordenadas, na aba “Movimentação”, ou manualmente através do teclado do computador. Alcançada a posição desejada, ele deve atribuí-la ao início, centro ou final da trajetória, na aba “Trajetória”. Os pontos podem ser quaisquer dentro da área de trabalho, e o vetor determinado por eles indica o eixo ao redor do qual a trajetória será traçada, caso ela seja linear. A distância entre o centro e ponto inicial indica o raio, caso a trajetória seja circular. Além disso, o software permite a determinação da orientação da tocha, para puxar ou empurrar a poça de fusão, e de um ângulo de rotação da trajetória em torno desse eixo longitudinal, funcionalidade que é especialmente útil em soldagens fora de posição. Definidos esses parâmetros, o braço pode ser deslocado diretamente às posições marcadas através dos botões “Mover Posição Inicial” e “Mover Posição Final”.

Os parâmetros referentes ao início e final, ou início e centro da trajetória, e a rotação ao redor do eixo longitudinal são comuns a todas as trajetórias, assim como também é a determinação da velocidade de soldagem. Os demais parâmetros a serem definidos são específicos a cada uma. Estão disponíveis as trajetórias longitudinais: filetada e *switch back* (sem oscilação ou com oscilação apenas na direção paralela

ao eixo da trajetória); as transversais triangular e trapezoidal (com oscilação na direção perpendicular ao eixo da trajetória); e as combinadas circular, duplo oito e triangular com *switch back* (com oscilação em ambas as direções), além das customizadas.

As correções durante a execução podem ser feitas pelo teclado do computador para os parâmetros comuns a todas as trajetórias, como velocidade de soldagem e deslocamentos nos eixos Y e Z, ou pela interface gráfica, redefinindo os parâmetros e os enviando para processamento através do botão “Corrigir”.

#### 4.1 Modelagem do software

O *software*, escrito na linguagem C++, foi projetado com orientação a objetos e padrões de projeto [46], a fim de facilitar futuras extensões e manutenção. Além da biblioteca padrão do C++, STL (*Standard Template Library*), utilizou-se também as bibliotecas *Boost* [47] para funções auxiliares e acesso ao sistema operacional e Qt [48] para interface gráfica. Essas bibliotecas foram escolhidas principalmente por sua portabilidade, permissão de uso gratuito e familiaridade do autor com sua utilização.

Os módulos do *software* foram dispostos conforme ilustrado pela Figura 20. Nela, cada módulo se comunica apenas com os que estão diretamente abaixo e acima de si. No nível mais básico, está a comunicação com a porta paralela, que estabelece uma conexão na porta determinada pelo usuário e encaminha os sinais enviados pelas camadas superiores. Sobre ela estão os protocolos de comunicação com a fonte de soldagem, que gerencia apenas os bits de abertura do arco e sincronia com a fonte, e com os servos drivers, responsável pela montagem dos comandos de movimentação, pela solicitação de informações de estado dos servos *drivers* e pela manutenção do sinal de habilitação (HAB na Figura 18), que é periódico e enviado durante todo tempo de conexão. Os comandos de movimentação são de velocidade, em rotações por minuto (rpm), e de posição, em número de pulsos dos *encoders* afixados aos servos motores. As informações de estado podem ser referentes à movimentação (parado, movimentando e buscando zero) e de indicação de erros (comando inválido, baixa tensão, erro de seguimento). Além disso, todos os pacotes contêm um código CRC (*Cyclic Redundancy Check*), para detecção de erros de comunicação.

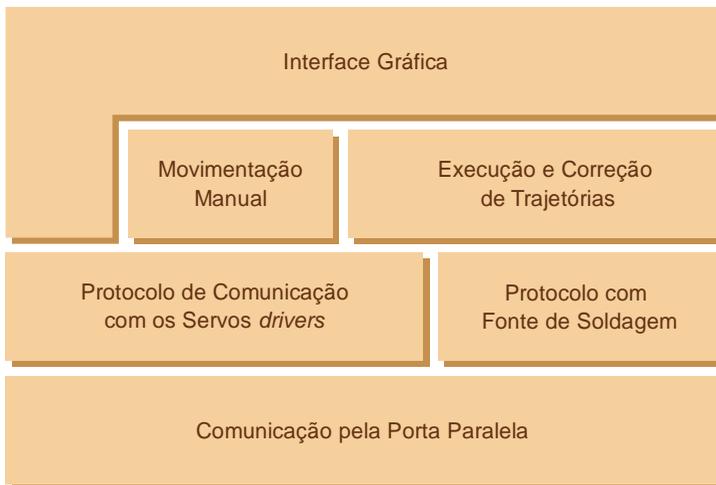


Figura 20 Disposição funcional dos módulos de *software*

Todo evento de iniciativa do usuário é gerado através do módulo de interface gráfica. Ele pode solicitar o estado dos servos drivers diretamente ao protocolo de comunicação ou solicitar ao módulo de movimentação manual que o braço mecânico realize o procedimento de busca de zeros ou se desloque a uma posição absoluta ou relativa à atual, processos esses que não geram comunicação com a fonte de soldagem. Além disso, é o módulo de interface gráfica que solicita ao módulo de execução e correção de trajetórias o início ou o cancelamento de um procedimento de soldagem, aí sim com a abertura do arco elétrico e eventual sincronia com a fonte.

#### 4.1.1 Comunicação

O *software* comunica-se com os servos *drivers* que controlam os servos motores e a fonte soldagem. O protocolo de comunicação com os servos *drivers*, em nível físico, consiste no SPI, conforme explicado na seção 3.2. Em nível lógico, os comandos do ANEXO 1 são enviados juntamente com códigos de detecção de erros. Já com a fonte de soldagem, apenas dois sinais digitais são atualmente interligados: um para acionamento e desligamento do arco elétrico e outro para seleção entre dois possíveis conjuntos de parâmetros. A fonte de soldagem utilizada em nossos experimentos, entretanto, aceita até três bits de seleção, totalizando oito opções. O *software* foi projetado considerando a possibilidade de futura expansão nesse canal de comunicação.

Como é notável na Figura 20, o módulo de Comunicação pela Porta Paralela pode receber comandos de diversas fontes a qualquer momento: Interface Gráfica, Movimentação Manual (teclado) e Execução e Correção de Trajetórias. Além disso, um fluxo de execução perene enquanto houver conexão entre o *software* e o gabinete eletroeletrônico mantém o sinal de presença do *software*, HAB na Figura 18. Como a porta paralela é um ponto único de saída, deve haver um controle para evitar condições de corrida, ou seja, que mais de um fluxo de execução, ou *thread*, escreva ao mesmo tempo na região de memória com a informação que é enviada a cada instante naquela porta. Sempre que essa região de memória é escrita, novos dados são repassados como sinal digital nos pinos da porta paralela.

Quando uma escrita é feita, o *software* entrega o controle ao Sistema Operacional, *Windows*, que é quem de fato estabelece o sinal comandado na porta paralela. Esse processo, somado ao sobrecusto na manutenção de diversas *threads* e ao tamanho de um comando de velocidade e outro de posição, de 128 bits, dura ao menos dois milissegundos. Essa demora limita o comprimento mínimo de um segmento que o sistema é capaz de comandar, a depender da velocidade estabelecida para a trajetória. Para velocidades altas, isso pode impossibilitar a realização de segmentos muito curtos. Essa limitação, todavia, não inviabiliza a execução de trajetórias de soldagem. Como o calor do arco mantém a poça fundida num raio de alguns milímetros, pequenas imprecisões no traçado são toleráveis e não comprometem o cordão de solda.

#### 4.1.2 *Homing*

A busca de zeros, primeiro procedimento a ser realizado logo após a conexão com os *drivers*, ocorre através do deslocamento em baixa velocidade dos motores em um sentido pré-determinado. Quando o fim de curso é alcançado, o movimento do respectivo eixo no servo motor é interrompido. Seu servo *driver* percebe, nesse momento, que cessam os incrementos do *encoder* e, com base nisso, infere ser a posição inicial daquele eixo, concluindo seu procedimento de *homing*. Isso é feito seguindo uma ordem específica, Figura 21, pois os eixos da cadeia cinemática paralela, que definem a orientação da tocha, podem bater em outras partes do braço mecânico se acionados simultaneamente, frustrando a detecção de seu ponto inicial.

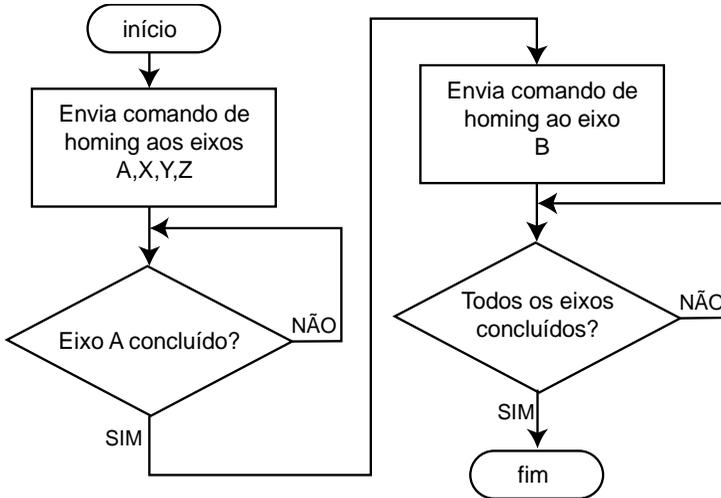


Figura 21 Fluxograma com o procedimento de busca de zeros

## 4.2 Trajetórias

O Executor de Trajetórias é o responsável pela efetiva execução das oscilações. As relações entre as classes referentes à execução e correção de trajetórias são mostradas no Diagrama de Classes UML (*Unified Modeling Language*) da Figura 22. As classes que definem as trajetórias são todas especializações da classe base “Trajetória”, que é agregada pela classe “Executor de Trajetórias” ao realizar um procedimento de soldagem. Essa última depende ainda da classe “Protocolo de Comunicação”, descrito na seção 4.1.1, para enviar os comandos ao gabinete eletroeletrônico. A classe “Trajetória” agrega também uma “Transformação”, de acordo com a disposição do eixo longitudinal escolhida pelo usuário.

Instâncias da classe Trajetória devem prover um conjunto de informações pré-determinado. Elas são necessárias para que o Executor de Trajetórias realize o procedimento corretamente. As principais são o ponto inicial, para onde o braço robótico é enviado antes da execução, e a lista de pontos. Para cada ponto, devem ser fornecidas as três coordenadas cartesianas, os dois ângulos de orientação da tocha, a velocidade resultante de movimentação e informações de sincronismo,

conforme a Tabela 1. As questões relativas ao sincronismo serão discutidas mais adiante, na seção 4.4.

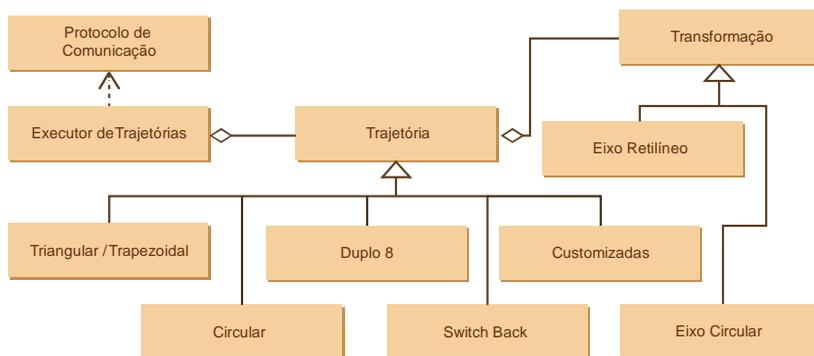


Figura 22 Diagrama das classes envolvidas na definição e execução de trajetórias

Posição (CP)	Tocha	Velocidade	Sincronismo
$(x,y,z)$	$(\alpha,\beta)$	$v_r$	$(p,v)$

Tabela 1 Informações fornecidas pelas instâncias de Trajetória ao Executor de Trajetórias para cada ponto

A execução começa, Figura 23, depois de ativada a soldagem na fonte e da espera de um intervalo configurável, normalmente em torno de dois segundos, para que o gás de proteção crie a atmosfera adequada antes da abertura do arco elétrico. A isso segue o processamento de todos os pontos da trajetória. Esse processamento começa com a determinação do tempo que levará para que o comando seguinte seja enviado, seguido pela decomposição da velocidade em cada eixo e a adequação do valor obtido para que, quando executado, ele seja o valor da velocidade média, considerando os períodos de aceleração e desaceleração nas extremidades do segmento. Esse valor é então enviado aos servos *drivers* para execução, juntamente com a posição de destino do segmento. Na sequência, trata-se do sincronismo e da espera até o envio do próximo comando.

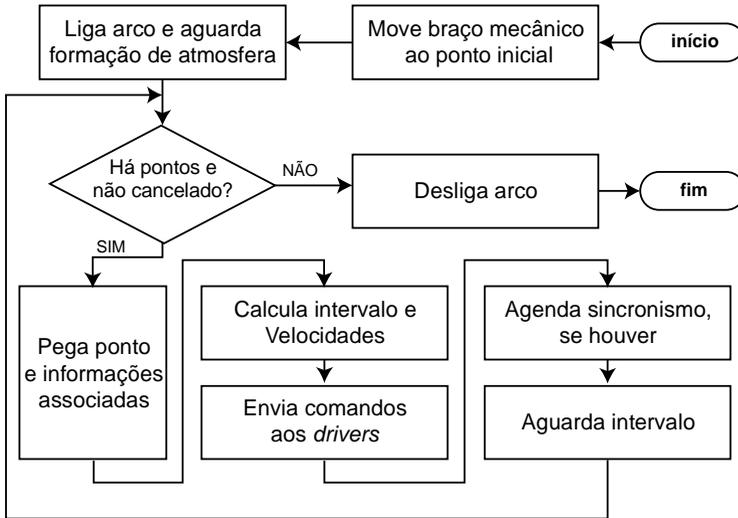


Figura 23 Fluxograma do procedimento principal no Executor de Trajetórias

Para determinar o tempo de envio do próximo comando deve-se encontrar, primeiramente, o vetor de deslocamento  $\vec{d}$ , subtraindo do comando de posição CP a posição atual PA, ou seja,  $\vec{d} = CP - PA$ . O tempo buscado é então igual a  $t = |\vec{d}|/v_r$ . Depois de concluído o envio, o Executor de Trajetórias aguarda um tempo igual a  $t$  menos o tempo de envio de cada comando, para que o intervalo seja o mais próximo possível do calculado.

Já para decompor a velocidade resultante em cada eixo linear (XZY), multiplica-se o vetor unitário  $\vec{d}/|\vec{d}|$  pela velocidade resultante  $v_r$ , ou seja,  $\vec{v} = v_r \vec{d}/|\vec{d}|$ . As três velocidades encontradas, entretanto, não consideram a curva de aceleração e desaceleração nas extremidades. Caso enviássemos o comando dessa forma, a distância esperada não seria alcançada, pois o tempo entre os comandos seria insuficiente para concluir sua execução, e o comando seguinte se sobreporia ao anterior, truncando os segmentos de reta da trajetória. Isso seria notável especialmente em altas velocidades. Para que a distância esperada seja percorrida no tempo determinado, mas considerando os períodos de aceleração e desaceleração, o comando de velocidade deve ser mais alto do que o calculado. Para encontrar a velocidade a ser comandada ( $v_c$ ), utilizamos um modelo aproximado [2] que considera a aceleração

constante até  $v_c$  ser alcançada, cujo gráfico horário da velocidade é um trapézio isósceles. A área sob a curva corresponde à distância percorrida. Assim, equivalendo-a à área retangular (quando a aceleração é infinita), chega-se ao valor de  $v_c$ . A Figura 24 ilustra os dois gráficos e a Equação (1), aplicada a cada componente da velocidade  $\vec{v}$ , determina as velocidades a serem enviadas aos servos *drivers*.

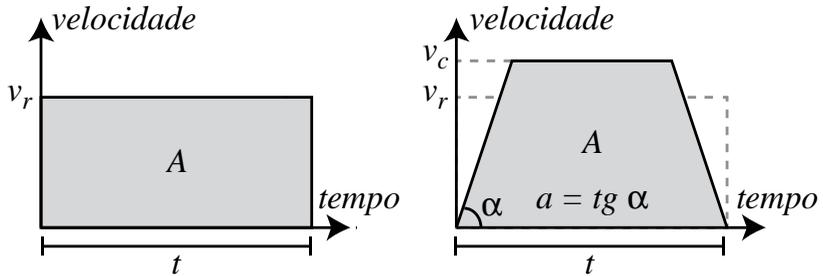


Figura 24 Gráficos horários da velocidade para a obtenção da velocidade a ser comandada

$$v_c = \frac{at - \sqrt{a^2 t^2 - 4av_r t}}{2} \quad (1)$$

No momento de sua construção, as instâncias de trajetórias recebem uma instância de “Transformação”, que são responsáveis pela determinação e aplicação das matrizes pelas quais serão multiplicados os pontos construídos pela Trajetória. Dessa forma, a transformação torna-se alheia à trajetória sobre a qual ela terá efeito, possibilitando que seja aplicada a qualquer conjunto de pontos, inclusive os oriundos de trajetórias customizadas definidas pelo usuário. As transformações serão detalhadas mais adiante. Aquelas aplicadas às trajetórias em eixo longitudinal retilíneo serão abordadas na seção 4.2.7, enquanto as em eixo circular, na seção 4.2.8.

Além das transformações, as Trajetórias recebem os parâmetros que são específicos a cada uma, como amplitude, frequência e tempos de parada. A partir disso, elas geram um conjunto de pontos no plano, a partir da origem e no sentido crescente do eixo X, que depois serão transformados aplicando a transformação adequada. Os pontos com coordenadas x, y e z resultantes desse processo são os utilizados pelo executor de trajetórias no momento da execução.

Na sequência, detalhamos as oscilações oferecidas para utilização no software e as transformações pelas quais elas precisam sofrer a fim de se adequarem aos parâmetros determinados pelo usuário.

#### 4.2.1 *Switch back*

Nossa implementação do *switch back* é similar ao indicado na Figura 4b. Entretanto, a escolha para as velocidades de avanço e recuo é mais flexível. Permitimos, além da definição da velocidade de soldagem e comprimento de avanço, que é necessariamente igual ao dobro do de recuo, a determinação de um parâmetro adimensional que representa a razão  $r$  entre as velocidades de recuo  $v_r$  e de avanço  $v_a$ , ou seja,  $r = v_r/v_a$ . Assim, fica a critério do usuário a escolha entre avanço mais ou menos veloz do que o recuo. Na Figura 4b, em que os tempos de avanço e recuo são iguais, o valor de  $r$  seria de 0,5. A Figura 25 reproduz a tela do software onde o *switch back* é configurado, e a Equação (2) indica os valores das velocidades de avanço e recuo conforme a razão mencionada  $r$  e a velocidade de soldagem  $v_s$ .

$$v_a = \frac{(1 + 2r)v_s}{r} \qquad v_r = (1 + 2r)v_s \qquad (2)$$

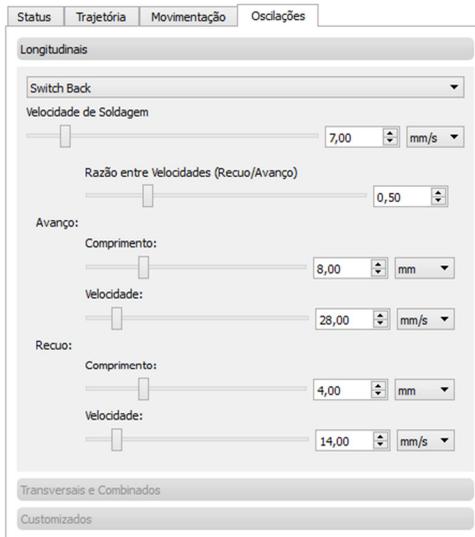


Figura 25 Tela de configuração da trajetória *switch back*

## 4.2.2 Triangular e Trapezoidal

A trajetória triangular foi implementada como um caso especial da trapezoidal em que não há parada do eixo transversal nas extremidades. Os parâmetros, visíveis na Figura 26, além de permitirem as configurações comuns às oscilações transversais: velocidade, amplitude e comprimento de onda, também facultam a determinação da geometria das extremidades. Os comprimentos dos segmentos paralelos ao eixo longitudinal nas partes superior e inferior da oscilação são definidos em valores percentuais, em relação ao comprimento de onda. Além disso, também é oferecida a possibilidade de determinação de velocidades diferenciadas nesses segmentos, através de um parâmetro multiplicador, que é aplicado sobre a velocidade dos demais segmentos, aqueles que não fazem parte das extremidades. Essa opção busca oferecer ao usuário a possibilidade de manipulação dos efeitos da velocidade nas bordas do cordão de solda produzido, com vistas à melhoria da sua geometria e à redução de mordeduras.

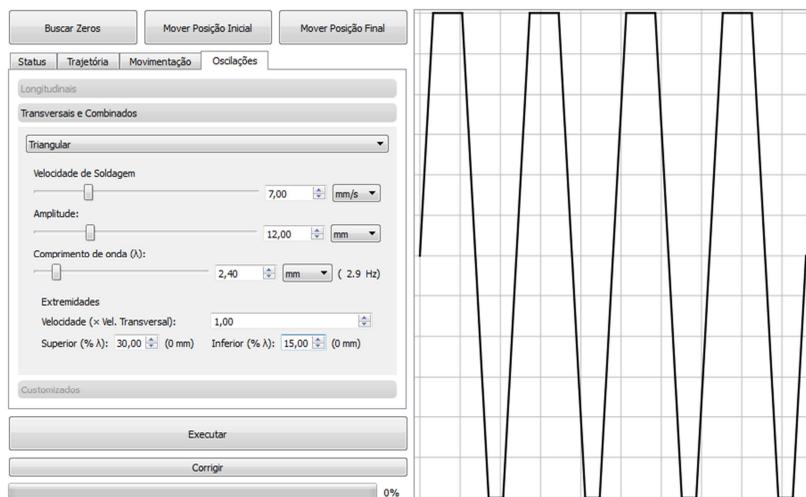


Figura 26 Tela de configuração das trajetórias Triangular e Trapezoidal

Definido o modelo, é necessário ainda determinar as coordenadas e velocidades resultantes para cada segmento, já que elas podem variar conforme o parâmetro multiplicador de velocidade nas extremidades. Essas velocidades são calculadas com base nos parâmetros definidos pelo usuário: velocidade de soldagem  $v_s$ , amplitude  $A$ , comprimento de onda  $\lambda$ , fator de multiplicação da velocidade nas extremidades  $m$  e

percentuais superior  $p_s$  e inferior  $p_i$  que determinam o comprimento dos segmentos das extremidades. Os módulos das velocidades interna  $v_i = |\vec{v}_i|$  e externa  $v_e = |\vec{v}_e|$  são dependentes dos demais parâmetros, que correspondem aos trechos indicados na Figura 27, que ilustra um ciclo da oscilação e aponta os parâmetros relacionados. Pela figura, observa-se que o primeiro avanço no sentido longitudinal  $d_x$  é igual ao comprimento de onda  $\lambda$  menos os trechos das extremidades, tudo dividido por quatro, ou  $d_x = \lambda[1 - (p_s + p_i)]/4$ . Daí já se pode obter todas as coordenadas da oscilação, que poderia ser representada pelos vetores:  $[d_x A/2]$ ,  $[\lambda p_s 0]$ ,  $[2d_x - A]$ ,  $[\lambda p_i 0]$  e  $[d_x A/2]$ .

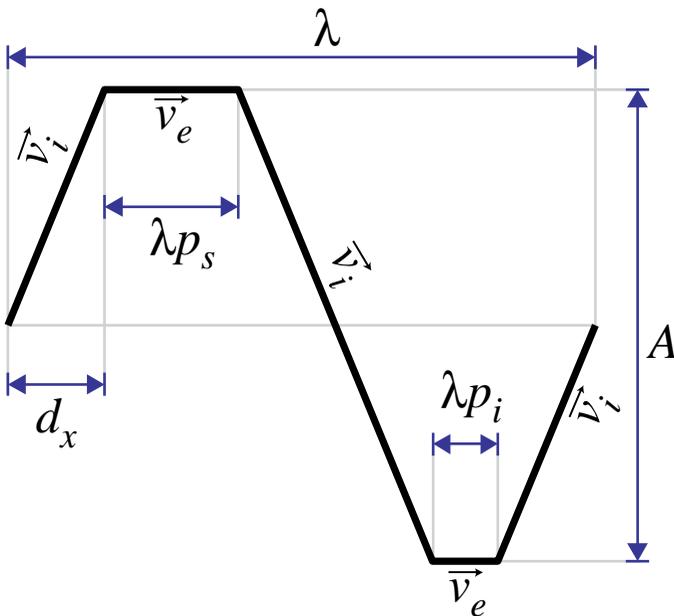


Figura 27 Parâmetros para o cálculo das velocidades da ferramenta nas oscilações trapezoidal e triangular

Resta ainda determinar as velocidades resultantes de cada trecho em função dos parâmetros fornecidos pelo usuário. O comprimento total percorrido com velocidade  $v_i$ , ou seja, nos segmentos que não fazem parte das extremidades é, como se observa da figura, igual a  $4|d_x A/2|$ . Para chegarmos à velocidade, resta encontrar o tempo que leva para que esse deslocamento se realize. Esse tempo  $t_i$  é igual ao período de duração de um ciclo  $T$  menos o tempo gasto nas extremidades  $t_e$ , ou

$t_i = T - t_e$ . O tempo gasto nas duas extremidades é igual à soma de seus comprimentos dividida pela velocidade com que são executadas, ou  $t_e = \lambda(p_s + p_i)/v_e$ . Pela definição,  $v_e = mv_i$ , então  $t_e = \lambda(p_s + p_i)/(mv_i)$ . Sabe-se ainda que  $T = \lambda/v_s$ . Com isso, chega-se ao valor de  $v_i$  em função das variáveis conhecidas, conforme a Equação (3). Conhecido  $v_i$ , basta multiplicá-lo por  $m$  para obter  $v_e$ , concluindo o processo.

$$v_i = \frac{4 \left| \left[ d_x \frac{A}{2} \right] \right|}{T - \frac{\lambda(p_s + p_i)}{mv_i}} \quad \therefore \quad (3)$$

$$v_i = \frac{v_s}{\lambda} \left( \sqrt{4A^2 + [\lambda(1 - (p_s + p_i))]^2} + \frac{\lambda(p_s + p_i)}{m} \right)$$

A trajetória triangular, como já mencionado, é apenas um caso especial quando  $p_s = p_i = 0$ . De fato, substituindo esses valores na Equação (3), chegar-se-ia ao comprimento total da oscilação dividido pelo período, ou  $v_i = |[\lambda \quad 2A]|/T$  para todos os segmentos.

### 4.2.3 Triangular com *Switch Back*

A trajetória triangular com *switch back* foi inspirada em trabalhos que propuseram a anexação de um dispositivo mecânico para oscilação transversal da tocha enquanto, na direção longitudinal, uma trajetória *switch back* é realizada [18] [24]. Nossa abordagem, entretanto, faz um caminho pré-determinado, conforme os parâmetros determinados pelo usuário.

A Figura 28 ilustra a determinação desse caminho. Assim como no *switch back*, o comprimento de avanço é igual ao dobro do comprimento de recuo. A diferença é que ambos são realizados com oscilação triangular, sendo o recuo através de um caminho pelo qual o avanço não tenha passado. O ciclo seguinte, todavia, se sobrepõe à segunda metade do ciclo de avanço anterior. A intenção é causar o espalhamento da poça no trecho sobre o qual a tocha tenha passado há mais tempo. Também como no *switch back*, o usuário determina a velocidade de soldagem e a razão entre as velocidades de recuo e avanço. Além desses parâmetros, há ainda a determinação da amplitude da oscilação e a quantidade de oscilações transversais por ciclo. Os parâmetros podem ser vistos na reprodução da tela do *software* da Figura 29.

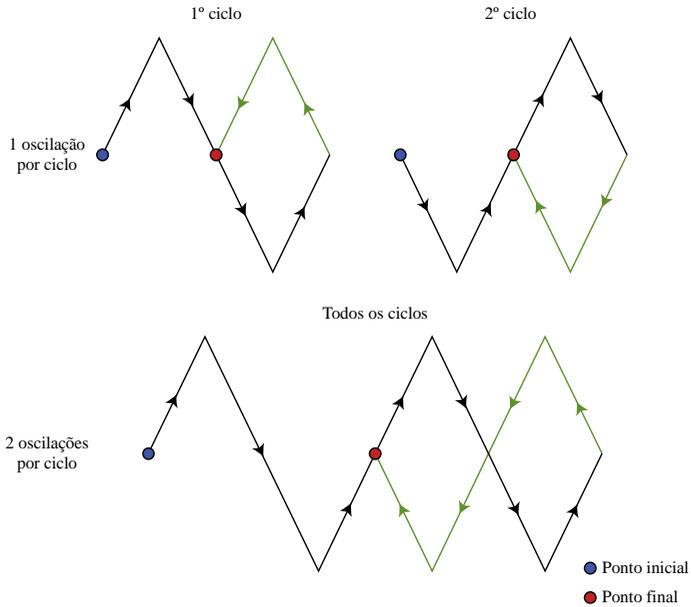


Figura 28 Caminho da tocha na trajetória Triangular com *Switch Back*

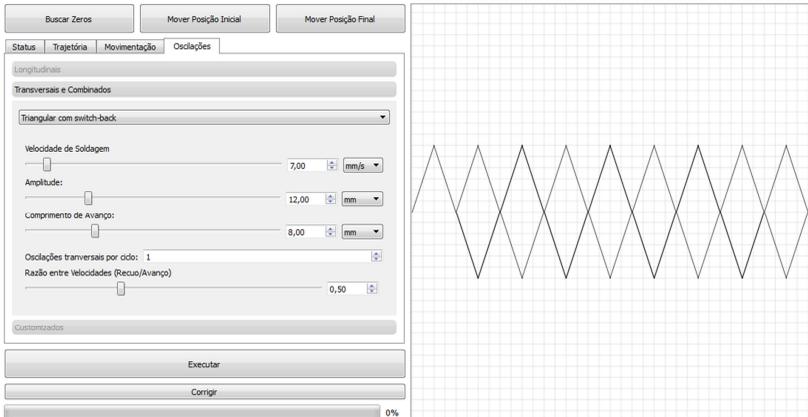


Figura 29 Tela de determinação dos parâmetros da trajetória Triangular com *Switch Back*

A quantidade de oscilações transversais por ciclo determina o número de ciclos da oscilação triangular que ocorre na etapa de avanço dessa trajetória. A etapa de recuo se dá com a metade desse valor. Quando essa quantidade é um número ímpar, a geometria de cada ciclo é igual à do anterior refletida no eixo X, como mostra a parte superior da Figura 28. Quando é par, todos os ciclos possuem a mesma geometria.

As coordenadas são determinadas da mesma maneira como explicado na seção 4.2.2, com a diferença de que não há as regiões de parada do eixo transversal nas extremidades. O primeiro ciclo de uma trajetória triangular com *switch back* com uma oscilação transversal por ciclo, adotando as mesmas variáveis da Figura 27, poderia ser representada pelos vetores:  $[dx \ A/2]$ ,  $[2dx \ -A]$ ,  $[dx \ A/2]$ ,  $[-dx \ A/2]$  e  $[-dx \ -A/2]$ . As velocidades de soldagem no avanço e recuo são calculadas da mesma forma que na trajetória *switch back*, conforme Equação (2). Entretanto, é ainda necessário calcular a velocidade da ferramenta, que é a requerida para envio ao módulo Executor de Trajetórias. Ela é proporcional às velocidades de soldagem. Considerando o comprimento de avanço igual a  $c$  e o número de oscilações transversais por ciclo igual a  $n$ , o fator dessa proporcionalidade seria  $n|[c \ 2A]|/c$ . A Equação (4) mostra como são obtidos o valor da velocidade da ferramenta no avanço  $v_{fa}$  e recuo  $v_{fr}$ .

$$v_{fa} = \frac{n\sqrt{c^2 + 4A^2}}{c} v_a \quad v_{fr} = \frac{n\sqrt{c^2 + 4A^2}}{c} v_r \quad (4)$$

#### 4.2.4 Circular

A trajetória circular é bastante empregada por soldadores por tratar-se de um movimento manual simples e por propiciar um espalhamento uniforme da poça de soldagem. Com o intuito de definirmos o modelo matemático para obtenção das coordenadas dessa trajetória, partimos, inicialmente, de uma trajetória elipsoide. Assim poderíamos parametrizar livremente os valores de amplitude, comprimento de onda e sobreposição entre os ciclos. Isso não seria possível numa trajetória estritamente circular, já que, nesse caso, há dependência entre os parâmetros mencionados. Imaginando uma partícula em trajetória elipsoide em um referencial, e sendo o conjunto deslocado de maneira unidirecional a uma velocidade constante em outro, a trajetória resultante da partícula nesse segundo referencial seria precisamente a que buscamos, como mostra a Figura 30.

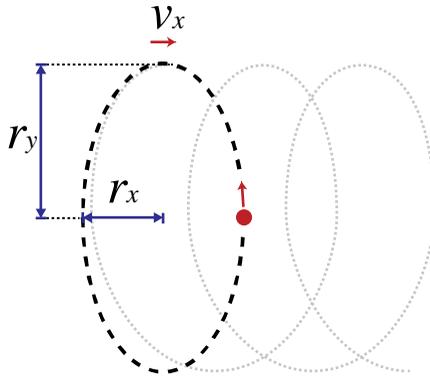


Figura 30 Formação da trajetória circular com base em movimento elipsoide

A equação paramétrica da elipse, sendo a variável independente igual a  $\theta$ , é definida pela Equação (5)a. A velocidade da partícula seria, portanto, a sua derivada, conforme Equação (5)b.

$$\begin{cases} x(\theta) = r_x \cos(\theta) \\ y(\theta) = r_y \sin(\theta) \end{cases} \quad \begin{cases} x'(\theta) = -r_x \sin(\theta) \\ y'(\theta) = r_y \cos(\theta) \end{cases} \quad (5)$$

(a) (b)

Adicionando a velocidade de deslocamento constante  $v_x$  no componente horizontal da velocidade, chega-se à Equação (6)a. Por fim, integrando a velocidade para voltarmos à equação paramétrica da posição, chega-se à Equação (6)b, que corresponde à trajetória que buscamos para a oscilação da tocha de soldagem.

$$\begin{cases} x'(\theta) = v_x - r_x \sin(\theta) \\ y'(\theta) = r_y \cos(\theta) \end{cases} \quad \begin{cases} x(\theta) = \theta v_x + r_x \cos(\theta) \\ y(\theta) = r_y \sin(\theta) \end{cases} \quad (6)$$

(a) (b)

Todavia, a equação obtida é ainda insatisfatória, pois deseja-se definir a trajetória através de outros parâmetros: amplitude ( $A$ ), comprimento de onda ( $\lambda$ ) e sobreposição entre ciclos ( $\rho$ ). Este último parâmetro adimensional consiste na razão entre a largura do avanço da tocha sobre o ciclo anterior ( $s$ ) e a largura resultante da forma elipsoide ( $l$ ), conforme Equação (7)a. Os parâmetros são mostrados na Figura 31.

Nela, o valor de  $\rho$  seria de aproximadamente  $1/3$ . Também pela figura, é fácil perceber a relação entre a amplitude e  $r_y$ , conforme Equação (7)b.

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{s}{l} & r_y &= \frac{A}{2} \end{aligned} \quad (7)$$

(a) (b)

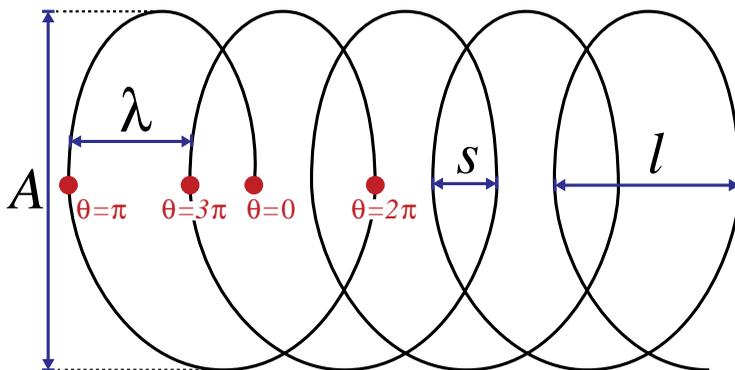


Figura 31 Parâmetros de comprimento na trajetória circular

Pela Figura 31, percebe que  $\lambda = x(3\pi) - x(\pi)$ ,  $s = x(0) - x(3\pi)$  e  $l = x(0) - x(\pi)$ . Seus valores são encontrados substituindo a variável independente  $\theta$  na Equação (6)b. Assim, chega-se a  $\lambda = 2\pi v_x \therefore v_x = \lambda/2\pi$ ,  $s = 3\pi v_x - 2r_x$  e  $l = \pi v_x - 2r_x$ . Substituindo  $v_x$  em  $s$  e  $l$ , e os valores obtidos na Equação (7)a, chega-se a uma relação com apenas as incógnitas  $\lambda$ ,  $r_x$  e  $\rho$ , conforme Equação (8)a. Substituindo-a juntamente com a Equação (7)b na Equação (6)b, chega-se finalmente na definição da trajetória com os parâmetros desejados, conforme Equação (8)b.

$$\begin{aligned} r_x &= \frac{\lambda(3-\rho)}{4(1-\rho)} & \begin{cases} x(\theta) = \lambda \left[ \frac{\theta}{2\pi} + \frac{3-\rho}{4-4\rho} \cos(\theta) \right] \\ y(\theta) = \frac{A}{2} \text{sen}(\theta) \end{cases} \end{aligned} \quad (8)$$

(a) (b)

Atribuindo diferentes valores para  $\rho$ , percebe-se mais claramente sua função. Na Figura 32, manteve-se constante os valores de  $A$  e  $\lambda$ , e variaram-se os valores de  $\rho$  e do intervalo de variação do parâmetro  $\theta$

com o qual cada ponto foi calculado, ou  $\Delta\theta$ . Conforme  $\rho$  vai aumentando, maior é a sobreposição de cada ciclo sobre o anterior, o que ocasionaria diferentes efeitos no cordão de solda gerado. Quanto ao  $\Delta\theta$ , quanto menor seu valor, maior é a resolução da geometria gerada. Este último parâmetro tem implicação na capacidade temporal do sistema de prover novos pontos.

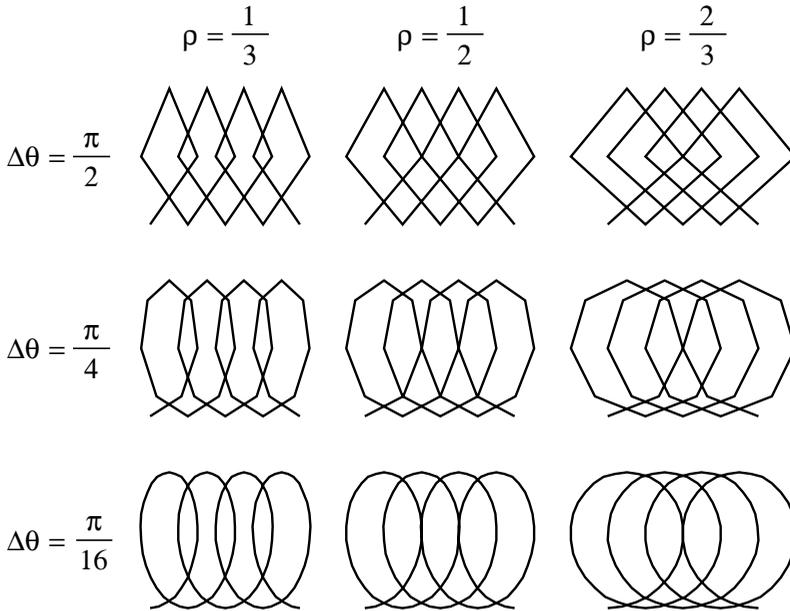


Figura 32 Variação de parâmetros na geração da trajetória circular

Determinadas as coordenadas da trajetória, é necessário ainda estabelecer a velocidade resultante dos segmentos. No caso da trajetória circular, não há variação de velocidade. Basta, portanto, somar os comprimentos de todos os segmentos e dividir o resultado pelo período, obtido da divisão do comprimento de onda ( $\lambda$ ) pela velocidade de soldagem ( $v_s$ ).

### 4.2.5 Duplo Oito

A oscilação em duplo oito é uma versão simétrica da trajetória circular, que possibilita o espalhamento da poça de soldagem a partir do eixo central do cordão, com especial aplicabilidade no intuito de aumentar sua largura, característica desejável em soldagens de revestimento. A trajetória é obtida da mesma forma que a circular, com a diferença de que cada ciclo é composto por dois ciclos da circular, com o segundo refletido no eixo X, como mostra a Figura 33. A obtenção da velocidade resultante dos segmentos se dá da mesma forma que a trajetória circular. A tela de configuração dessa trajetória é reproduzida na Figura 19.

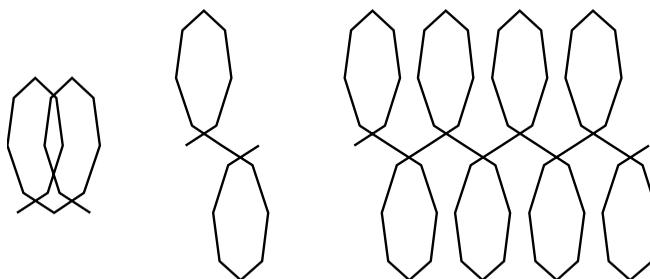


Figura 33 Formação da trajetória duplo oito com base na circular

### 4.2.6 Customizadas

Além das trajetórias descritas, permitimos ainda que o usuário crie suas próprias oscilações. Elas são necessárias para a obtenção de resultados diversos ou no emprego de outros processos, principalmente com injeção de material não simétrico ou coaxial. Dentre esses processos, poder-se-iam citar o TIG alimentado, PTA-P com canal injetor ou processos híbridos.

A reprodução da tela na Figura 34 mostra uma trajetória criada arbitrariamente, com o auxílio da tela gráfica em que se podem mover os vértices e arestas da forma que melhor aprouver ao operador. A geometria das oscilações customizadas é definida em relação a seu comprimento de onda e amplitude. Elas só ganham dimensão quando, antes de sua execução, o usuário determina esses comprimentos, como mostra a Figura 35.

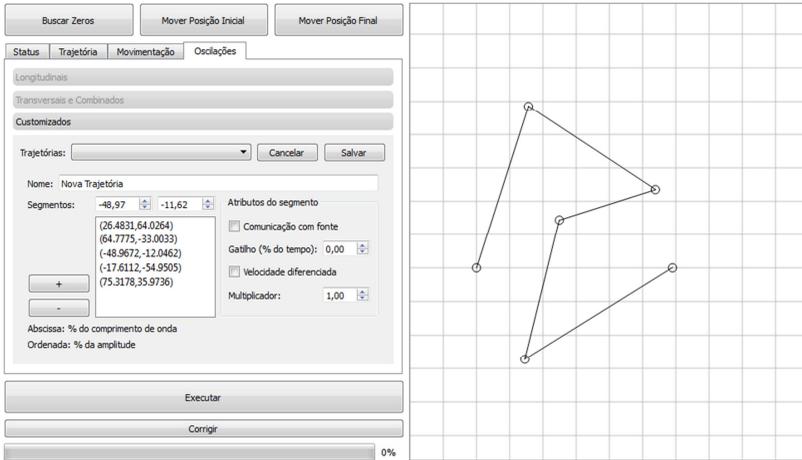


Figura 34 Edição de uma nova trajetória customizada

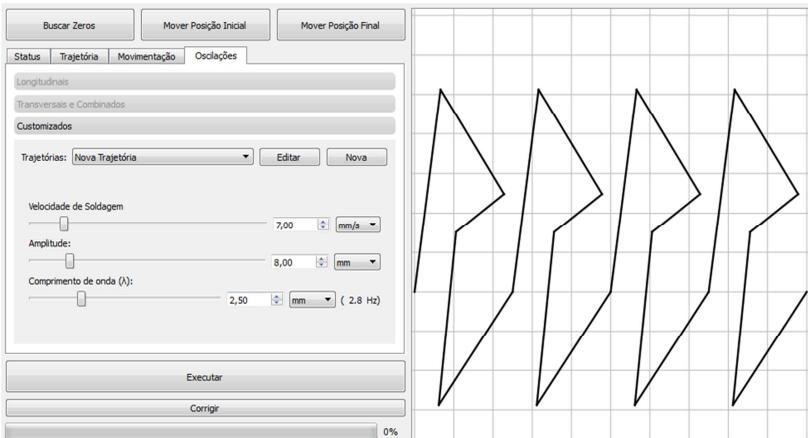


Figura 35 Utilização da nova trajetória criada pelo usuário

Para cada aresta, é possível determinar ainda uma informação de sincronia com a fonte de soldagem, que será mais bem detalhado na seção 4.4. Similar ao multiplicador de velocidade nas extremidades da trajetória trapezoidal, seção 4.2.2, pode-se atribuir esse mesmo parâmetro a qualquer segmento das trajetórias customizadas. Isso permite que, no momento da execução, a velocidade da ferramenta em cada segmento possa ser diversa das demais, o que permite a experimentação de variadas abordagens na condução da poça de

soldagem. Isso gera, contudo, a necessidade de se calcular a velocidade da ferramenta para cada segmento da trajetória customizada.

O comprimento de onda  $\lambda$  e a velocidade de soldagem  $v_s$  são fornecidos pelo usuário. Daí, já se sabe o período  $T$  de cada ciclo, igual a  $T = \lambda/v_s$ . Esse período deve ser igual à soma do tempo de execução  $t_i$  de cada segmento  $\vec{s}_i$  de um total de  $N$ , ou  $T = \sum_{i=1}^N t_i$ . O módulo da velocidade de execução  $v_i$  de cada um deles é igual ao multiplicador  $m_i$  determinado pelo usuário, vezes uma velocidade de referência  $v_r$ , que devemos encontrar, ou  $v_i = m_i v_r$ . O tempo de execução  $t_i$  de cada segmento é, portanto, igual a  $t_i = |\vec{s}_i|/(m_i v_r)$ . Assim, manipulando as fórmulas conforme Equação (9) chega-se ao valor de  $v_r$  e, por consequência, às velocidades de cada segmento. Cumpre notar que a Equação (9) é o caso geral da Equação (3).

$$T = \sum_{i=1}^N \frac{|\vec{s}_i|}{m_i v_r} \therefore \frac{\lambda}{v_s} = \frac{1}{v_r} \sum_{i=1}^N \frac{|\vec{s}_i|}{m_i} \therefore v_r = \frac{v_s}{\lambda} \sum_{i=1}^N \frac{|\vec{s}_i|}{m_i} \quad (9)$$

De posse das coordenadas e das velocidades por segmento, a trajetória customizada pode então ser executada pelo módulo Executor de Trajetórias como qualquer outra. Da mesma forma que as demais, ela está sujeita à mesma etapa de transformações, seja ao redor do eixo longitudinal, em plano inclinado ou em eixo circular.

#### 4.2.7 Rotação das Trajetórias e Plano Inclinado

As trajetórias precisam ser pré-processadas antes do seu envio aos servos *drivers* a fim de adequá-las à determinação dos pontos inicial e final do cordão, especificados em cada execução. Além disso, possibilitamos a determinação de um ângulo de inclinação do plano da trajetória ao redor do seu eixo longitudinal, com o intuito de permitir a execução de soldagens fora de posição. Na Figura 36, por exemplo, há variação nas três coordenadas retangulares entre os pontos inicial e final. Além disso, o plano da trajetória foi inclinado em  $45^\circ$  para permitir uma distribuição adequada do calor do arco durante a oscilação da tocha.

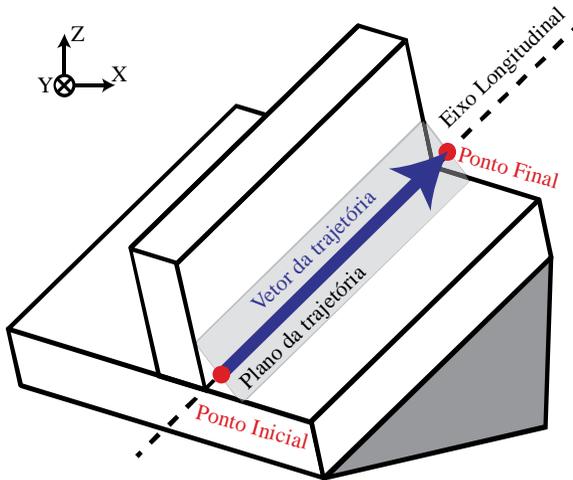


Figura 36 Exemplo de solda de união em superfície inclinada e sistema de coordenadas de referência do manipulador

Esse processamento é feito através da multiplicação de uma matriz de rotação a cada uma das coordenadas da trajetória, gerando o ponto final a ser enviado. Matrizes de rotação possuem a propriedade de poderem ser combinadas através de multiplicação de matrizes. A matriz resultante desse produto é equivalente à aplicação sucessiva de cada uma das matrizes que a compuseram, respeitando, todavia, a ordem da multiplicação. Isso permite que se estabeleça uma sequência de rotações que culminam na transformação final. Cada rotação pode ser definida pelo vetor ao redor do qual ela será realizada e um ângulo que quantifica a revolução. Quando esse vetor é um dos eixos cartesianos, a matriz de rotação tem um formato padrão, facilitando sua determinação. Um meio pelo qual rotações tridimensionais consecutivas podem ser definidas é através dos ângulos de Euler (APÊNDICE 1).

No nosso caso, aplicamos inicialmente a rotação ao redor do eixo longitudinal com base em um parâmetro angular ( $\alpha$ ) determinado pelo usuário em função do tipo de junta que estiver utilizando. A tela com as informações fornecidas pelo usuário é reproduzida na Figura 37. A trajetória, inicialmente definida no plano XY na direção do eixo X, Figura 38a, é girada num ângulo  $\alpha$  em torno dele, Figura 38b.

Status	Trajectoria	Movimentação	Oscilações
<b>Eixo Longitudinal Retilíneo</b>			
<input type="button" value="Marcar Posição Inicial"/>		X:	200,00
		Y:	60,00
		Z:	0,00
		<input type="button" value="Inverter Sentido"/>	
<input type="button" value="Marcar Posição Final"/>		X:	500,00
		Y:	120,00
		Z:	90,00
Unidade:		mm	
Ângulo ao redor do eixo X:		45,00	°
Orientação horizontal da tocha:		12,00	°
Orientação vertical da tocha:		0,00	°
<b>Eixo Longitudinal Circular</b>			

Figura 37 Tela de configuração dos pontos inicial e final e ângulo ao redor do eixo longitudinal

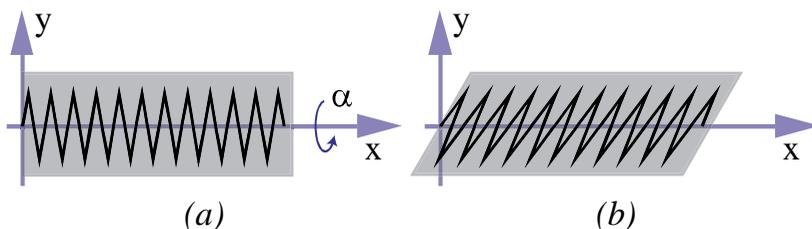


Figura 38 Inclinação da trajetória ao redor do eixo longitudinal

Em seguida, as rotações aplicadas buscam alinhar o eixo longitudinal da trajetória aos pontos inicial e final determinados pelo usuário, indicados na Figura 36. Como trabalhamos apenas com trajetórias planares, apenas duas rotações são suficientes para alinhar o eixo longitudinal da trajetória com o vetor determinado pelos pontos inicial (PI) e final (PF), ou  $\vec{u} = PF - PI$ , conforme Figura 39.

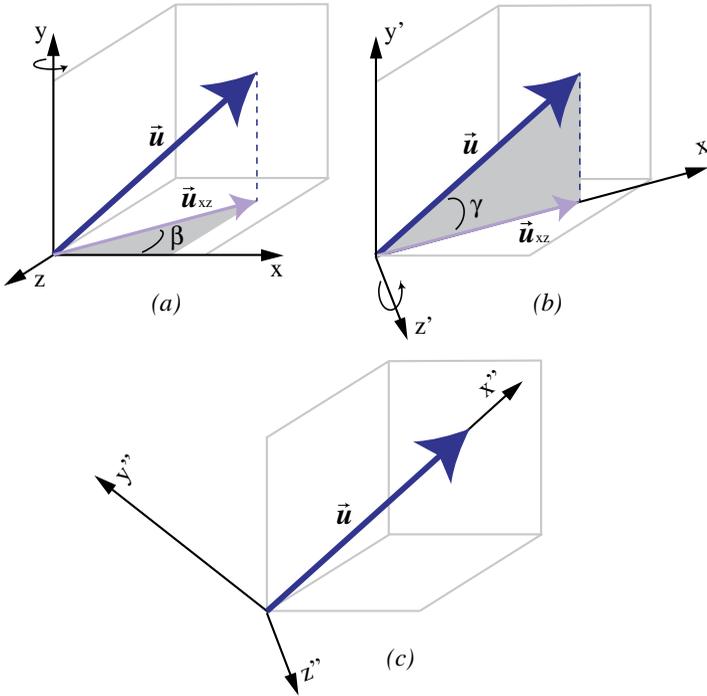


Figura 39 Rotações para adequar a trajetória ao vetor determinado pelos pontos inicial e final

A matriz resultante, conforme Equação (10), é similar à determinada no APÊNDICE 1, alterando apenas os eixos ao redor dos quais cada rotação é feita. Determinado o formato da matriz, é ainda necessário calcular os ângulos. Conforme mencionado, o ângulo de rotação ao redor do eixo longitudinal ( $\alpha$ ) é determinado pelo usuário. Resta então a determinação de  $\beta$  e  $\gamma$ . Como se observa na Figura 39a, o ângulo  $\beta$  é formado entre o eixo  $x$  e a projeção de  $\vec{u}$  no plano XZ, ou  $\vec{u}_{xz}$ , que é facilmente determinado a partir de  $\vec{u}$ . Supondo  $\vec{u} = [u_x \ u_y \ u_z]$  então  $\vec{u}_{xz} = [u_x \ 0 \ u_z]$ . Assim,  $\beta$  é o ângulo tal que  $\text{sen}(\beta) = u_z/|\vec{u}_{xz}|$  e  $\text{cos}(\beta) = u_x/|\vec{u}_{xz}|$ . Quanto a  $\gamma$ , pela Figura 39b, é o ângulo tal que  $\text{sen}(\gamma) = u_y/|\vec{u}|$  e  $\text{cos}(\gamma) = |\vec{u}_{xz}|/|\vec{u}|$ . Com tais informações, é possível determinar de forma inequívoca os valores de  $\beta$  e  $\gamma$ , sem ambiguidades quanto ao quadrante. Finalmente, obtém-se a matriz de rotação resultante,

substituindo os ângulos na Equação (10) e efetuando a multiplicação das matrizes.

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \gamma & \sin \gamma \\ 0 & -\sin \gamma & \cos \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & 0 \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Determinada a matriz de transformação  $M = A\gamma \cdot A\beta \cdot A\alpha$ , o novo ponto NP é simplesmente a multiplicação dessa matriz pela matriz coluna do ponto original  $P = (p_x, p_y, p_z)$ , ou seja,  $NP = M \cdot [p_x \ p_y \ p_z]^T$ .

#### 4.2.8 Trajetórias em Eixo curvilíneo

As trajetórias em eixo curvilíneo permitem que se executem a união de peças em formatos curvilíneos, adequando qualquer das trajetórias descritas nas seções anteriores, inclusive as customizadas, a quaisquer curvas. Implementamos apenas o caso da circunferência, por haver maior aplicabilidade, mas discorreremos também sobre um caso mais complexo, da curva parabólica, no APÊNDICE 2. A Figura 40 ilustra um exemplo de utilização dessa funcionalidade. Os parâmetros que definem o segmento de circunferência são três: (1) o ponto inicial; (2) o ponto central; e (3) o ângulo total que ela deve cobrir, com valores positivos no sentido anti-horário e negativos caso contrário. Além desses, há outros três parâmetros angulares para determinar a rotação ao redor do eixo longitudinal e a orientação da tocha (*pitch* e *roll*). Os parâmetros podem ser vistos na reprodução da tela de configuração da Figura 41.

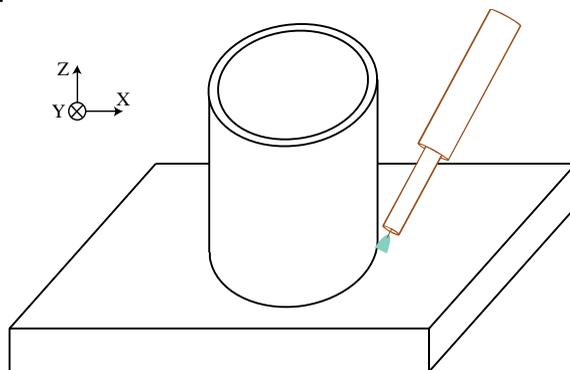


Figura 40 Possível aplicação da soldagem em eixo curvilíneo

The image shows a software interface for configuring circular trajectories. It features a tabbed menu at the top with 'Status', 'Trajetória', 'Movimentação', and 'Oscilações'. The 'Trajetória' tab is selected. The interface is divided into two main sections: 'Eixo Longitudinal Retilíneo' and 'Eixo Longitudinal Circular'. The 'Eixo Longitudinal Circular' section contains several input fields and buttons. A 'Marcar Posição Inicial' button is followed by X (5,00), Y (60,00), and Z (6,00) coordinates. Below these are 'Orientação horizontal da tocha' (-25,00) and 'Orientação vertical da tocha' (6,00). A second 'Marcar Posição Central' button is followed by X (55,00), Y (60,00), and Z (6,00) coordinates. At the bottom, there are fields for 'Unidade' (mm), 'Ângulo ao redor do eixo X' (0,00), 'Ângulo total da circunferência' (360,00), and 'Distância entre suporte e ponta da tocha' (270,00).

Figura 41 Tela de configuração das trajetórias em eixo circular

Diferentemente das transformações em eixo linear, em que uma única matriz é aplicada a todos os pontos da trajetória, precisamos encontrar uma base ortonormal para cada ponto a fim de adequá-lo à nova disposição circular. Isso é feito, entretanto, após aplicada a matriz de rotação em torno do eixo longitudinal, como na Figura 38. A partir de então, buscamos dispor esses pontos transformados em um eixo curvilíneo. Dada uma função qualquer  $f(x)$  que determina o novo eixo longitudinal da trajetória para o qual queremos transformar os pontos, é preciso, primeiramente, estabelecer uma relação entre o conjunto de pontos de que dispomos e essa função. Como já mencionado, convencionamos a descrição de todas as trajetórias no plano XY, dispostas no sentido crescente do eixo X. A correspondência está, portanto, justamente na abscissa de cada ponto. A primeira ordenada, que corresponde à distância perpendicular do ponto ao eixo Y, deve ser equivalente ao comprimento do arco definido por  $f(x)$  a partir de um ponto inicial  $a$ . A Figura 42 ilustra essa correspondência.

Para calcular o comprimento de arco  $s$  de uma curva, pode-se partir do teorema de Pitágoras aplicado a um trecho infinitesimal dessa curva, tal que  $ds^2 = dx^2 + dy^2$ . Manipulando a equação considerando

$y=f(x)$  chega-se ao valor de  $s$ , conforme Equação (11)a. Na forma paramétrica, tal que  $x=f(t)$  e  $y=g(t)$ , o valor de  $s$  poderia ser calculado através da Equação (11)b. Ambas têm como requisito a continuidade da função no intervalo  $[a,b]$ , que corresponde aos extremos do segmento cujo comprimento se quer calcular. Cumpre notar que a Equação (11)a é um caso específico da Equação (11)b quando  $x=t$  e  $y=f(t)$ .

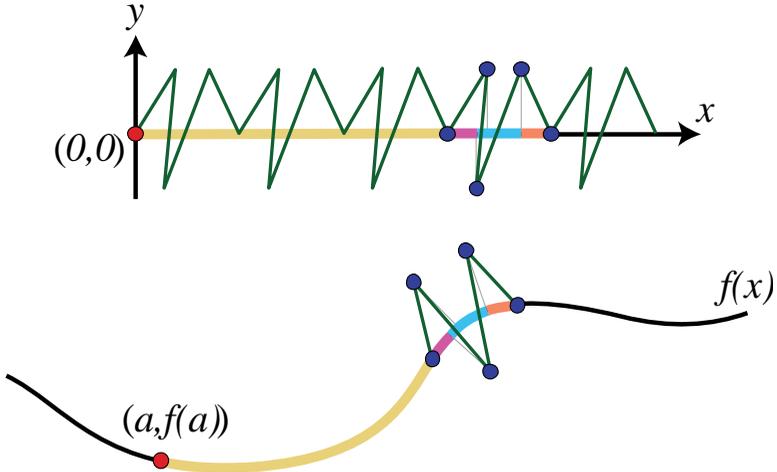


Figura 42 Mapeamento dos pontos definidos no sentido do eixo X a uma função arbitrária de acordo com a correspondência entre a abscissa dos pontos e comprimento de arco da função

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (a) \quad s = \int_a^b \sqrt{\left(\frac{dx}{dt}\right)^2 + \left(\frac{dy}{dt}\right)^2} dt \quad (b) \quad (11)$$

Resolvendo a integral indefinida, chegaríamos em uma função  $s(x)$  ou  $s(t)$ . Mas o comprimento de arco a que queremos corresponder nos pontos já é sabido: trata-se da abscissa de cada ponto. Na verdade, o que buscamos é o parâmetro  $x$  ou  $t$  na função que corresponde ao comprimento de arco que já temos definido. Com esse parâmetro, poderíamos calcular a derivada naquele ponto e obter o primeiro vetor da base ortonormal que buscamos, com o intuito de transformar o ponto original em seu correspondente, tendo como eixo a função. Conhecida a função  $s$ , devemos então buscar sua inversa  $s^{-1}$ . Nem sempre  $s$  será

invertível, mas sua propriedade de corresponder ao comprimento de arco de uma função contínua a faz ser sempre crescente, facilitando a utilização de métodos numéricos para encontrar  $s^{-1}(s(x)) = x$ , como, por exemplo, o método de Newton-Raphson [49]. Conhecido  $x$  ou  $t$ , calcula-se a derivada de  $f$  naquele ponto e chega-se ao primeiro vetor da base que buscamos, que deve ser unitário. Girando esse vetor em noventa graus em torno do eixo Z, obtém-se o segundo vetor. O terceiro é simplesmente o produto vetorial entre os dois já determinados. Aplicando essa base ao ponto original, obtemos o ponto transformado.

O caso da circunferência, que oferecemos no *software* de configuração e execução das trajetórias, é especialmente simples de resolver em sua forma paramétrica. Uma circunferência de raio igual a  $r$  pode ser descrita por  $x = r \cdot \cos(t)$  e  $y = r \cdot \sin(t)$  e, pois,  $dx/dt = -r \cdot \sin(t)$  e  $dy/dt = r \cdot \cos(t)$ . Substituindo as derivadas na Equação (11)b, chega-se a  $s(t) = r t$ , considerando o ponto inicial  $a$  igual a 0. A obtenção da função inversa de  $y = s(t)$  é trivial, igual a  $s^{-1}(y) = y/r$ . Para cada ponto P que desejamos transformar, de coordenada  $(p_x, p_y, p_z)$ , encontramos primeiramente o valor da inversa do comprimento de arco até o ponto  $p_x$ , ou,  $s^{-1}(p_x) = p_x/r$ . Esse é valor de  $t$  onde nosso primeiro vetor  $\vec{b}_x$  da base ortonormal será calculado. Um vetor  $\vec{v}_x$  tangencial à curva nesse ponto é o formado pelas derivadas na forma paramétrica, tal que  $\vec{v}_x = [-r \sin(p_x/r) \quad r \cos(p_x/r) \quad 0]$ . O primeiro vetor da base é o unitário de mesma direção e sentido que  $\vec{v}_x$ , ou seja,  $\vec{b}_x = \vec{v}_x/|\vec{v}_x|$ . O segundo,  $\vec{b}_y$ , é o próprio  $\vec{b}_x$  sobre o qual é aplicado uma rotação de  $90^\circ$  ao redor do eixo Z. Por fim,  $\vec{b}_z$  é o produto vetorial entre os já calculados, ou,  $\vec{b}_z = \vec{b}_x \times \vec{b}_y$ . O ponto final transformado  $P_t$  é, então,  $P_t = [r \cos(p_x/r) \quad r \sin(p_x/r) \quad 0] + p_y \vec{b}_y + p_z \vec{b}_z$ . Esse processo é feito para todos os pontos da trajetória. Para simplificar, foram ignoradas questões referentes ao ângulo inicial na circunferência e translação dos pontos, para os quais haveria pequenos ajustes. A descrição se aplica, portanto, a uma circunferência com centro na origem e ângulo inicial nulo. A Figura 43 ilustra a aplicação desse método a uma trajetória com oscilação circular.

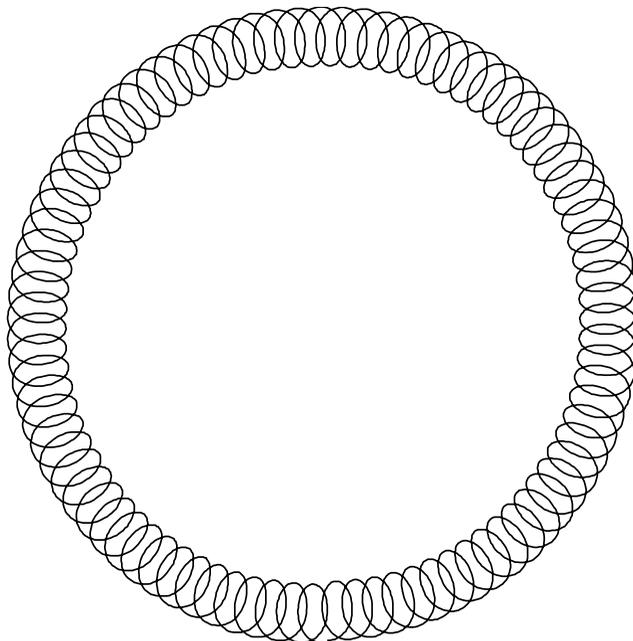


Figura 43 Trajetória circular transformada para disposição em eixo circular

Apenas estabelecer as novas coordenadas da trajetória, todavia, não é suficiente para lidar com os problemas relacionados a soldagens de cordões não lineares. Como se observa na Figura 40, para que a junta seja alcançada, é preciso inclinar a tocha de soldagem. Conforme a circunferência vai sendo executada, é necessário adaptar também a orientação da tocha, ou ela se distanciaria da junta. O usuário fornece a orientação inicial da tocha, como se vê na Figura 41. Essa orientação inicial é aplicada a um vetor unitário na direção de  $Z$ . Conforme os pontos são dispostos na circunferência, esse vetor sofre uma rotação ao redor de  $Z$  equivalente ao parâmetro  $t$  encontrado através da função inversa ao comprimento do arco, necessário na determinação da base ortonormal. Depois dessa rotação, são determinados os ângulos da transformação inversa do vetor ao estado inicial  $[0 \ 0 \ 1]$ . Esses ângulos, correspondentes ao *pitch* e *roll*, são os comandados a cada instante para condução da orientação da tocha durante a execução. Dessa forma, a orientação inicial é mantida para toda a circunferência. As transformações são análogas às da Figura 39.

Além do estabelecimento dos ângulos, é preciso lidar com mais um problema. A construção mecânica dos eixos rotacionais paralelos

(AB) que determinam a orientação da tocha (Figura 15) faz com que, ao alterar essa orientação, altere-se também a posição espacial da ponta da tocha. Para que ela se mantenha na trajetória esperada, essa alteração deve ser compensada nos eixos de posicionamento da cadeia cinemática em série (XZY). O problema é ilustrado na Figura 44. Quando a orientação da tocha é mantida fixa durante a execução de trajetórias, o ponto comandado é mapeado diretamente a outro ponto no bico da tocha, que perfaz, assim, a mesma trajetória, Figura 44a. Variando a orientação, entretanto, a ponta da tocha se desvia da trajetória comandada, como mostra a Figura 44b.

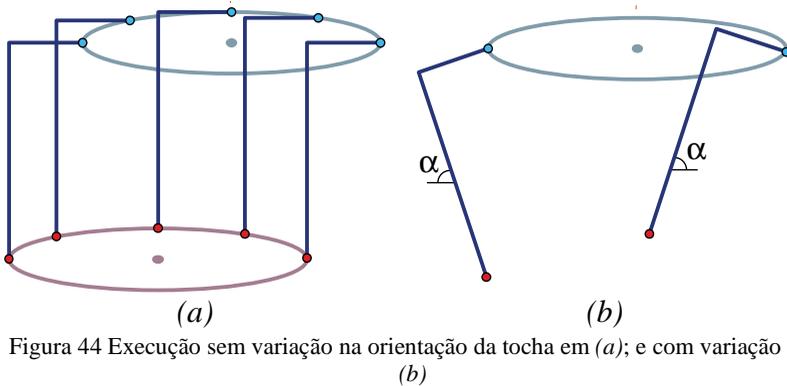


Figura 44 Execução sem variação na orientação da tocha em (a); e com variação em (b)

Esse desvio depende dos segmentos existentes entre a parte fixa do braço mecânico, aquela não afetada pela variação de orientação, e a ponta da tocha. A Figura 45 mostra uma fotografia de perfil do mecanismo diferencial, cujo centro é fixo (ponto azul), e da tocha de soldagem, cuja ponta é indicada em vermelho. A ligação entre esses pontos é feita por dois segmentos perpendiculares, de comprimentos  $d_1$  e  $d_2$ . A distância  $d_1$  indicada na figura é fixa, independente da tocha utilizada. Já a distância  $d_2$  pode variar tanto com o tipo de tocha quanto com seu posicionamento no momento da fixação. Por conta disso, o *software* permite a determinação desse parâmetro, como mostra a reprodução da tela de configuração na Figura 41.

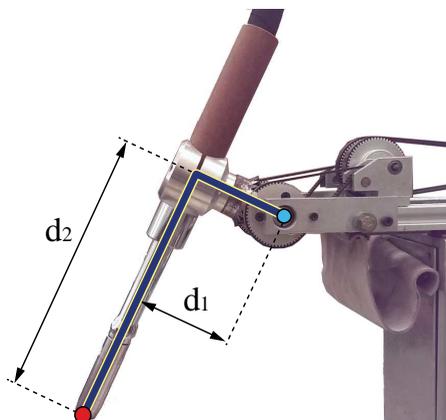


Figura 45 Perfis do mecanismo diferencial de orientação e da tocha de soldagem com indicação dos segmentos entre ponto fixo e ponta da tocha

Conhecidas essas distâncias e os ângulos correspondentes ao *pitch* e *roll* para todos os pontos da trajetória, é possível encontrar as compensações que devem ser aplicadas aos comandos de posicionamento para que os desvios causados pela alteração de orientação da tocha sejam anulados. O mecanismo da correção é ilustrado na Figura 46. A orientação inicial da tocha  $\vec{u}_i$  é calculada com base nos parâmetros angulares iniciais fornecidos pelo usuário. Os ângulos  $\alpha$  e  $\beta$ , correspondentes ao *pitch* e *roll*, são aplicados aos vetores correspondentes aos segmentos entre a parte fixa e a ponta da tocha  $[0 \ d_1 \ 0]$  e  $[0 \ 0 \ -d_2]$ , sendo os vetores resultantes somados para a obtenção de  $\vec{u}_f$ , ou seja,  $\vec{u}_f = A\alpha [0 \ d_1 \ 0]^t + A\beta [0 \ 0 \ -d_2]^t$ , onde  $A\alpha$  e  $A\beta$  são as matrizes de rotação *pitch* e *roll*. O mesmo é feito com cada ponto da trajetória, aplicando os parâmetros angulares calculados para eles e encontrando, assim,  $\vec{u}_f$ . A correção  $\vec{c}$  a ser aplicada aos comandos de posicionamento é igual a  $\vec{c} = \vec{u}_i - \vec{u}_f$ .

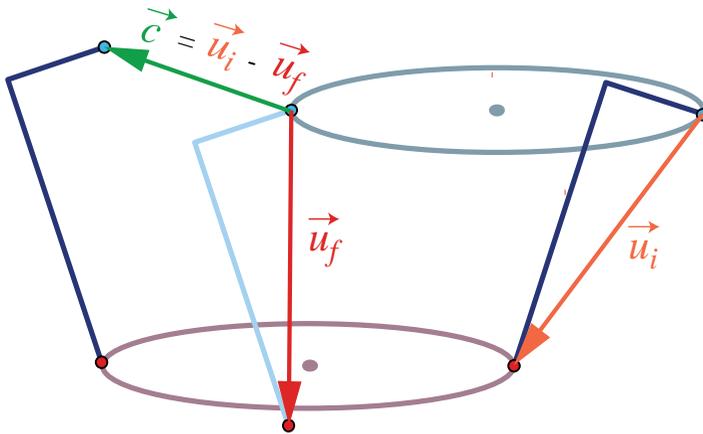


Figura 46 Obtenção da compensação do desvio da trajetória causado pelo mecanismo mecânico de orientação da tocha

Exauridas as questões concernentes à determinação das oscilações e às transformações aplicadas às trajetórias, as seções seguintes tratarão de outras questões funcionais: correção de trajetórias, seção 4.3, e sincronismo com a fonte de soldagem, seção 4.4.

### 4.3 Correção de trajetórias via operador

As correções das trajetórias ocorrem por iniciativa do operador, quando ele detecta situações em que a mudança de parâmetros da trajetória deverá produzir melhores resultados. A correção é aplicada através da interface gráfica ou do teclado, e é encaminhada diretamente à instância de trajetória em execução no momento. Além dos novos parâmetros a serem considerados, ela também recebe o índice na lista de pontos em que se encontra a execução, informação essa fornecida pelo Executor de Trajetórias. Assim, a instância de trajetória recalcula os pontos ainda não executados, que se encontram adiante em relação a esse índice naquela lista. Isso ocorre quando dentre os parâmetros corrigidos estão aqueles que definem a geometria ou velocidade da trajetória. Se o parâmetro for apenas de alteração de posição, o usuário os envia diretamente ao Executor de Trajetórias, que simplesmente soma a compensação à coordenada final antes do envio aos servos *drivers*, sem que a instância de trajetória tome qualquer ação.



$p$  contiver um valor fora desse domínio, ele será considerado um comando para ignorar o sincronismo naquele ponto. Estando de acordo com o domínio, o percentual é multiplicado pelo intervalo de duração do comando, determinando um tempo que será utilizado para agendamento de um evento de alteração do valor no canal de comunicação com a fonte de soldagem. Por exemplo, se a execução de um comando de velocidade e posição durar 150 milissegundos e o valor de  $p$  for 30%, depois de transcorridos 45 milissegundos o sinal de sincronismo passará a ser  $v$ . A Figura 48 ilustra, através de um fluxograma, a rotina, que corresponderia à caixa “Agenda sincronismo, se houver” da Figura 23. Além disso, ela também exemplifica os efeitos do par  $(p,v)$  em uma trajetória triangular.

Atualmente, esse canal possui apenas uma linha de comunicação, permitindo a determinação de apenas 1 bit. Assim, o valor de  $v$  pode ser 0 ou 1. Entretanto, a fonte utilizada tem capacidade de alternar até entre oito programas de soldagem. Caso novas linhas sejam adicionadas, bastaria, no software, associar os pinos correspondentes da porta paralela com a atribuição do valor de  $v$ .

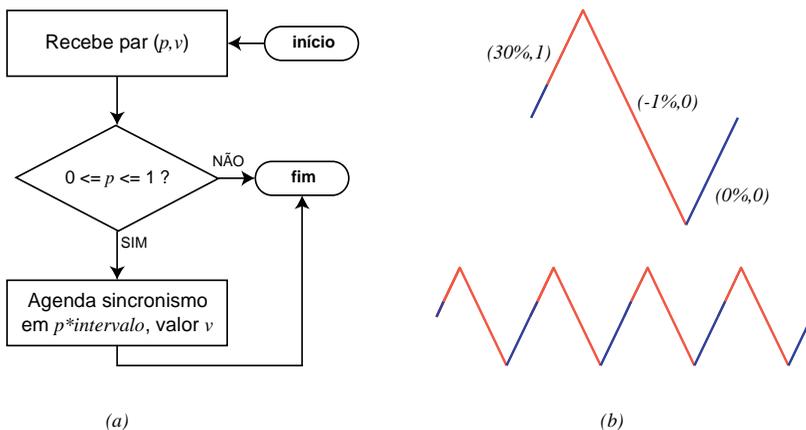


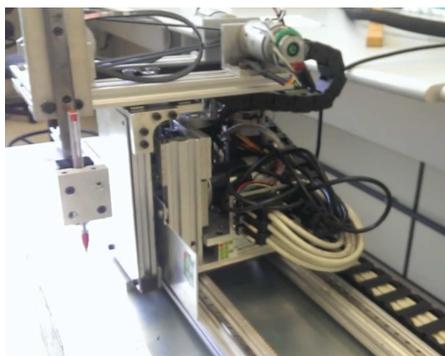
Figura 48 (a) Fluxograma do trecho de sincronismo no executor de trajetórias; (b) Exemplo dos comandos  $(p,v)$  e efeito na trajetória

## 5 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de validar o desenvolvimento, foram conduzidos diversos ensaios sobre o manipulador de soldagem. As seções seguintes abordarão esses experimentos, com os parâmetros, técnicas empregadas e os resultados obtidos.

### 5.1 Validação da Mecânica

Os ensaios iniciais buscaram corroborar tanto a adequação das trajetórias conforme a parametrização determinada quanto a ausência de folgas ou desvios mecânicos que comprometessem a execução de soldagens com qualidade. Isso foi feito com a anexação de uma caneta esferográfica ao braço robótico, no final da cadeia cinemática em série, como mostra a Figura 49. A plotagem realizada foi então digitalizada na resolução de 300 pontos por polegada, e as dimensões obtidas em quantidade de pontos convertidas para milímetros com base nessa resolução.



(a)



(b)

Figura 49 Caneta esferográfica anexada ao braço robótico em (a); Detalhe na plotagem em (b)

Foram executadas as trajetórias triangular, trapezoidal, triangular com *switch back*, circular e duplo oito, como se vê na Figura 50. Todas elas com o mesmo comprimento de onda, de 4mm, a mesma amplitude, de 12mm, e mesma velocidade de soldagem, de 1mm/s. Na trajetória trapezoidal, o tempo de parada do eixo transversal na extremidade superior é igual ao dobro do inferior. A trajetória triangular com *switch*

*back* foi executada com duas oscilações transversais de avanço por ciclo somando 8 mm de comprimento, sendo o recuo, portanto, executado com uma oscilação de 4 mm. As três circulares foram executadas com diferentes sobreposições  $p$  (seção 4.2.4), respectivamente, um terço, um meio e dois terços. A trajetória em duplo oito foi construída com base na circular de um meio de sobreposição (seção 4.2.5).

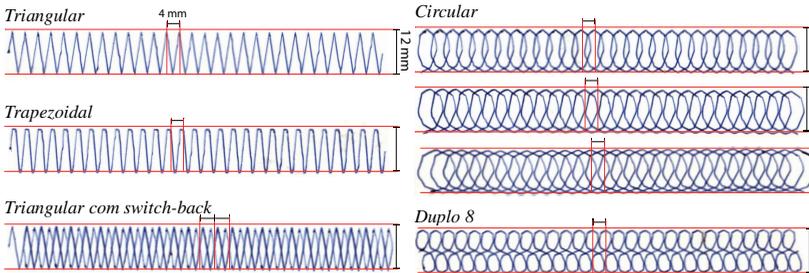


Figura 50 Plotagem e medição das dimensões obtidas com caneta esferográfica anexada ao braço robótico

Na figura, são indicados os valores de 4mm e 12mm correspondentes, respectivamente, ao comprimento de onda e amplitude. Como se pode notar, os erros são desprezíveis, especialmente para soldagem a arco elétrico, em que há maior tolerância a desvios, já que o calor mantém o metal fundido em uma região que circunda o ponto de incidência.

## 5.2 Soldagens de Revestimento

Na sequência, foram conduzidos ensaios de cordões de solda com vistas à aplicação em soldagens de revestimento. Esse tipo de soldagem busca proporcionar o aumento de resistência à corrosão e oxidação no metal de base, aumentando sua vida útil. Um exemplo de aplicação é o revestimento de tubos para condução de petróleo em plataformas marítimas, que precisam ser revestidos devido à característica altamente corrosiva do fluido extraído.

As Figuras 51a e 51b reproduzem a macrografia e aparência externa de cordões de solda executados sem inclinação da tocha, ou seja, com a tocha perpendicular ao plano do corpo de prova. Nas Figuras 51c e 51d, os cordões foram produzidos com inclinação de dez graus, empurrando a poça de soldagem. As trajetórias executadas foram, respectivamente, triangular, *switch back* e filetado, todas com velocidade de soldagem de 7mm/s. O *switch back* foi executado com

8mm de avanço e 4mm de recuo, em tempos iguais, ou seja, velocidade de avanço de 28mm/s e de recuo de -14mm/s. A trajetória triangular foi executada com 12 mm de amplitude e 2 Hz de frequência.

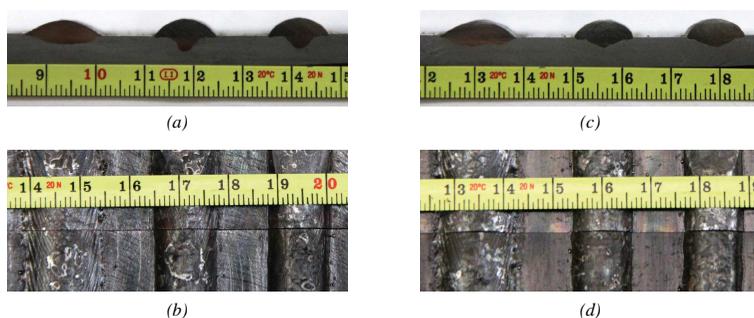


Figura 51 Corte transversal em (a) e (c) e vista superior em (b) e (d) de soldagens de revestimento com variação na inclinação da tocha.

Na Tabela 2 são apresentadas as características geométricas dos cordões, conforme os parâmetros de Largura (L), Penetração (P), Reforço (R), Área fundida do metal de base (Af), Área depositada do cordão (Ad), indicadas na Figura 52. Além delas, as variáveis dependentes Diluição ( $D = Af/(Ad+Af)$ ) e razão entre reforço e largura ( $R/L$ ) são também incluídas. Apenas pela observação da imagem é possível perceber que, com inclinação, a penetração e a diluição diminuíram significativamente, o que é corroborado pelos valores da tabela.

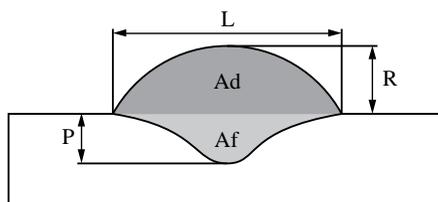


Figura 52 Parâmetros geométricos do cordão de solda em corte transversal [50]

Tabela 2. Características geométricas dos cordões obtidos dos ensaios com variação no ângulo de ataque

Ângulo de ataque	0°			10°		
	Triang.	<i>Switch Back</i>	Filetado	Triang.	<i>Switch Back</i>	Filetado
Trajectoria						
Largura (mm)	16,7	13,2	13,4	16,3	13,0	12,4
Penetração (mm)	2,0	3,3	2,9	1,9	2,3	2,4
Reforço (mm)	3,1	3,6	3,6	3,4	3,6	3,6
Af (mm <sup>2</sup> )	22,4	15,4	15,1	20,1	13,9	16,5
Ad (mm <sup>2</sup> )	34,8	32,0	34,0	35,5	33,9	33,3
Diluição (%)	39,2	32,4	30,7	36,1	29,1	33,0
R/L	0,19	0,27	0,27	0,21	0,27	0,29

Nas Figuras 53a e 53b é feita a comparação entre as três trajetórias circulares da Figura 50, com sobreposição de um terço, um meio e dois terços, respectivamente. O resultado da execução das trajetórias circular, triangular com *switch back* e duplo oito é mostrado nas 53c e 53d. Todas elas foram executadas sem inclinação da tocha, amplitude de 12 mm, frequência de 2 Hz e velocidade de soldagem de 7 mm/s. O cordão central das Figuras 53c e 53d foi executado com a trajetória combinada triangular com *switch back* com uma oscilação transversal de 8 mm no avanço e meia no retorno com 4 mm, e ainda, com velocidade de avanço igual ao dobro da de recuo. As medições geométricas de todas elas são mostradas na Tabela 3.

As características geométricas dos cordões de solda produzidos pelos diferentes tipos de oscilação, incluindo a triangular da Figura 51, são semelhantes, porém superiores para soldagens de revestimento quando comparados com os cordões executados sem oscilação ou com oscilação *switch back*. O parâmetro que indica mais claramente essa conclusão é a razão entre reforço e largura R/L, que apresentou valores bem maiores para as trajetórias longitudinais. Essa variável representa o grau de convexidade do cordão de solda. Altos valores indicam concentração de tensão no pé do cordão, favorecendo a ocorrência de defeitos como falta de fusão na execução de cordões adjacentes. O uso de oscilações transversais, apesar de não afetar significativamente na diluição, é essencial para a obtenção de baixos valores da razão R/L [12].

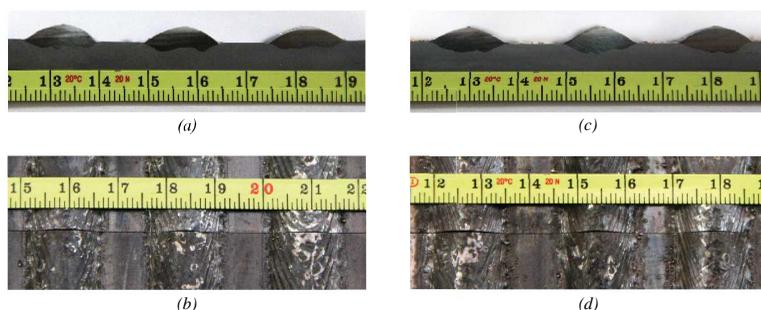


Figura 53 Corte transversal em (a) e (c) e vista superior em (b) e (d) de soldagens de revestimento com execução de diferentes oscilações

Tabela 3. Características geométricas dos cordões em variadas oscilações

Trajectoria	Circular 1/3	Circular 1/2	Circular 2/3	Circular 1/3	Triang. + Switch Back	Duplo 8 1/3
Largura (mm)	15,5	16,4	17,9	17,9	17,5	17,0
Penetração (mm)	1,8	1,8	1,4	2,1	2,3	2,5
Reforço (mm)	3,3	3,5	3,5	3,1	3,3	3,3
Af (mm <sup>2</sup> )	17,3	17,9	17,8	22,7	21,8	23,6
Ad (mm <sup>2</sup> )	31,9	37,5	37,4	37,1	32,7	32,4
Diluição (%)	35,1	32,2	32,2	37,9	40,0	42,2
R/L	0,21	0,22	0,20	0,17	0,19	0,19

Os ensaios de soldagem, Figuras 51, 53, 56, foram executados na posição de soldagem plana, em chapa de aço ABNT 1020 de 200×100×6,35 mm como material de base e, como material de adição, arame de aço inox 309LSI de 1 mm de bitola e 16,4 m/min de velocidade de alimentação. O gás de proteção utilizado foi o Stargold Flex (98% Ar + 2% O<sub>2</sub>) com vazão de 18 l/min. A fonte de soldagem foi programada no modo corrente, 250 A. O DBCP (distância do bico de contato à peça) usado foi de 20 mm.

### 5.3 Soldagens de União

Com o propósito de unir peças metálicas, soldagens de união são amplamente utilizadas na indústria. A fim de testar a adequação do manipulador nesse tipo de processo, realizamos ensaios de soldagem de topo com chanfro em V e de junta em ângulo de 90°. Ambas foram executadas com gás de proteção 98% Ar + 2% O<sub>2</sub> com vazão de 18 l/min e, como metal de adição, o arame ER-70S com 1mm de bitola e velocidade de alimentação de 15 m/min.

O primeiro ensaio, de topo em peças com chanfro em V, de 45°, conforme a Figura 54a, foi realizado sobre chapas com 3/4" de espessura. A fonte de soldagem foi programa no modo tensão, em 31V, e a orientação da tocha mantida em 10° de ângulo de ataque, empurrando a poça de soldagem, enquanto o DBCP foi de 20mm. Além do passe de raiz, realizado com oscilação *switch back*, velocidade de soldagem de 7mm/s com 8mm de avanço, 4 mm de recuo e velocidade de avanço igual ao dobro da de recuo, foram executadas outras três camadas de preenchimento, todas com oscilação triangular com velocidade de soldagem de 5mm/s. As camadas de preenchimento foram realizadas com amplitude crescente na oscilação, respectivamente, de 8mm, 12mm e 16mm, para acompanhar a abertura do chanfro. A Figura 54b mostra a fotografia com vista superior das quatro camadas executadas, enquanto na Figura 54c é apresentado o corte transversal da junta. De forma tabular, as oscilações utilizadas no ensaio são mostradas na Tabela 4.

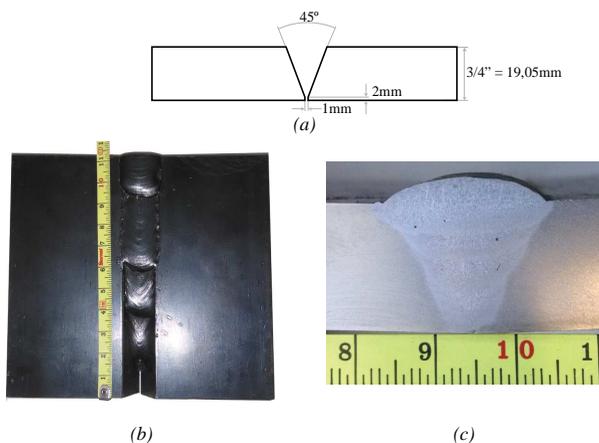


Figura 54 Soldagem de topo de peças com chanfro em V. Em (a) visão superior; em (b) macrografia.

Tabela 4 Parâmetros das oscilações da soldagem de topo em camadas

Passe	Raiz	1º de Preenchimento	2º de Preenchimento	3º de Preenchimento
Tipo de oscilação	<i>Switch back</i>	Triangular	Triangular	Triangular
Velocidade de soldagem	7 mm/s	5 mm/s	5 mm/s	5 mm/s
Amplitude	-	8mm	12mm	16mm

O segundo ensaio de união foi realizado com junta em ângulo de  $90^\circ$ . Por essa razão, durante a soldagem, a orientação da tocha foi mantida num ângulo de  $45^\circ$  com o eixo Z, como se vê na Figura 55a. Além disso, foi determinado um ângulo de ataque de  $10^\circ$ , empurrando a poça de soldagem. As chapas utilizadas foram de diferentes espessuras: a base com 16mm e a sobreposta a ela com 5mm, conforme Figura 55b. A distância entre bico de contato e peça foi de 22mm. A oscilação utilizada foi a circular com amplitude de 4mm e um terço de sobreposição entre os ciclos, frequência de 1 Hz e velocidade de soldagem de 7mm/s. Como se nota, o resultado teve bom acabamento, conforme Figura 55c.



(a)



(b)



(c)

Figura 55 Soldagem de junta em ângulo de  $90^\circ$ . Em (a) fotografia com indicação da inclinação da tocha; em (b) vista de perfil da junta; e em (c) vista frontal do cordão

#### 5.4 Correção de Trajetórias via operador

A correção das trajetórias durante sua execução busca adaptá-las a desvios percebidos pelo operador. Os resultados dos ensaios de aplicação de correções são mostrados na Figura 56. Por maior clareza, as correções se restringiram a um único parâmetro em cada ensaio, embora o sistema não limite sua aplicação simultânea. Os pontos enviados aos servos *drivers* foram gravados e depois plotados para fins de comparação com o cordão obtido.

O resultado do primeiro ensaio, de correção do eixo longitudinal, é mostrado nas Figuras 56a e 56b. Enquanto o cordão era executado, o eixo central da trajetória foi deslocado em 5 mm na direção transversal, e depois trazido de volta à posição original. A velocidade de soldagem foi de 7 mm/s, amplitude de 12 mm e frequência de 2 Hz. A correção da posição do eixo central da trajetória é útil na adequação do cordão frente a desvios de posicionamento das juntas, especialmente em juntas longas.

Na sequência, Figura 56c e Figura 56d, a amplitude é alterada durante a execução. Inicialmente com 4 mm, ela é então aumentada para 12 mm, seguido pelo restabelecimento do valor original. A correção de amplitude aplica-se quando a dilatação térmica causa afastamentos entre as peças. Nas Figura 56e e Figura 56f, a frequência é corrigida de 2 Hz para 1 Hz e depois restaurada. O objetivo de alteração da frequência são as irregularidades eventualmente ocorridas nas bordas do cordão, como se percebe na Figura 56f.

Um exemplo de correção na velocidade de soldagem é mostrado na Figura 56g. A velocidade da trajetória filetada foi corrigida de 7 mm/s para 10 mm/s, e então voltou à velocidade inicial. A velocidade pode ser alterada para controlar a quantidade de material depositado, como nitidamente se percebe na figura.

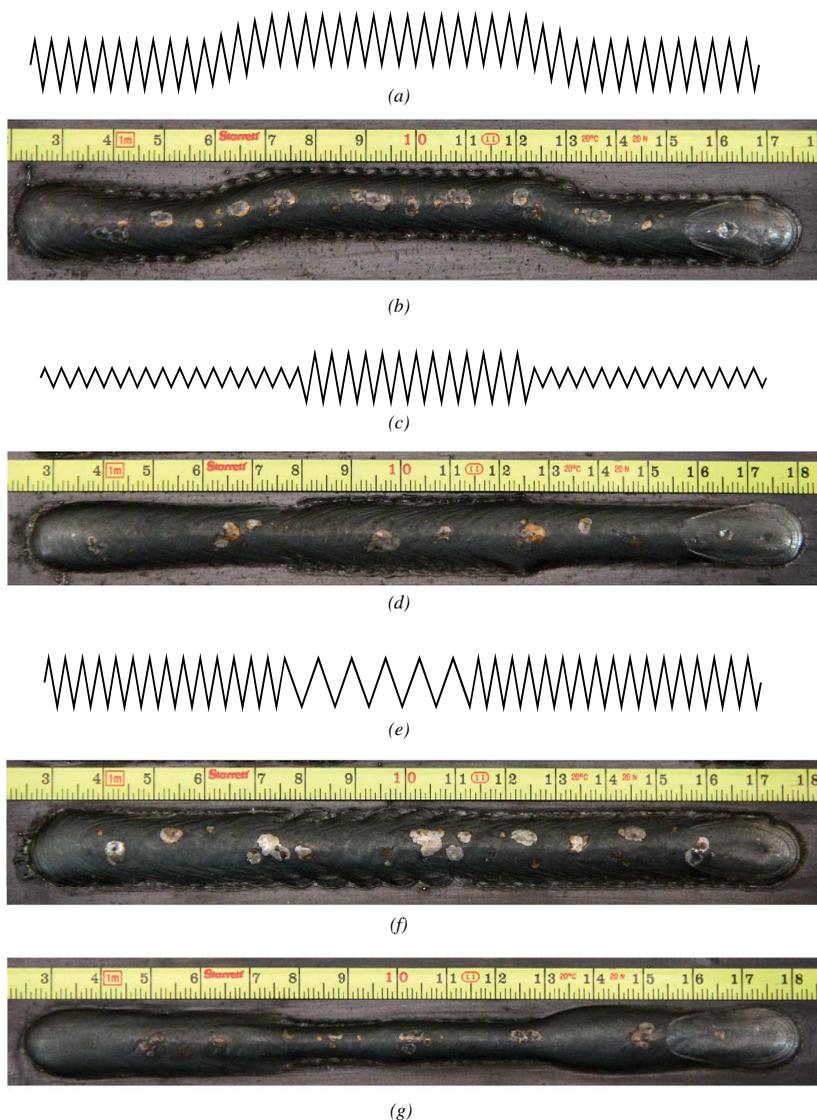


Figura 56 Correção de trajetórias: eixo longitudinal em (a) e (b), amplitude em (c) e (d), frequência em (e) e (f) e velocidade em (g)

## 5.5 Trajetórias em Eixo Circular

Os testes de trajetórias em eixo circular com variação de orientação da tocha, embora tenham ocorrido de forma satisfatória, evidenciaram uma limitação do manipulador. A distância entre o suporte da tocha de que dispúnhamos e sua ponta,  $d_2$  na Figura 45, de 270mm, é grande demais para o curso limitado do manipulador nos eixos Y e Z, respectivamente, de 175mm e 100mm, quando a compensação da orientação da tocha é necessária (seção 4.2.8). Essa característica acaba por limitar demasiadamente o raio da circunferência possível de ser executada, a depender da inclinação relativa entre a tocha e o eixo Z. Quanto maior for esse ângulo e a distância  $d_2$ , maior é o módulo do vetor de compensação  $\vec{c}$  (Figura 46) para os pontos extremos da circunferência, o que faz com que as coordenadas a serem comandadas extrapolem os limites do manipulador. Por essa razão, ensaiamos apenas o movimento da tocha com variação de orientação utilizando uma tocha menor, raio pequeno e baixo ângulo entre tocha e trajetória.

A sequência de fotos reproduzida na Figura 57 mostra o resultado sob dois pontos de vista, um em cada coluna. A distância  $d_2$  para essa tocha foi de 120mm e o raio da circunferência de 25mm. O ângulo de inclinação da tocha em relação ao eixo Z foi de 15°. Pelas imagens, nota-se nitidamente as compensações, especialmente nos eixos Y e Z. Na primeira linha, tanto Y quanto Z encontram-se retraídos, próximos de suas posições iniciais. Na linha seguinte, é mostrada uma posição intermediária e, na última, o eixo Y encontra-se completamente estendido, próximo de seu fim de curso, enquanto o eixo Z encontra-se em uma posição mais afastada da inicial. Durante toda execução, a ponta da tocha se manteve a uma distância fixa em relação ao plano da mesa, enquanto que, no plano XY, fez uma trajetória circular.

Embora o curso limitado restrinja as aplicações do manipulador em sua construção atual para soldagens circulares com variação de orientação da tocha, as ideias, algoritmos e suas implementações são válidos. Não obstante, podem ser reutilizados em eventuais versões aprimoradas do manipulador, com curso estendido nos eixos Y e Z. Além disso, o método utilizado para dispor as trajetórias em eixo circular, descrito na seção 4.2.8, permanece utilizável sem restrições causadas por correções quando não houver inclinação da tocha, ou seja, sua orientação for perpendicular ao plano da mesa. Em razão disso, realizamos um ensaio de execução de

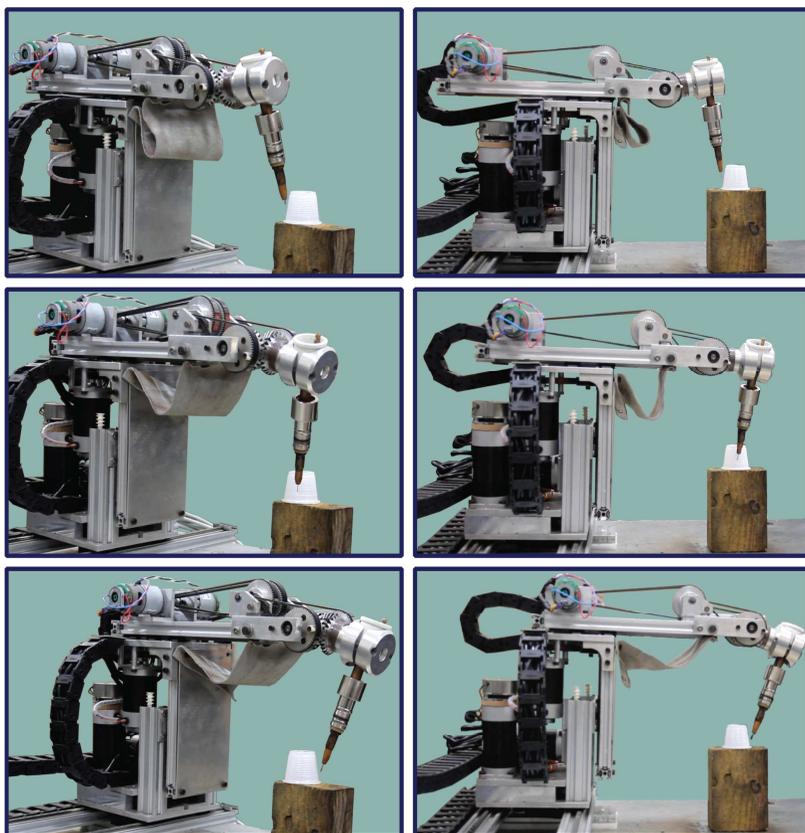


Figura 57 Vista frontal e lateral da variação na orientação da tocha na trajetória circular com a correspondente compensação nos eixos de posicionamento.

uma trajetória triangular disposto em eixo circular, sem variação na orientação da tocha.

A trajetória triangular foi executada com velocidade de soldagem de 7mm/s, 10mm de amplitude e frequência de 2Hz. O raio da circunferência sobre o qual o eixo da trajetória foi disposto foi de 50mm. Como material de adição, utilizou-se arame ER70S com 1mm de bitola e velocidade de alimentação de 15m/min. A fonte de soldagem foi configurada para execução em modo corrente, a 250A. O gás utilizado, 98%Ar + 2%O<sub>2</sub>, foi injetado a uma vazão de 12 l/min. A Figura 58 mostra a trajetória executada ao lado da fotografia do cordão de solda obtido.

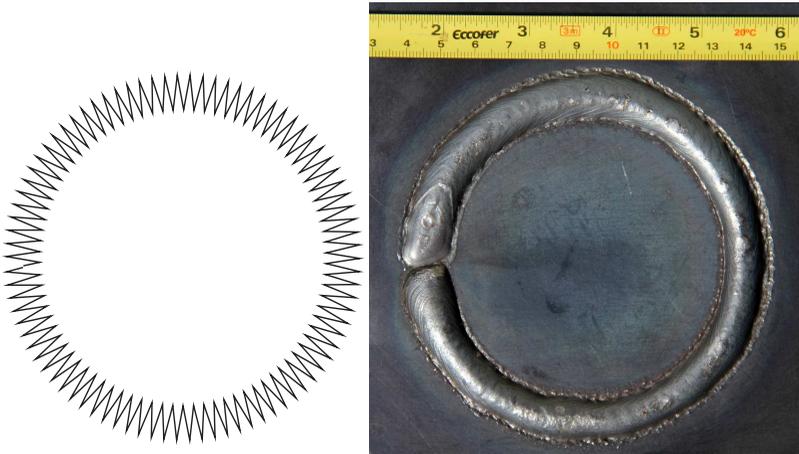


Figura 58 Ensaio de trajetória triangular disposta em eixo circular

## 5.6 Sincronismo com Fonte de Soldagem

Para testarmos o mecanismo de sincronismo da trajetória com a fonte de soldagem, realizamos ensaios comparativos entre cordões com o eletrodo em polaridade positiva, negativa e com variação de polaridade, a fim de visualizarmos as diferenças obtidas da execução de cada técnica. A trajetória escolhida foi o *switch back*, configurado para operar conforme a Figura 59. A ideia é que, depois de passar por duas vezes sobre o mesmo ponto com o eletrodo em polaridade negativa, produzindo uma poça com grande reforço e baixa penetração, a tocha

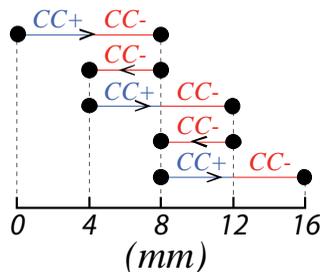


Figura 59 Troca de polaridade na oscilação *switch back* com sincronismo com fonte de soldagem

passe, na terceira vez, com o eletrodo em polaridade positiva, a fim de causar o espalhamento da poça, aumentando a largura do cordão.

A fonte de soldagem, para esse ensaio, foi configurada para operação em modo corrente, com duas programações: +250A e -230A. A alternância entre elas foi comandada pelo software, através do bit de sincronização SYNC (Figura 18). O gás utilizado, 98%Ar + 2% O<sub>2</sub>, foi injetado com vazão de 12 l/min, enquanto o arame, ER70S de 1mm de bitola, foi alimentado a uma velocidade constante de 15m/min. A velocidade de soldagem de todos os cordões foi de 7mm/s com 8mm de avanço e 4mm de recuo, com velocidade de avanço igual ao dobro da de recuo. A Figura 60 mostra a macrografia e visão superior dos três cordões obtidos e a Tabela 5, as medidas geométricas obtidas.

Pela figura já se nota nitidamente que a largura do cordão é crescente conforme se aplica, respectivamente, a polaridade em CC-, a combinação das duas polaridades e em CC+, percepção essa corroborada pelos valores da tabela. A tabela mostra também essa mesma característica crescente nos valores de penetração e de diluição, e decrescente no valor do reforço. Os valores obtidos seguem precisamente o esperado. Quando o eletrodo opera em polaridade negativa, o arco se concentra nele, fundindo mais arame do que o material de base, causando menor diluição, largura e penetração e maior reforço. O oposto ocorre com a polaridade positiva, ou seja, o calor funde mais material de base e espalha a poça, causando maior largura, diluição e penetração e menor reforço. O cordão intermediário, em que há variação de polaridade em sincronia com a trajetória, demonstra a importância da manipulação dessa característica na busca por cordões mais adequados.



Figura 60 Macrografias e visão superior dos cordões de solda obtidos ao variar a polaridade no eletrodo

Tabela 5 Medidas geométricas dos cordões obtidos variando a polaridade no eletrodo

	CC-	CC- / CC+	CC+
Largura (mm)	9,10	11,20	13,50
Penetração (mm)	1,50	2,24	2,94
Reforço (mm)	4,70	3,90	3,34
Af (mm <sup>2</sup> )	4,40	9,60	17,37
Ad (mm <sup>2</sup> )	32,10	30,90	29,66
Diluição (%)	12,10	23,70	36,90

## 6 CONCLUSÕES

O trabalho apresentado demonstra, através de ciência aplicada, de resultados empíricos e abrangendo diretamente as três áreas de interesse da Mecatrônica (computação, eletrônica e mecânica), a viabilidade no desenvolvimento, com baixo custo, de um equipamento tecnológico com funcionalidades dificilmente encontradas em manipuladores comerciais de alto valor agregado. As trajetórias customizadas, a execução de trajetórias em eixo circular com acompanhamento da orientação da tocha e o sincronismo da oscilação com a fonte de soldagem integram a lista dessas distintas funcionalidades. A importância de sua aplicabilidade industrial é inequívoca, não apenas pelas clássicas contribuições da automatização, como ganho de qualidade e repetitividade, mas também pelos diferenciais enumerados.

Além das potenciais aplicações em campo e na indústria, o equipamento tem forte apelo educacional. Isso decorre, além de seu custo atrativo, da flexibilidade oferecida na parametrização e customização das trajetórias, que permite a livre experimentação de variadas técnicas de soldagens: puxar ou empurrar a poça, testar diferentes oscilações para finalidades diversas, como união ou revestimento, ou mesmo testar ideias de novas oscilações, com ou sem variação de velocidade e alterando ou não os parâmetros da fonte de soldagem de forma síncrona com a trajetória. Tudo isso pode ser explorado com fins didáticos ou científicos, seja na investigação de hipóteses ou na corroboração de ideias consolidadas.

O protótipo visto como caixa preta não exaure, todavia, a lista de contribuições deste trabalho. A estrutura interna das soluções adotadas, ilustradas com esquemas, equações e figuras podem ensejar sua adoção, ou a de técnicas análogas, mesmo em aplicações totalmente distintas, dada sua ampla aplicabilidade e alto potencial de reutilização.

Ao retomar a questão investigada, “*Como estabelecer um sistema que controle a execução de trajetórias com a possibilidade de correção via operador, e que seja flexível para permitir a experimentação de novas ideias relacionadas a oscilações e também sua sincronização com a mudança de parâmetros de soldagem?*”, nota-se a ausência de menção quanto em qual equipamento seria avaliado esse sistema. Isso porque o manipulador de soldagem, os servos drivers, o gabinete eletroeletrônico e a forma de comunicação através do protocolo SPI sobre a porta paralela já estavam determinados em decorrência de estudos anteriores,

razão pela qual a retomada de suas definições foi aglutinada no Capítulo 3. A gênese deste trabalho se deu com o estudo daquilo que estava concretizado e com a definição dos requisitos do sistema que deveria ser construído sobre aquela base, que culminaram nos três grandes tópicos contidos na questão de pesquisa: trajetórias, correção e sincronização.

As trajetórias e suas transformações formaram, sem dúvida, o cerne do sistema. As etapas para sua concepção foram: pesquisa sobre as trajetórias utilizadas em soldagens, suas modelagens matemáticas, agrupamento de abordagens similares (e.g. triangular e trapezoidal; circular e duplo oito), cálculos cinemáticos e transformações (e.g. plano inclinado e eixo circular). Dessas etapas, vale mencionar a preferência dada à utilização de álgebra vetorial e geometria diferencial nas modelagens. Essa escolha permitiu maior agilidade nas implementações e rápido alcance de resultados satisfatórios. Reconhece-se, todavia, que isso foi possível especialmente pela concepção mecânica da cadeia cinemática. Os eixos de posicionamento em série seguidos pelos eixos paralelos de orientação facilitaram essa adoção.

Ainda relacionado às trajetórias, mais especificamente à transformação em eixo circular, cumpre-se lembrar das dificuldades encontradas com o curso limitado do manipulador. Já nas etapas finais de desenvolvimento percebeu-se que as correções necessárias ao acompanhamento da orientação da tocha em trajetórias dispostas em eixo circular eram diretamente afetadas pelo comprimento entre o ponto de fixação da tocha e sua ponta e também pelo raio da circunferência na qual a trajetória era disposta. Por essas razões, ficou evidente que faltaria curso nos eixos Y e Z para aplicações desse tipo. De todo modo, pudemos validar o desenvolvimento com raio limitado e tocha mais curta, suplantando ao menos a demonstração teórica em relação à aplicabilidade do sistema.

O desenvolvimento das correções e sincronização, dada o projeto modular da modelagem orientada a objetos e da utilização de padrões de projeto, ocorreu sem maiores percalços. Isso assim se sucedeu pela determinação dos dados associados às coordenadas (Tabela 1) e porque na concepção das classes de mais alto nível, já foram previstos os mecanismos através dos quais cada trajetória poderia ser configurada ou modificada.

De modo geral, dificuldades pontuais de ordem mecânica e de interferência eletromagnética causaram contratempos que puderam ser transpostos. Por essas razões, consideram-se alcançados os objetivos propostos e espera-se que, em trabalhos futuros, o manipulador ganhe

maior robustez e aprimoramento, para que possa ser explorado com fins acadêmicos e/ou comerciais.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Diversas possibilidades de melhorias podem ainda ser implementadas. Classificá-las-emos em categorias: interface com usuário, comunicação com servos *drivers*, trajetórias e procedimentos de soldagem.

Em relação à interface com usuário, muito pode ser feito. As telas do software foram organizadas unicamente para oferecer ao usuário a manipulação das variáveis das trajetórias e demais funcionalidades de comando do manipulador. Não houve pesquisa com potenciais usuários em chão de fábrica, nem tampouco estudos de ergonomia e usabilidade que pudesse tornar o processo mais amigável e intuitivo. Além disso, a utilização de um computador, ainda que portátil, para configuração e correção das trajetórias não é adequada a ambientes industriais, ou mesmo para uso em campo. Por essa razão, já está em andamento um projeto para o desenvolvimento de uma IHM com processamento embarcado que substitui o computador. A principal desvantagem de tal abordagem seria a perda da capacidade que monitor, teclado e mouse dão na interação com o sistema. Entretanto, o problema poderia ser mitigado tanto com telas *touchscreen* com boa resolução quanto com a possibilidade de carregamento pelo *software* embarcado de dados originados no computador.

No tocante à comunicação com os *drivers*, há dois principais problemas: um está relacionado à porta paralela e seu comando via sistema operacional de uso geral; outro à limitação temporal dos drivers em receber comandos de alto nível via SPI. A porta paralela está, de maneira geral, em desuso, e por isso nem sequer acompanha a maioria dos computadores de mesa vendidos atualmente, quanto mais os computadores portáteis. Além disso, sistemas operacionais de uso geral, como o Windows, não são adequados a sistemas de tempo real com alta resolução, ainda mais quando é necessária a utilização de vários fluxos de execução, como quando se utiliza a interface gráfica. Em razão disso, o intervalo com o qual dois comandos consecutivos de velocidade e posição podem ser enviados é limitado, o que acaba limitando também o comprimento de segmento mínimo que pode ser executado, a depender da velocidade. Para a soldagem, que tem maior tolerância a pequenas imprecisões, isso não chega a ser um grande empecilho. Levar o *software* de comando para um sistema embarcado resolve em grande

parte o problema, pois, nesse caso, o controle de tempo é bastante preciso e de alta resolução. Maior precisão ainda seria possível se o controle passasse para pulso e direção, ao invés de comandos de alto nível, embora isso incorresse em custo de desenvolvimento das curvas de velocidade e geração dos sinais.

Outras possibilidades de melhoria estão relacionadas às trajetórias. Ao invés de apenas eixo linear e circular, poderia ser adicionado o suporte à disposição das oscilações em eixos quaisquer, com *splines*, curvas definidas em cada trecho por diferentes polinômios. Assim, a correspondência com *softwares* CAD se tornaria direta, e projetos de peças poderiam ser importados no *software* de soldagem. Também relacionado às trajetórias, mais precisamente à sua correção, malhas de controle que considerem a leitura de sensores podem ser adicionadas. O sensor de arco seria o mais viável, pois bastaria a medição de uma das grandezas de tensão ou corrente do arco elétrico e estabelecimento de interface desse sensor com o software, além do desenvolvimento do controle. O suporte a outros sensores e malhas, como emissores laser e câmera, poderiam também ser implementados.

Atualmente, cada cordão deve ser parametrizado e executado por vez. Soldagens de revestimento demandam que dezenas de cordões sejam executados consecutivamente, um ao lado do outro, o que tornaria dispendioso o processo. Para soldagens de união, é natural fazer um passe de raiz com um tipo de oscilação e, em seguida, camadas sucessivas de cordões para preencher a junta com outro(s) tipo(s). Esse processo também seria agilizado se fosse possível, no *software*, determinar um lote de cordões a serem executados em sequência. Além disso, o salvamento e carregamento de arquivos seria outra funcionalidade que facilitaria a retomada de configurações de trajetórias já programadas anteriormente. Outra possível melhoria seria na utilização das trajetórias em eixo circular. Ao invés da determinação do ponto inicial e central, que pode ser de difícil obtenção, poderiam ser fornecidos três pontos da circunferência, cujo centro e raio seriam estimados por métodos numéricos que minimizam ao máximo o erro em relação aos pontos fornecidos, como o método dos mínimos quadrados [49]. Por se tratar de um protótipo e servir como prova de conceito das trajetórias, correções e sincronismo, essas melhorias foram deixadas em segundo plano.

## REFERÊNCIAS

1. CARVALHO, R. S. **Robô CNC para a Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2009.
2. LUCAS, R. P. **Sistema de Geração de Trajetórias em Manipulador Cartesiano para Aplicações na Soldagem Naval**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. 2011.
3. SCIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Modelling and Control of Robot Manipulators**. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: CreateSpace Independent Publishing Platform, 2000.
4. DUTRA, J. C. et al. Automating a Wheel Manufacturing Operation. **Welding Journal**, v. 93, p. 76-84, Junho 2014.
5. DUTRA, J. C. et al. Improving Surfacing Performance with GMAW. **Welding Journal**, v. 92, p. 42-47, Maio 2013.
6. CN2391712Y. **Mobile and intelligent type numerical control gas cutting machine**, 2000. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/CN2391712Y?cl=en>>.
7. BONIN, C. **Proposta de um Sistema de Baixo Custo para o Controle de Movimentos em Estruturas Multieixos**. Dissertação (Mestrado Profissional em Mecatrônica). Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina. Florianópolis. 2013.
8. HUBERT, I. L. et al. **Manipulador Cartesiano de Cadeia Cinemática Mista - Desenvolvimento Mecânico para a Execução de Movimentos de Oscilação da Tocha na Soldagem a Arco Elétrico**. Anais do XL CONSOLDA - Congresso Nacional de

Soldagem e I Congresso Panamericano de Soldagem. São Paulo: [s.n.]. 2014.

9. SYSTEMS, BUG-O. Powerful Automation Solutions for Welding and Cutting. Disponível em: <<http://www.bugo.com/products>>. Acesso em: 14 Setembro 2014.
10. SPS SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. Tartílopes. Disponível em: <<http://sps-soldagem.com.br/produtos.php>>. Acesso em: 14 Setembro 2014.
11. MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem - fundamentos e tecnologia**. 3ª. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
12. PESSOA, A. R. P. et al. Seleção dos parâmetros através dos custos de soldagem para aplicação de revestimento com ligas de níquel depositadas pelo processo MIG/MAG. **Soldag. insp.**, São Paulo, 16, n. 1, Jan/Mar 2011. 71-78.
13. SPS - SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. Disponível em: <<http://sps-soldagem.com.br/>>. Acesso em: 27 Setembro 2014.
14. SPS SISTEMAS E PROCESSOS DE SOLDAGEM. Produtos - Tartílope V4. **Catálogo - Tartílope V4**. Disponível em: <[http://sps-soldagem.com.br/catalogo/07-08\\_Tartilope\\_V4.pdf](http://sps-soldagem.com.br/catalogo/07-08_Tartilope_V4.pdf)>. Acesso em: 15 Setembro 2014.
15. MADSEN, O. et al. A system for complex robotic welding. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 29, n. 2, p. 127-131, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/01439910210419132>>.
16. PIRES, J. N. et al. Object oriented and distributed software applied to industrial robotic welding. **Industrial Robot: And International Journal**, v. 29, n. 2, p. 149-161, 2002. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1108/01439910210419169>>.
17. JIN, B. et al. **Control of back weld pool shape in MIG**

- welding by using switch back method.** Industry Applications Conference, 1995. Thirtieth IAS Annual Meeting, IAS '95., Conference Record of the 1995 IEEE. [S.l.]: [s.n.]. 1995. p. 1835-1840.
18. YAMANE, S. et al. Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, p. 138-148, 2004. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1179/136217104225017044>>.
  19. EGUCHI, K. et al. Sensing of Arc Length and Wire Extension Using Neural Network in Robotic Welding. **Rough Sets and Current Trends in Computing**, 1424, 1998. Disponivel em: <[http://dx.doi.org/10.1007/3-540-69115-4\\_23](http://dx.doi.org/10.1007/3-540-69115-4_23)>.
  20. BONACORSO, N. G. et al. **Desenvolvimento de uma Célula de Fabricação Automatizada para Soldagem GMAW dos Componentes Estruturais das Rodas Metálicas de Tratores Agrícolas.** Anais do XXXVII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem. Natal: [s.n.]. 2011.
  21. LABSOLDA. Manual Tartilope V4. **Projetos - Produtos Gerados - Manuais.** Disponivel em: <[http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/tartilope\\_V4\\_manual\\_usuario\\_\(2010\).pdf](http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/manuais/tartilope_V4_manual_usuario_(2010).pdf)>. Acesso em: 15 Setembro 2014.
  22. KODAMA, S. et al. Arc sensor sensitivity in short circuiting metal active gas welding with high speed torch oscillation. **Science & Technology of Welding & Joining**, 11, 2006. 25-32.
  23. WANG, J. et al. A Swing Arc System for Narrow Gap GMA Welding. **ISIJ International**, 52, 2012. 110-114. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.2355/isijinternational.52.110>>.
  24. YAMANE, S. et al. Sensing and seam tracking of welding line in backingless V groove welding. **Science and Technology of Welding & Joining**, 11, Setembro 2006. 586-592. Disponivel em:

<<http://dx.doi.org/10.1179/174329306X150153>>.

25. YAMANE, S. et al. In Process Control of Weld Pool using Weaving Control in Switch Back Welding. **Quarterly Journal of the Japan Welding Society**, 27, 2009. 32s-36s.
26. MOON, H.-S.; KO, S.-H.; KIM, J.-C. Automatic seam tracking in pipeline welding with narrow groove. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, n. 3-4, p. 234-241, 2009. ISSN 0268-3768. Disponivel em: <<http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00170-008-1474-9>>.
27. KARAFI, M. et al. Study on automatic control of arc gap in robotic TIG welding. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 50, n. 9-12, p. 953-960, 2010. ISSN 0268-3768. Disponivel em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s00170-010-2564-z>>.
28. KIM, J. -W.; NA, S. -J. A Study on an Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding of Horizontal Fillets. **Welding Journal**, p. 216s-221s, Agosto 1991. ISSN 0043-2296.
29. SHI, Y.-H.; KIM, J.-T.; NA, S.-J. **Signal Patterns of High Speed Rotational Arc Sensor for Gas Metal Arc Welding**. Sensors for Industry Conference, 2005. Houston: [s.n.]. 2005. p. 9-14.
30. GAO, B. Y. F.; ZHANG, H.; MAO, Z. W. Welding Gun Inclination Detection and Curved Fillet Weld Joint Tracking. **Welding Journal**, p. 45s-53s, Março 2009.
31. SHI, Y. H.; YOO, W. S.; NA, S. J. Mathematical modelling of rotational arc sensor in GMAW and its applications to seam tracking and endpoint detection. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 6 , p. 723-730, 2006.
32. KIM, J. -W.; NA, S. -J. A Self-Organizing Fuzzy Control Approach to Arc Sensor for Weld Joint Tracking in Gas Metal Arc Welding of Butt Joints. **Welding Journal**, p. 60s-66s, Fevereiro 1993. ISSN 0043-2296.

33. KAWAHARA, M. Tracking Control System Using Image Sensor for Arc Welding. **Automatica**, 19, n. 4, Julho 1983. 357-363. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098\(83\)90049-3](http://dx.doi.org/10.1016/0005-1098(83)90049-3)>.
34. KIM, J.-W.; BAE, H.-S. A Study on a Vision Sensor System for Tracking the I-Butt Weld Joints. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v. 19, n. 10, p. 1856-1863, 2005. ISSN 1738-494X. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/BF02984264>>.
35. SHEN, H. et al. Real-Time Seam Tracking Technology of Welding Robot with Visual Sensing. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 59, n. 3-4, p. 283-298, 2010. ISSN 0921-0296. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10846-010-9403-1>>.
36. LI, H. C.; GAO, H. M.; WU, L. Teleteaching approach for sensor-based arc welding telerobotic system. **Industrial Robot: An International Journal**, v. 34, n. 5, p. 423-429, 2007.
37. VIVIANI, A. B. et al. **Desenvolvimento de Sistema para Medição do Volume de Chanfros para Soldagem Utilizando Tecnologia de Medição a Laser**. Anais do VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Uberlândia: ABCM - Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas. 2014.
38. PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BÖLMSJO, G. **Welding Robots: Technology, System Issues and Application**. [S.l.]: Springer-Verlag London Limited, 2006. 180 p. ISBN 1852339535.
39. XU, Y. et al. Research on the Real-time Tracking Information of Three-dimension Welding Seam in Robotic GTAW Process Based on Composite Sensor Technology. **Journal of Intelligent & Robotic Systems**, v. 68, n. 2, p. 89-103, 2012. ISSN 0921-0296. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10846-012-9672-y>>.
40. ZHANG, W. J.; ZHANG, Y. M. Dynamic Control of the GTAW Process Using a Human Welder Response

Model. **Welding Journal**, v. 92, p. 154s-166s, Maio 2013.

41. ART SOFT. Mach3 - Newflanged Solutions. Disponível em: <<http://www.machsupport.com/software/mach3/>>. Acesso em: 08 Fevereiro 2015.
42. CIRINO, L. M. **Estudo dos Efeitos da Polaridade na Soldagem com Corrente Contínua e Alternada pelos Processos TIG e MIG/MAG**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, p. 112. 2009.
43. PUHL, E. B.; DUTRA, J. C.; BONACORSO, N. G. **Estudo da Aplicabilidade do MIG/MAG com Polaridade Negativa para Soldagens de Alta Velocidade em Peças da Indústria Automotiva**. Anais do XXXVII CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem. Natal: [s.n.]. 2011.
44. TETSUO ERA, K.; HIROYASU MONDORI, I. **Polarity switching short circuiting arc welding method**. US7800016B2, 21 Setembro 2010.
45. PIRES, R. P. et al. **Manipulador Cartesiano de Cadeia Cinemática Mista - Desenvolvimento Eletroeletrônico e Computacional para a Geração, Execução e Correção de Trajetórias de Soldagem**. I Congresso Pan-Americano de Soldagem e XL CONSOLDA - Congresso Nacional de Soldagem. São Paulo: [s.n.]. 2014.
46. GAMMA, E. et al. **Design Patterns: Elements of Reusable Object-oriented Software**. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1995. ISBN 0-201-63361-2.
47. BOOST COMMUNITY. **Boost C++ Libraries**. Disponível em: <<http://www.boost.org/>>. Acesso em: 28 Outubro 2014.
48. DIGIA PLC. Qt Project. Disponível em: <<http://qt-project.org/>>. Acesso em: 28 Outubro 2014.
49. RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. D. R. **Cálculo**

- Numérico:** Aspectos Teóricos e Computacionais. 2<sup>a</sup>. ed. [S.l.]: Makron, 1996. ISBN 8534602042.
50. PESSOA, A. R. P. et al. Seleção de Parâmetros Através do Método Taguchi para Soldagem de Revestimento com Ligas de Níquel pelo Processo MIG/MAG. **Soldag. insp.**, São Paulo, 15, n. 4, Out/Dez 2010. 317-324.



## **APÊNDICES**



## APÊNDICE 1 – Ângulos de Euler

Os três ângulos de Euler são usados para descrever a orientação de um corpo rígido. Qualquer rotação de um objeto tridimensional pode ser realizada através dessas três rotações consecutivas a partir de um sistema de coordenadas de referência. A Figura 61 ilustra esses ângulos e os eixos ao redor dos quais cada rotação é feita. A primeira rotação é feita com um ângulo  $\alpha$  em torno do eixo  $z$ . Em seguida, gira-se um ângulo  $\beta$  ao redor de  $x'$ , o eixo  $x$  resultante após a primeira transformação. Por fim, uma rotação de ângulo  $\gamma$  é feita ao redor de  $z''$ , o eixo  $z$  resultante após as duas primeiras transformações. A matriz de rotação é composta pela multiplicação das três matrizes individuais, conforme a Equação (12).

$$\begin{pmatrix} \cos \gamma & \operatorname{sen} \gamma & 0 \\ -\operatorname{sen} \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \beta & \operatorname{sen} \beta \\ 0 & -\operatorname{sen} \beta & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \alpha & \operatorname{sen} \alpha & 0 \\ -\operatorname{sen} \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

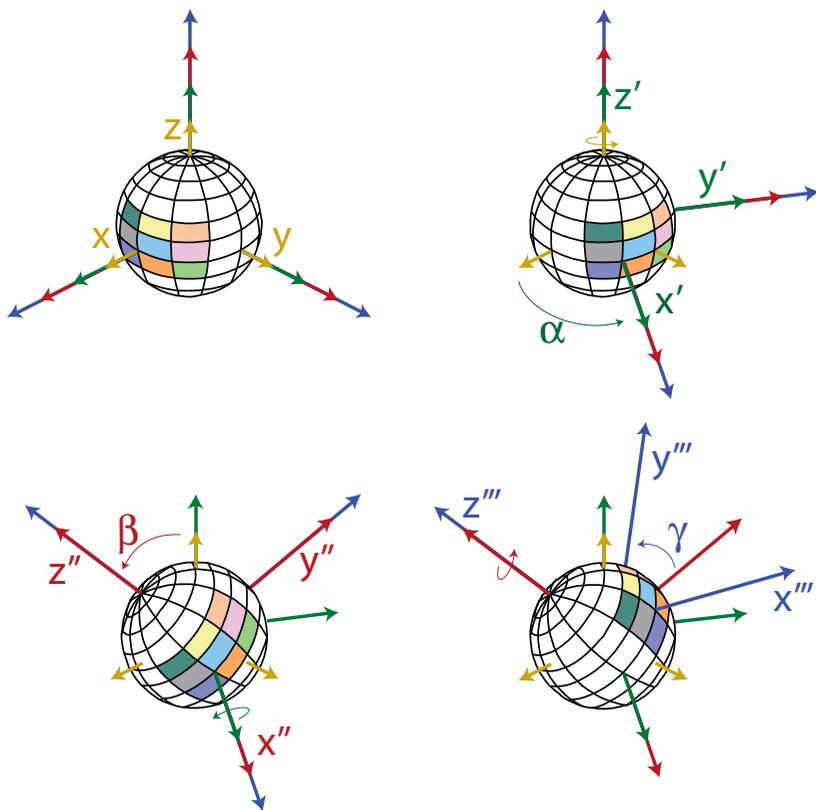


Figura 61 Sequência de rotações para orientação 3D com os ângulos de Euler

## APÊNDICE 2 – Transformação em eixo parabólico

A transformação de uma lista de pontos em eixo parabólico é um pouco mais complexa do que a em eixo circular, descrita na seção 4.2.8. Tomando a função  $f(x) = x^2$  como eixo e aplicando o mesmo método, teríamos como comprimento de arco a Equação (13).

$$s = \int_a^b \sqrt{1 + 4x^2} dx = \left[ \frac{x}{2} \sqrt{1 + 4x^2} + \frac{1}{4} \ln \left( 2x + \sqrt{1 + 4x^2} \right) \right]_a^b \quad (13)$$

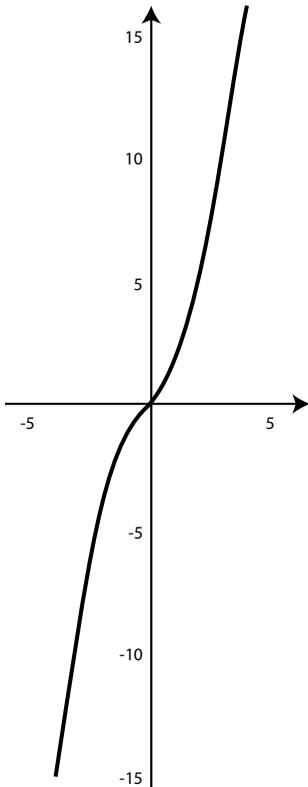


Figura 62 Gráfico do comprimento de arco para função quadrática

Essa equação, como é de se notar, não é facilmente invertível. Entretanto, pelo seu gráfico, conforme Figura 62, pode-se notar que tem rápida convergência ao aplicar o método numérico de Newton-Raphson para determinar zeros de funções. Tal método se baseia em uma estimativa inicial  $t$  que converge para o zero da função através da tangente da curva naquele ponto, obtida pela sua derivada, até que o erro  $\varepsilon$  seja menor que um limite pré-estabelecido  $lim$ . O algoritmo é esboçado em pseudocódigo na Figura 63. Nela, o parâmetro  $s$  determina o comprimento do arco cujo inverso se quer encontrar.

```

lim ← 10-10
t ← 0
ε ← ∞
Enquanto( |ε| > lim )
    ε ← s(t) - s
    t ← t - ε / s'(t)

```

Figura 63 Método de Newton-Raphson aplicado ao comprimento do arco

Obtido o inverso do comprimento de arco  $t$ , o restante do processo é similar ao da circunferência. Um vetor tangente a esse ponto na curva  $(x, x^2, 0)$  seria  $\vec{v}_x = [1 \ 2t \ 0]$  e  $\vec{b}_x = \vec{v}_x / |\vec{v}_x|$ . Os demais vetores da base são obtidos da mesma forma descrita na seção 4.2.8. Por fim, o ponto  $P (p_x, p_y, p_z)$  seria transformado em  $P_t = [t \ t^2 \ 0] + p_y \vec{b}_y + p_z \vec{b}_z$ . A Figura 64 ilustra uma trajetória em duplo oito transformada por esse método.

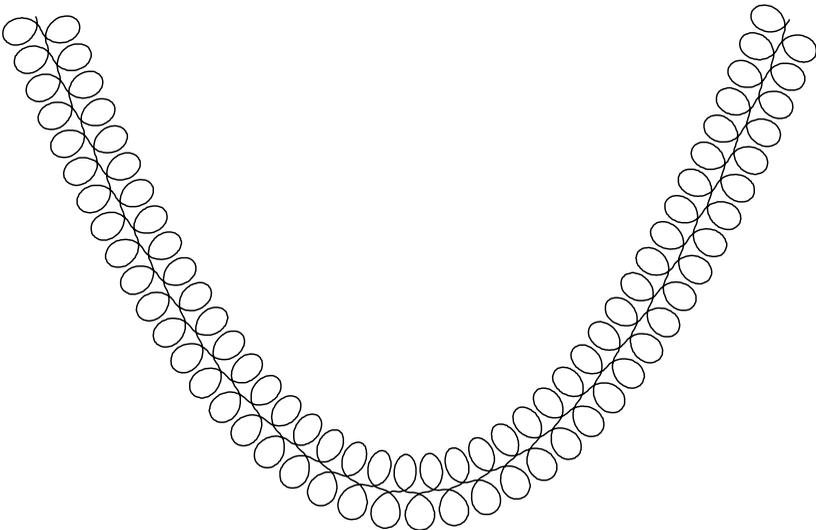


Figura 64 Trajetória em duplo oito disposta em eixo parabólico

## **ANEXOS**



## ANEXO 1 - Comandos enviados aos drivers

### Consulta

Comando	Valor
CMD_GET_PARAM	52

Pede ao driver o valor do parâmetro indicado pelo índice da Tabela 6, com a qual é concatenado, totalizando uma requisição de 32 bits.

### Comandos

Comando	Valor
CMD_UPLOAD_PARAM	50

Envia o valor de um parâmetro.

É concatenado em 32 bits com o valor do parâmetro (16 bits) que será enviado juntamente com CMD\_SET\_PARAM ou CMD\_ABS32\_TARGET\_VALUE.

Comando	Valor
CMD_SET_PARAM	51

Reescreve o valor de um parâmetro.

É concatenado em 32 bits com o número do parâmetro a ser escrito (Tabela 6) e enviado juntamente com CMD\_UPLOAD\_PARAM com o novo valor do parâmetro, totalizando 64 bits.

Comando	Valor
CMD_ABS32_TARGET_VALUE	33

No modo posição, determina uma posição absoluta para onde o eixo deve seguir. O parâmetro é dividido em duas partes de 16 bits, a primeira concatenada com

CMD\_UPLOAD\_PARAM, e a segunda com CMD\_ABS32\_TARGET\_VALUE, totalizando uma requisição de 64 bits.

<b>Comando</b>	<b>Valor</b>
CMD_HOMING	60

Solicita o início (1) ou o cancelamento (0) do procedimento de busca de zeros. É concatenado com uma dessas opções formando um comando de 32 bits.

<b>Comando</b>	<b>Valor</b>
CMD_CLR_FAULTBITS	20

Solicita a limpeza dos bits de falha do *driver*. É concatenado em 32 bits com a máscara de quais bits devem ser limpos.

<b>Comando</b>	<b>Valor</b>
CMD_NOP	2

É necessário enviar esse comando quando houver pulsos de *clock* a fim de comandar outro *driver* e nenhuma ação é requerida do *driver* para o qual o comando CMD\_NOP é enviado.

<b>Parâmetro</b>	<b>Índice</b>
Limite de velocidade	0
Limite de aceleração	1
Bits de falha	6
Bits de estado	7

Tabela 6 Lista de parâmetros a serem usados com CMD\_GET\_PARAM e CMD\_SET\_PARAM