

Douglas Ferronato Tavares

**SISTEMA DE MEDIÇÃO ANGULAR BASEADO EM SENSORES
INERCIAIS PARA APLICAÇÕES NO CONTROLE DE UM
MANIPULADOR ROBÓTICO DE SOLDAGEM ORBITAL**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Elétrica da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Régis Henrique
Gonçalves e Silva, Dr.

Coorientador: Dr. Cleber Marques.

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tavares, Douglas Ferronato
SISTEMA DE MEDIÇÃO ANGULAR BASEADO EM SENSORES
INERCIAIS PARA APLICAÇÕES NO CONTROLE DE UM
MANIPULADOR ROBÓTICO DE SOLDAGEM ORBITAL / Douglas
Ferronato Tavares ; orientador, Régis Henrique
Gonçalves e Silva, coorientador, Cleber Marques,
2019.
96 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Elétrica,
Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

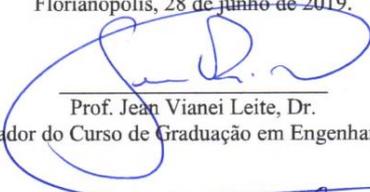
1. Engenharia Elétrica. 2. Soldagem Orbital. 3.
Sensores Inerciais. 4. Controle de processos. 5.
Sistemas embarcados. I. Silva, Régis Henrique
Gonçalves e . II. Marques, Cleber. III. Universidade
Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia
Elétrica. IV. Título.

Douglas Ferronato Tavares

**SISTEMA DE MEDIÇÃO ANGULAR BASEADO EM SENSORES INERCIAIS PARA
APLICAÇÕES NO CONTROLE DE UM MANIPULADOR ROBÓTICO DE
SOLDAGEM ORBITAL**

Este Trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora

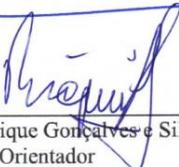
Florianópolis, 28 de junho de 2019.



Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

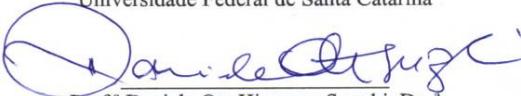
Banca Examinadora:



Prof. Régis Henrique Gonçalves e Silva, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina



Prof.ª Daniela Ota Hisayasu Suzuki, Dr.ª

Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Elétrico, Raul Gohr Junior, Dr.

IMC - Soldagem

Este trabalho é dedicado à minha
querida mãe, Vilmarise.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, inicialmente, à minha família por todo apoio e assistência durante a graduação.

A todos os meus colegas com quem compartilhei horas de estudo e de diversão e que foram de fundamental importância nessa jornada.

À equipe de eletrônica do LABSOLDA pelo incentivo e pelas contribuições no trabalho. Em especial, agradeço ao Felipe Kalil e ao Rafael Horn pelas discussões e desenvolvimentos conjuntos e ao Fernando Costenaro pelo auxílio com o Tartilope e pela criteriosa revisão de partes do trabalho.

Um agradecimento especial aos tios Telma e Gustavo pelo apoio em momentos difíceis e à minha mãe, Vilmarise, que não mediu esforços para permitir que eu me graduasse.

Não creio que haja uma emoção mais intensa para um inventor do que ver suas criações funcionando. Essa emoção faz você esquecer de comer, de dormir, de tudo.
(Nikola Tesla)

RESUMO

A construção de uma linha dutoviária passa pelo processo conhecido como soldagem orbital, que é utilizado para unir os segmentos de tubos que a compõem. Neste processo, o manipulador de soldagem descreve uma trajetória circular em torno do tubo enquanto realiza a soldagem. Tal geometria faz com que a inclinação do plano de soldagem se altere durante a execução da solda. A variação da posição de soldagem traz tendências de escorrimento do metal, que se encontra no estado líquido devido à alta temperatura do arco elétrico, gerando problemas como falta de fusão, alteração no formato do cordão ou perfuração da peça. Um recurso para diminuir os efeitos negativos da variação da posição de soldagem é a execução de tecimento, que caracteriza uma oscilação da tocha na direção perpendicular à direção de soldagem. Os padrões de tecimento precisam ser variáveis em função da posição, deste modo, este trabalho apresenta um método de identificação da inclinação do plano de soldagem, através de sensores inerciais, que alimenta um sistema embarcado no processador do manipulador robótico de soldagem, Tartílope, que gera correção dos padrões de movimento à medida em que a inclinação da posição de soldagem varia. Um protótipo foi criado para verificar a possibilidade do uso de sensores inerciais neste tipo de aplicação. Sua funcionalidade foi comprovada por meio de testes realizados através da medição dos parâmetros de tecimento que eram executados pelo manipulador conforme a trajetória circular de soldagem era percorrida. O resultado dos testes mostrou que o protótipo tem condições de ser incorporado ao sistema do Tartílope para atuar como sensor em um sistema de controle do padrão de tecimento em função da inclinação.

Palavras-chave: Soldagem Orbital. Sensores Inerciais. Automação de processos de soldagem.

ABSTRACT

The construction of a pipeline goes through a process known as orbital welding, which is used to join the segments of tubes that compose it. In this process, the welding handler describes a circular path around the pipe, while performing welding. This geometry causes the inclination of the welding plane to change during the welding execution. The variation of the welding position brings tendencies of the metal runoff, which is in the liquid state due to the high temperature of the electric arc, causing problems such as lack of fusion, change in the shape of the weld bead or drilling of the part. One feature to decrease the negative effects of varying the welding position is the weaving application, which characterizes a torch swing in the perpendicular direction to the welding direction. The weaving patterns need to be variable depending on the welding position, thus, this work presents a method of identification of the tilt of the welding plane, through inertial sensors, which feeds an embedded system in the processor of the robotic welding manipulator, Tartílope, which generates correction of the motion patterns as the inclination of the welding position varies. A prototype was created to verify the possibility of using inertial sensors in this type of application. Its functionality was proven by measuring the motion parameters that were executed by the robot while the circular welding path was traversed. The result of the tests showed that the prototype is able to be incorporated into the Tartílope system to act as a sensor in a system of control of the weaving pattern in function of the inclination of the welding plane.

Keywords: Orbital Welding. Inertial Sensors. Automation of welding processes.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1: Manipulador de soldagem dedicado à soldagem orbital Tartflope V4..... | 28 |
| Figura 2: Efeito da gravidade sobre a poça de fusão..... | 30 |
| Figura 3: Sistema de referência..... | 35 |
| Figura 4: a) Rotação em torno do eixo Z. b) Rotação em torno do eixo X. c) Rotação em torno do novo eixo Z..... | 37 |
| Figura 5: Giroscópio MEMS [14]..... | 39 |
| Figura 6: Composição de uma IMU..... | 41 |
| Figura 7: Diagrama de blocos de uma IMU..... | 42 |
| Figura 8: Ligação entre dispositivos UART..... | 44 |
| Figura 9: Funcionamento de flip-flop D..... | 45 |
| Figura 10: Ligação de flip-flops D em cascata para gerar um conversor paralelo-serial..... | 45 |
| Figura 11: Conversão serial para paralelo..... | 46 |
| Figura 12: RS-232 usado como meio para comunicação entre dispositivos..... | 48 |
| Figura 13: Barramento RS-485 nos modos (a) Full-Duplex e (b) Half-Duplex..... | 49 |
| Figura 14: Diagrama ilustrativo de barramento I ² C..... | 51 |
| Figura 15: Diagrama de funcionamento de barramento I ² C..... | 52 |
| Figura 16: Cabo com proteção por malha de terra..... | 56 |
| Figura 17: Ligação de dispositivos com suas partições blindantes conectadas via malha de terra do cabo..... | 56 |
| Figura 18: Tipos de tecimento: (a) Triangular, (b) Linear, (c) Trapezoidal e (d) Senoidal..... | 58 |
| Figura 19: Medição de ângulo sem processamento pelo DMP..... | 63 |
| Figura 20: Medição de ângulo processado pelo DMP..... | 64 |
| Figura 21: Barramento 3,3Vcc do processador atacado por ruído eletromagnético..... | 66 |
| Figura 22: Características do cabo degradando sinal de clock..... | 67 |
| Figura 23: Sinal de clock do barramento I ² C para linhas de sinal curtas..... | 69 |
| Figura 24: Composição das posições de soldagem em cada quadrante..... | 70 |
| Figura 25: Fator de ponderação para os parâmetros de soldagem..... | 72 |
| Figura 26: Diagrama de blocos de protótipo..... | 74 |
| Figura 27: Protótipo de medição angular aberto..... | 75 |
| Figura 28: Protótipo de medição angular em seu invólucro metálico ... | 76 |
| Figura 29: Equipamentos posicionados para teste..... | 78 |
| Figura 30: Detalhe na fixação dos sensores..... | 79 |

| | |
|---|----|
| Figura 31: Alteração do movimento de tecimento em função da inclinação do plano de soldagem..... | 80 |
| Figura 32: Movimento do eixo Y do manipulador na posição plana | 81 |
| Figura 33: Detalhe em movimento do eixo Y na posição plana mostrando divergência na execução de tempo de parada | 81 |
| Figura 34: Movimento do manipulador na posição vertical descendente | 82 |
| Figura 35: Movimento do manipulador na posição sobre-cabeça..... | 83 |
| Figura 36: Movimento do manipulador na posição vertical ascendente | 83 |
| Figura 37: Detalhe dos tempos de parada | 84 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1: Parâmetros de referência carregados no Tartílope | 79 |
| Tabela 2: Parametrização e resposta medida para as posições plana e descendente | 85 |
| Tabela 3: Parametrização e resposta medida para as posições sobre-cabeça e ascendente..... | 85 |
| Tabela 4: Comando gerado pelo sistema e resposta medida | 85 |
| Tabela 5: Dados de movimento para inclinações indicadas | 86 |
| Tabela 6: Cálculo de velocidade média em uma revolução completa... | 87 |

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CSI – Cabeçote de Soldagem Interna
DCE – Data Communication Equipment
DMP – Digital Motion Processor
DTE – Data Terminal Equipment
EIA – Electronics Industry Association
FIFO – First In/First Out
I²C – Inter Integrated Circuits
IHM – Interface Homem Máquina
IMU – Inertial Measurement Unit
LABSOLDA – Instituto de Soldagem e Mecatrônica
MEMS – Micro-Eleto-Mechanical Systems
PL – Posição plana de soldagem
SAP - Sistema Portátil de Monitoração de Variáveis de Soldagem
SC – Posição sobre-cabeça de soldagem
SCL – Serial Clock
SDA – Serial Data
TTL – Transistor-Transistor Logic
UART – Universal Asynchronous Receiver Transmitter
VA – Posição vertical ascendente de soldagem
VD – Posição vertical descendente de soldagem
ZRO – Zero Rate Output

SUMÁRIO

| | | |
|--------------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 27 |
| 1.1 | PROBLEMA INERENTE À SOLDAGEM ORBITAL | 29 |
| 1.2 | CONTROLE DA POÇA DE FUSÃO | 32 |
| 1.2.1 | Objetivo geral | 34 |
| 1.2.2 | Objetivos específicos | 34 |
| 2 | REVISÃO TEÓRICA..... | 35 |
| 2.1 | ÂNGULO DE EULER..... | 35 |
| 2.2 | REPRESENTAÇÃO POR QUATÉRNIONS | 38 |
| 2.3 | MEMS – Sistemas Micro Eletromecânicos | 39 |
| 2.3.1 | Acelerômetro MEMS | 40 |
| 2.3.2 | Giroscópio MEMS..... | 40 |
| 2.4 | UNIDADE DE MEDIÇÃO INERCIAL | 41 |
| 2.5 | COMUNICAÇÃO SERIAL..... | 43 |
| 2.5.1 | Protocolo UART..... | 44 |
| 2.5.1.1 | PROTOCOLO DE BARRAMENTO EIA RS-232..... | 47 |
| 2.5.1.2 | PROTOCOLO EIA RS-485..... | 49 |
| 2.5.2 | Comunicação I²C..... | 50 |
| 2.6 | COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA..... | 52 |
| 2.6.1 | Blindagem de cabos..... | 55 |
| 3 | O TARTÍLOPE NO PROCESSO ORBITAL | 57 |
| 4 | DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO | 61 |
| 4.1 | LEITURA E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS | 62 |
| 4.1.1 | Leitura de dados brutos e processamento via software ... | 62 |
| 4.1.2 | Leitura de dados processados pelo DMP | 64 |
| 4.2 | COMUNICAÇÃO ENTRE SENSOR E TARTÍLOPE | 65 |
| 4.3 | CÁLCULO ADAPTATIVO DE PARÂMETROS | 69 |
| 4.4 | INTERFACE COM O USUÁRIO | 73 |
| 4.5 | PROTÓTIPO..... | 74 |
| 5 | RESULTADOS OBTIDOS | 77 |

| | | |
|----------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 5.1 | DESCRIÇÃO DO TESTE E RESULTADOS..... | 77 |
| 5.2 | DISCUSSÕES | 87 |
| 6 | CONCLUSÃO..... | 89 |
| | REFERÊNCIAS..... | 91 |
| | APÊNDICE A – Descrição | Erro! Indicador não definido. |
| | ANEXO A – Descrição | Erro! Indicador não definido. |

1 INTRODUÇÃO

O uso da eletricidade como fonte de energia para processos de soldagem remonta ao ano de 1865. À época, foi possível unir duas peças metálicas através da passagem de corrente elétrica entre elas, produzindo uma solda por fusão. Duas décadas depois, na Inglaterra, foi patenteado o primeiro processo de soldagem a arco, onde o arco elétrico era aberto entre a peça e um eletrodo de carbono não consumível, que era manuseado por sobre a junta a ser soldada [1].

A crescente demanda por reparos com solda impulsionou as pesquisas relacionadas ao processo de soldagem a arco. Passaram a ser utilizados eletrodos consumíveis de aço nu, porém, o uso deste tipo de eletrodo resultava em uma solda de baixa qualidade.

Impulsionado pela indústria naval, em 1904, o engenheiro sueco Oscar Kjellberg desenvolveu o primeiro eletrodo revestido, visando proteger a região soldada dos efeitos oxidantes e corrosivos da atmosfera. Tal avanço coloca o processo de soldagem em um novo patamar de desenvolvimento, tornando o seu uso mais eficiente e produtivo [1]. Desde então, os processos de soldagem vêm sendo sofisticados, visando atender às crescentes demandas da indústria como um todo. Os avanços expressivos no controle térmico e de transferência metálica permitem que atualmente a soldagem seja utilizada não somente na junção de peças, mas também em processos de revestimento e manufatura aditiva, aumentando sua aplicabilidade em diversos setores da indústria.

A indústria do petróleo e gás natural, por exemplo, tem necessidades específicas relacionadas à construção das linhas de dutos, responsáveis pelo transporte de combustíveis e matérias primas, bem como na construção de poços para exploração das reservas petrolíferas, como o pré-sal [2].

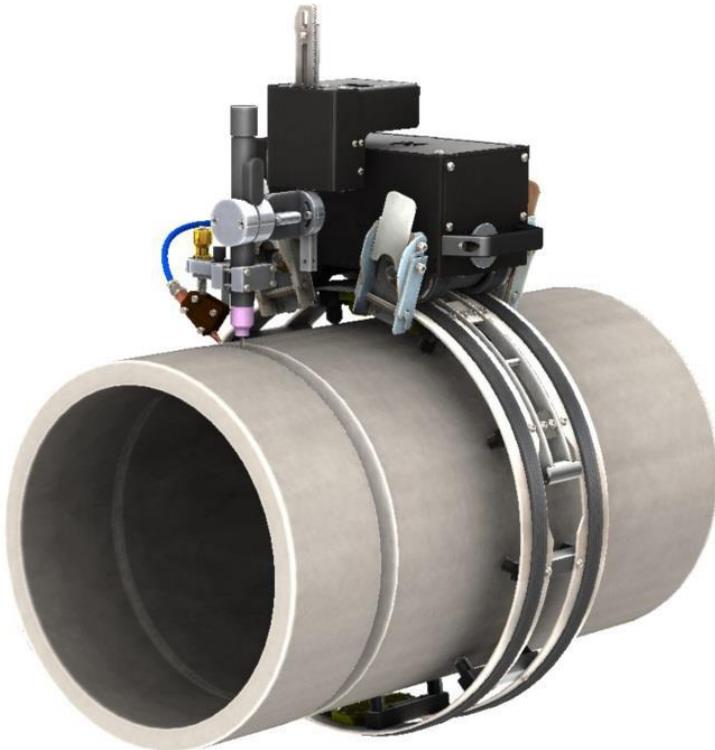
A construção de uma linha dutoviária passa pelo processo conhecido como Soldagem Orbital, que carrega suas particularidades e é objeto de estudo deste trabalho. A construção de poços para exploração de reservas de petróleo exige materiais resistentes à degradação em ambientes hostis (alta pressão e agentes corrosivos), porém, com baixo custo. Nesse cenário, o processo de soldagem de revestimento tem papel fundamental, sendo utilizado para criar uma camada de material protetor nas superfícies interna e externa de um tubo de aço comum, impactando na diminuição do custo do material. [3]

O Instituto de Soldagem e Mecatrônica da UFSC, LABSOLDA, tem a soldagem orbital como uma das suas principais linhas de pesquisa. Ao longo do tempo, o laboratório tem desenvolvido técnicas, tecnologias

e conhecimento acerca da soldagem orbital, inclusive com a concepção de um manipulador robótico dedicado, o Tartílope.

O Tartílope é um manipulador robótico, desenvolvido para proporcionar a automatização de processos de corte e soldagem, recebendo uma versão específica para a soldagem orbital: o Tartílope V4 [4], mostrado na Figura 1, e, posteriormente, o Tartílope Vtop. Este manipulador tem por função conduzir a tocha de soldagem de maneira controlada por toda a extensão da superfície do tubo, posicionando-a na região que exige preenchimento do chanfro com material de adição adequado para garantir a qualidade e a resistência da solda.

Figura 1: Manipulador de soldagem dedicado à soldagem orbital Tartílope V4



Fonte: Carvalho [4]

A soldagem para construção de tubulações de óleo e gás é atualmente realizada, em sua maioria, por um processo manual, onde a qualidade da solda e a produtividade dependem da habilidade e experiência do soldador. As condições de trabalho são normalmente insalubres devido à própria natureza do processo, onde os trabalhadores são submetidos a radiação e posições de trabalho ergonomicamente inadequadas [5].

No sentido de oferecer uma maior controlabilidade ao processo, proporcionar aumento de produtividade e melhorar as condições de trabalho tão danosas à saúde dos operários, a automação do processo de soldagem orbital se mostra eficaz e vem sendo aprimorada a passos largos na indústria.

1.1 PROBLEMA INERENTE À SOLDAGEM ORBITAL

Nos processos de soldagem a arco, o calor é fornecido por uma corrente elétrica que atravessa uma atmosfera de gás ionizado. A alta temperatura promove a fusão dos materiais envolvidos, que geralmente são as peças a serem soldadas e o material de adição, resultando numa estrutura conhecida como poça de fusão, que é um acúmulo de metal que se mantém no estado líquido devido às altas temperaturas envolvidas [6].

De acordo com a posição em que a solda é executada, a poça de fusão, criada sobre a peça, sofre diferentes tipos de deformação pois está sujeita a forças resultantes da aceleração da gravidade e da inclinação angular do plano de soldagem [6].

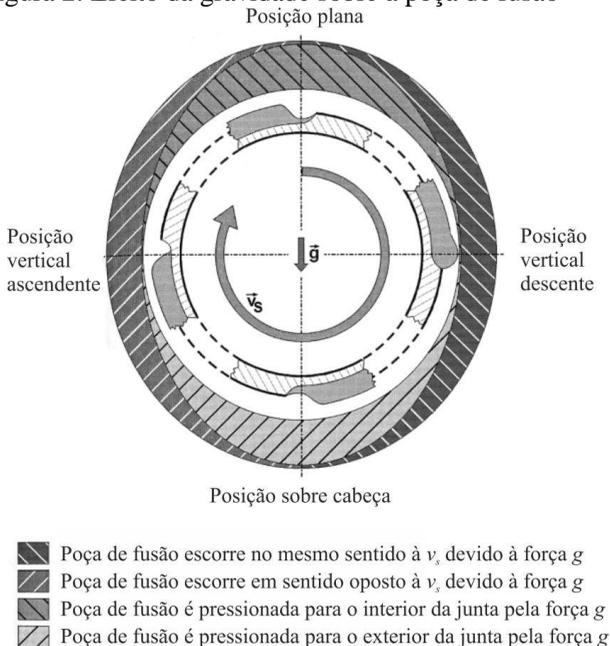
Em linhas gerais, são consideradas quatro posições de soldagem principais. Estas posições são definidas de acordo com a inclinação do plano de soldagem e o sentido de deslocamento da tocha, sendo elas:

1. Plana: A tocha se desloca em uma superfície sem qualquer inclinação em relação ao plano gravitacional;
2. Vertical Descendente: A tocha se desloca na posição vertical, movendo-se para baixo;
3. Sobre-Cabeça: A tocha se desloca em uma superfície plana, sem inclinação e de forma que o eletrodo entre em contato com a peça de baixo para cima;
4. Vertical Ascendente: A tocha se desloca na posição vertical, movendo-se para cima.

A Figura 2 mostra a tendência de escorrimento da poça de fusão para cada uma das posições supracitadas. Como o chanfro é preenchido em um sistema multipasses, é de suma importância que, em cada passe, o

material seja depositado de maneira uniforme, gerando pouca alteração no fator de forma e na capacidade de penetração da solda em toda a circunferência [7].

Figura 2: Efeito da gravidade sobre a poça de fusão



Fonte: Kindermann [6]

Evidencia-se desta forma o problema causado pelo escorrimento da poça. Seus principais efeitos sobre a solda são a diminuição da penetração, diminuição da estabilidade da transferência metálica e possibilidade de perfuração da parede do tubo [6].

Um cordão de solda considerado ideal apresenta um conjunto de características geométricas e metalúrgicas que é descrito a seguir:

1. Boa molhabilidade: A molhabilidade de um cordão de solda é a capacidade que o mesmo tem de se espalhar pela superfície do chanfro. Um cordão com baixa molhabilidade apresenta alta convexidade, gerando pontos de possível falta de fusão e pontos concentradores de tensões mecânicas;
2. Fator de forma: O fator de forma de um cordão de solda diz respeito à regularidade geométrica do mesmo. Se diz

- que um cordão de solda tem baixo fator de forma quando sua geometria tem grandes variações por sobre a junta;
3. Profundidade de penetração: A penetração de um cordão se solda é a característica que garante a rigidez mecânica da estrutura, profundidades mínimas de penetração devem ser mantidas para que haja fusão entre as partes de forma resistente;
 4. Isenção de porosidade: De acordo com o processo, é preciso tomar cuidados para que a oxidação dos materiais não gere pontos de porosidade no cordão. A porosidade pode ser vista a olho nu ou pode estar nas camadas internas do cordão e resulta na diminuição da resistência da solda.

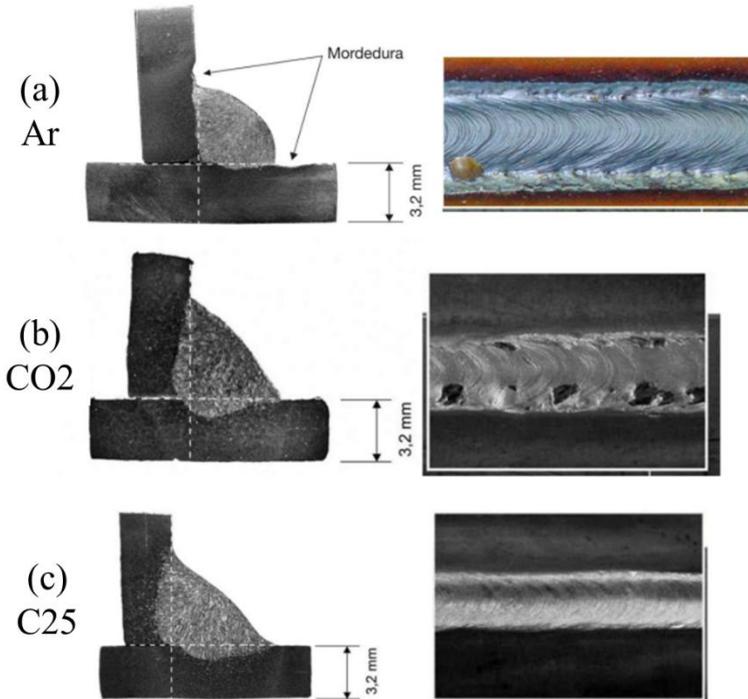
O conjunto de características de uma solda de qualidade é alcançado com uma combinação de fatores que contribuem ao processo, entre eles destacam-se:

1. Atmosfera protetora: São utilizados gases como argônio e o CO₂ que atuam diretamente na qualidade do cordão. Misturas destes gases alteram a capacidade de molhabilidade e evitam a porosidade do cordão. Além de gases, podem ser utilizados outros recursos como pós que conseguem alterar as características do cordão de solda;
2. Padrões de tecimento: A aplicação de tecimento no movimento da tocha permite o preenchimento de chanfros com tamanhos variados e permite que o cordão tenha boa penetração nos flancos do chanfro;
3. Parâmetros elétricos: Uma boa regulagem dos parâmetros como tensão e corrente de soldagem geram uma transferência metálica estável, com baixos níveis de respingo e com boa penetração;
4. Taxa de alimentação: Em processos com adição de material, a taxa de alimentação é variável importante. No processo MIG/MAG, a taxa de alimentação está relacionada diretamente com a velocidade de soldagem enquanto que o processo TIG traz o desacoplamento destas variáveis.

Como exemplo, a Figura traz uma noção visual de um cordão de solda com suas características de qualidade. No caso particular do exemplo, as características do cordão se alteram devido à mistura dos gases de proteção. A mistura C25 leva 25% de CO₂ e 75% de argônio. A

figura mostra um cordão com alta convexidade (a), um cordão com excesso de porosidade (b) e um cordão com boas características (c).

Figura 3: Aspectos visuais de um cordão de solda



Fonte: EMC5294 – Soldagem, notas de aula.

1.2 CONTROLE DA POÇA DE FUSÃO

Equipamentos modernos de soldagem permitem o ajuste de parâmetros importantes para manter a qualidade do cordão em situações adversas. Estes parâmetros são dependentes de fatores como a natureza do processo utilizado (TIG, MIG/MAG ou eletrodo revestido), o tipo de passe (raiz ou preenchimento) e a inclinação do plano de soldagem.

O termo “parâmetros de soldagem” é bastante abrangente e diz respeito a todas as variáveis do processo que podem ser configuradas pelo usuário ou por um sistema automatizado e têm impacto sobre a qualidade da solda.

Os parâmetros de soldagem podem ser divididos em dois grandes grupos: os parâmetros de movimentação da tocha e os parâmetros de fonte.

Parâmetros de movimentação dizem respeito ao manipulador. Tal parametrização altera as trajetórias descritas pela tocha com variados tipos de tecimento e diferenciadas velocidades de soldagem. São exemplos de parâmetros de avanço:

- **Velocidade de soldagem:** Velocidade de deslocamento da tocha de soldagem sobre o chanfro;
- **Amplitude de Tecimento:** Distância entre um pico e um vale da curva descrita pela tocha de soldagem no sentido perpendicular à direção de soldagem;
- **Tipo de tecimento:** O robô pode fazer com que a tocha descreva uma trajetória triangular, trapezoidal ou senoidal na superfície do tubo.

Parâmetros de fonte, por sua vez, estão ligados ao controle da transferência metálica. São exemplos de parâmetros de fonte:

- **Corrente:** Intensidade e forma de onda da corrente utilizada no processo de soldagem;
- **Tensão:** Intensidade e forma de onda da tensão utilizada na soldagem;
- **Velocidade de arame:** Taxa com a qual o material de adição é tracionado em direção à peça;
- **Frequência e amplitude de alimentação:** Em processos onde é possível utilizar alimentação dinâmica, pode-se configurar sua frequência e amplitude de oscilação. Este parâmetro pode ser controlado pela fonte ou manualmente, dependendo do processo.

A harmonia entre estes parâmetros leva a uma solda extremamente controlada e de alta qualidade.

O controle adaptativo do procedimento consiste em atualizar os parâmetros de soldagem à medida em que as características do processo se alteram. No caso da soldagem orbital, a estabilidade da poça é afetada, entre outros motivos, pela inclinação do plano de soldagem que passa por, pelo menos, três das posições definidas anteriormente, para uma soldagem em dois passes.

O Tartílope, entretanto, não dispõe de sistema capaz de realizar a medição da inclinação do plano de soldagem. Para fazer este mapeamento, o operador deve conhecer, *a priori*, a velocidade tangencial do robô (que pode ser variável) e o raio entre o centro do tubo e o bocal da tocha. Com estas informações é possível traçar um perfil temporal de variação angular e, conseqüentemente, prever alterações dos parâmetros de soldagem em intervalos de tempo que terão suas respectivas correspondências angulares, chamadas de “trechos” na IHM do Tartílope.

Percebe-se então a necessidade de um sistema que informe ao controlador do Tartílope qual a inclinação do plano de soldagem em relação à posição plana (referencial inercial da Terra) e que não dependa de fatores específicos, como diâmetro do tubo, para que a parametrização do processo seja feita de forma mais rápida, deste modo, são introduzidos os objetivos deste trabalho.

1.2.1 Objetivo geral

Na observância dos aspectos mencionados, faz parte do escopo deste projeto a criação de um protótipo de sistema de medição angular, baseado em sensores MEMS (do inglês, *Micro-Electro-Mechanical Systems*), que informa ao controlador do Tartílope a inclinação do plano de soldagem à uma elevada taxa de dados, permitindo ao mesmo fazer, automaticamente, ajustes nos parâmetros de movimento ao longo da trajetória circular descrita pela tocha com base nos parâmetros de referência, definidos para as quatro posições principais através de ensaios descritos em [2].

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar o uso de sensores inerciais MEMS aplicados a sistemas de medição angular;
- Criar algoritmo de correção dos parâmetros de movimentação do robô;
- Desenvolver um protótipo deste sistema para validação prática dos resultados;
- Realizar testes sob metodologia capaz de validar o funcionamento deste sistema.

2 REVISÃO TEÓRICA

O resultado final pretendido é obtido combinando técnicas e adaptando leis físicas e matemáticas às particularidades do projeto. Esta seção traz uma revisão sobre a teoria geral utilizada na implementação do sistema e tem finalidade de contextualizar as teorias científicas desenvolvidas ao longo dos anos com a solução do problema proposto.

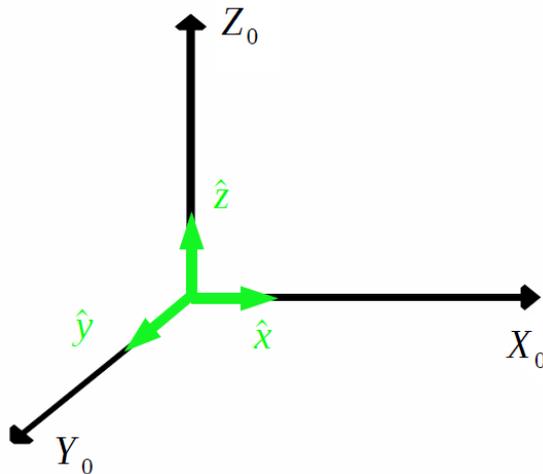
2.1 ÂNGULO DE EULER

A solução mais natural para definir a orientação de corpos no espaço tridimensional se dá através dos ângulos de Euler [8].

Seja um corpo rígido com seu sistema de eixos definido sobre a tríade ortonormal de versores \hat{x}_3, \hat{y}_3 e \hat{z}_3 que compõem sua base canônica. Este espaço recebe o nome $S' = [x_3, y_3, z_3]$.

Considera-se ainda um espaço tridimensional $S = [x_0, y_0, z_0]$ que é um referencial inercial para S' e está definido sobre os versores ortonormais \hat{x}, \hat{y} e \hat{z} , como mostra a Figura 4.

Figura 4: Sistema de referência



Fonte: O autor

Define-se a orientação do corpo rígido através da combinação de rotações em torno de seus eixos, medidas em relação ao referencial S , de modo que uma determinada sequência de movimentos leva ao mapeamento correto [9].

Inicialmente, realiza-se movimento de rotação do sistema que representa o corpo rígido em torno de seu eixo z_0 descrevendo uma trajetória no plano x_0y_0 . A rotação e torno do eixo z_0 é denotada pela letra grega ϕ (phi) e sugere a primeira matriz de rotação [10], mostrada na equação (2.1).

$$R_\phi = \begin{bmatrix} \cos\phi & \text{sen}\phi & 0 \\ -\text{sen}\phi & \cos\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

Observa-se que a matriz de rotação da equação (2.1) leva o corpo rígido à uma posição x_1 , y_1 e z_1 em relação à posição inicial, descrita por (2.2).

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ y_1 \\ z_1 \end{bmatrix} = R_\phi \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Depois dessa primeira rotação, o corpo rígido é submetido à um giro em torno de seu eixo x_1 cujo movimento pode ser descrito no plano z_1y_1 . Tal rotação é denotada pela letra grega θ e varia segundo a equação (2.3).

$$R_\theta = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta & \text{sen}\theta \\ 0 & -\text{sen}\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Deste modo, a orientação do sistema é agora dada pelas matrizes de rotação aplicadas em cascata no sistema inicial, sendo representada por (2.4).

$$\begin{bmatrix} x_2 \\ y_2 \\ z_2 \end{bmatrix} = R_\phi \cdot R_\theta \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

O terceiro e último ângulo de Euler nos dá a orientação do corpo rígido tomando como referência o espaço S . A orientação é, portanto, o

conjunto S' . Este terceiro ângulo é a rotação do sistema em relação ao eixo z_2 , mapeada no plano x_2y_2 e denotada pela letra grega ψ . Os eixos do sistema S' são expressos por:

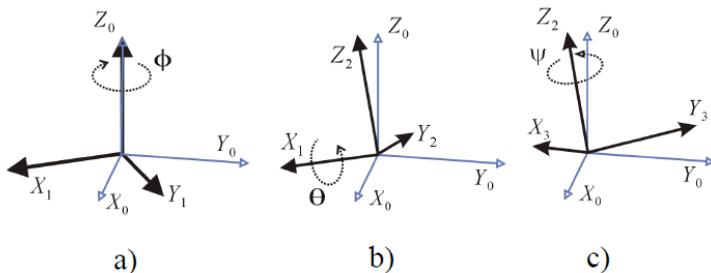
$$\begin{bmatrix} x_3 \\ y_3 \\ z_3 \end{bmatrix} = R_\phi \cdot R_\theta \cdot R_\psi \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

Onde

$$R_\psi = \begin{bmatrix} \cos\psi & \sin\psi & 0 \\ -\sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.6)$$

Uma visão mais ilustrativa da sequência de rotações proposta pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5: a) Rotação em torno do eixo Z. b) Rotação em torno do eixo X. c) Rotação em torno do novo eixo Z.



Fonte: Wikipedia (https://pt.wikipedia.org/wiki/%C3%82ngulos_de_Euler)

Qualquer orientação pode ser representada por uma combinação de três rotações de Euler. Entretanto, se não é respeitada a sequência de movimentos, a representação pode se tornar dúbia, isto é, o mesmo conjunto de ângulos pode representar mais de uma orientação [11].

2.2 REPRESENTAÇÃO POR QUATÉRNIONS

Quatérnion (do Latim, grupo de quatro) é um espaço vetorial deduzido por Willian Rowan Hamilton (Irlanda, 1805-1865) cuja base é o conjunto $B = \{1, i, j, k\}$ onde $i, j, k \in \mathbb{C}$ [10].

Matematicamente, o conjunto dos quatérnions é definido pela equação (2.7) [10].

$$\mathbb{H} = \{a + bi + cj + dk | a, b, c, d \in \mathbb{R} \text{ e } i^2 = j^2 = k^2 = -1\} \quad (2.7)$$

Um quatérnion é, portanto, composto de uma parte real e uma parte imaginária sendo que a parte imaginária é um vetor com três componentes. As componentes imaginárias definem uma direção e a componente real define uma rotação em torno desta direção [12].

Prova-se que um produto do tipo qwq^{-1} , onde q é um quatérnion unitário e w é um quatérnion puro (sem parte real) leva o ponto mapeado por w a um novo ponto no espaço que corresponde à uma rotação segundo o quatérnion q [10].

Conhecendo um quatérnion, é possível extrair dele as matrizes de rotação definidas anteriormente além dos ângulos de Euler, sob a seguinte forma [8]:

$$\phi = \arctan\left(\frac{2 \cdot (ab + cd)}{a^2 - b^2 - c^2 + d^2}\right) \quad (2.8)$$

$$\theta = -\arcsen(2 \cdot (bd - ac)) \quad (2.9)$$

$$\psi = \arctan\left(\frac{2 \cdot (ad + bc)}{a^2 + b^2 - c^2 - d^2}\right) \quad (2.10)$$

Para as aplicações deste projeto, os ângulos de Euler obtidos desta maneira são de extrema importância.

O uso dos quatérnions implica em uma série de vantagens em relação aos métodos tradicionais. Tal representação não possui ambiguidade, demanda menor esforço computacional com seus algoritmos e não sofre com o problema de *Gimbal Lock* [9].

2.3 MEMS – Sistemas Micro Eletromecânicos

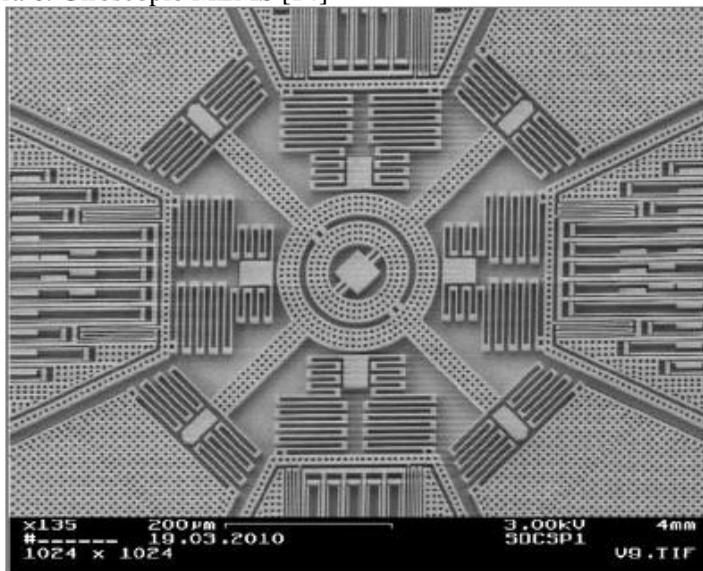
Os dispositivos MEMS são dispositivos que combinam microestruturas mecânicas, móveis ou não, juntamente com microcircuitos eletrônicos e recebem o nome de micromáquinas pois são capazes de combinar sua natureza mecânica e elétrica para gerar funções desejadas [13].

Assim como os circuitos eletrônicos, os dispositivos MEMS são principalmente fabricados em silício, entretanto, é possível encontrar aplicações de arseneto de gálio e fosfato de índio [13].

Um dispositivo MEMS pode ser de natureza híbrida, onde a parte elétrica e mecânica são construídas em chips separados, ou monolítica, onde o sistema completo encontra-se em um único chip. Geralmente esta última forma é preferível pois gera vantagens no processo de fabricação e diminui problemas de compatibilidade entre as interfaces [13].

Atualmente, os MEMS conseguem ser fabricados em larga escala e com alta qualidade devido ao avanço dos processos de microusinagem. A Figura 6 mostra uma imagem ampliada por microscópio de um dispositivo MEMS, no caso, um giroscópio [14].

Figura 6: Giroscópio MEMS [14]



Fonte: Sandhu [14]

Os dispositivos MEMS são projetados para serem transdutores: geralmente sensores, mas também atuadores. Os sensores MEMS em geral utilizam microestruturas mecânicas para provocar variações capacitivas em estruturas semicondutoras. O circuito eletrônico do dispositivo é sensível à variação da capacitância e, portanto, exibe uma resposta elétrica em sua saída [13].

2.3.1 Acelerômetro MEMS

Um acelerômetro MEMS consiste, em geral, em uma massa de prova ligada a uma estrutura fixa através de pequenas vigas com um coeficiente elástico conhecido. Este sistema fica em um meio que proporciona um coeficiente de amortecimento, também conhecido. Desta forma, temos um sistema massa-mola amortecido, que pode ser modelado por equações diferenciais de segunda ordem [15].

Uma aceleração externa promove movimento entre a massa de prova e a parte fixa, de maneira proporcional à aceleração imposta. A parte eletrônica do sistema é capaz de gerar uma resposta em tensão relacionada à aceleração medida. Este sistema pode ser dividido em classes [15], sendo que têm maior relevância no mercado os dispositivos piezelétricos, propriedade dos primeiros micro-accelerômetros, e, de efeito capacitivo, que vêm ganhando grande espaço no mercado por suas características construtivas [15].

A resposta em tensão dos acelerômetros é convertida na aceleração experimentada pelo sensor através de cálculos indicados nas folhas de dados. O MPU-6050, utilizado neste trabalho, possui uma interface digital, disponibilizando na saída números com resolução de 16 bits, que são convertidos em aceleração segundo as orientações da folha de dados.

2.3.2 Giroscópio MEMS

Através de técnicas de microusinagem, são concebidas estruturas vibrantes que têm resposta interpretável eletricamente para excitações rotacionais. A resposta de um giroscópio MEMS se dá através da transferência de energia, resultante da aceleração Coriolis (aceleração proporcional à taxa de rotação) [16].

Os giroscópios podem ser especificados pelo seu fundo de escala, resolução, deriva e saída para velocidade angular nula (*Zero-rate output – ZRO*) [16]. Em situações estáticas, a saída do giroscópio deveria ser nula, entretanto, acaba sofrendo influência do ruído branco e distúrbios

de variação lenta. De modo geral, bons giroscópios devem ter baixa (idealmente nula) ZRO.

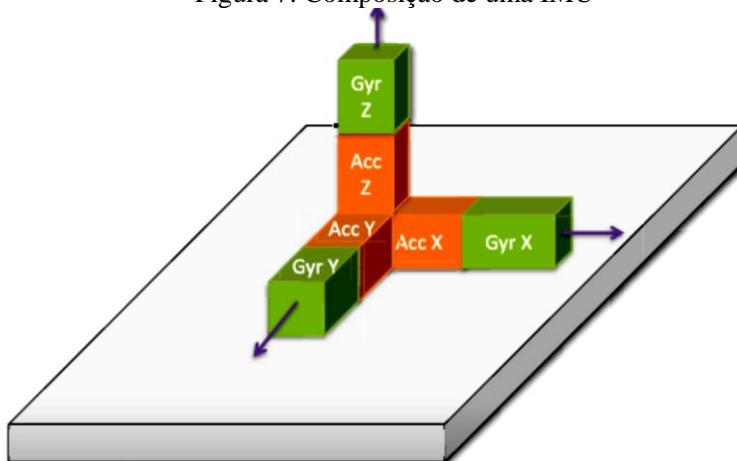
O giroscópio mede, portanto, a velocidade angular segundo a qual o corpo gira em relação a um eixo específico, a resposta é dada em ($^{\circ}/s$) – graus por segundo.

A união destes dois sensores origina uma estrutura de medição inercial, chamada IMU, apresentada na seção seguinte.

2.4 UNIDADE DE MEDIÇÃO INERCIAL

Uma Unidade de Medição Inercial – IMU (do inglês, *Inercial Measurement Unit*) é um conjunto de sensores que realizam medição de acelerações específicas e velocidades angulares em um sistema de eixos. Geralmente são utilizados acelerômetros e giroscópios para tal medição, sendo que é necessário um conjunto de acelerômetro mais giroscópio para cada grau de liberdade pretendido [16]. Uma IMU com três graus de liberdade corresponde à associação de três acelerômetros e três giroscópios, um para cada eixo, conforme mostra a Figura 7.

Figura 7: Composição de uma IMU



Fonte: Adaptado de [16]

A associação destes sensores para formar uma IMU é uma possível fonte de erros. No processo construtivo deste dispositivo é possível que um bloco tenha inclinação, em relação ao outro, diferente de 90° resultando no chamado erro de não-ortogonalidade [17].

Segundo [9] a taxa de amostragem (taxa segundo a qual são lidos os valores do sensor) também tem influência sobre o erro. Para que sejam diminuídos os erros acumulados, deve-se utilizar altas taxas de aquisição de dados.

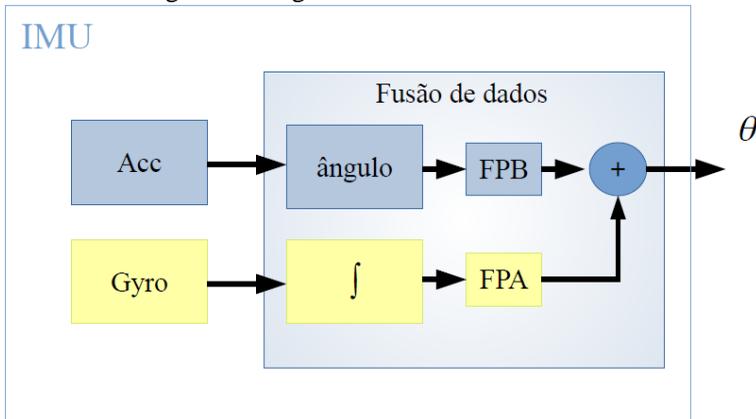
O MPU-6050 é uma Unidade de Medição Inercial de baixo custo que utiliza a tecnologia MEMS. Mais especificamente, seus microssistemas são de efeito capacitivo. Este tipo de sensor tem ganhado mercado nas últimas décadas pela facilidade de implementação, pelo baixo custo e baixo consumo. Deve-se observar, entretanto, os limites operacionais de precisão e exatidão de tais tecnologias.

Na IMU, os dados dos acelerômetros e dos giroscópios são combinados de acordo com suas características. Os acelerômetros possuem alta taxa de interferência por ruído e sofrem com acelerações externas oriundas de vibrações ou mesmo da rotação em torno de seu centro de massa. Apesar disso, acelerômetros têm baixo erro de deriva. Sua medição é, portanto, confiável para condição estática ou de regime permanente [9].

Giroscópios, por outro lado, possuem alto erro de deriva e baixa suscetibilidade a ruídos. Deste modo, prioriza-se o dado do giroscópio para medições de curto prazo, isto é, movimentos de dinâmica rápida [9].

A saída da IMU é uma composição dos dados oriundos de cada um dos dispositivos MEMS em seu interior. Existem algoritmos como o Filtro de Kalman e o Filtro Complementar que são utilizados na fusão destes dados. A Figura 8 representa um diagrama básico de fusão de dados aplicado a sensores inerciais.

Figura 8: Diagrama de blocos de uma IMU



Fonte: O autor.

Com esta estrutura, a unidade de medição inercial retorna, com baixo índice de contaminação por ruído, a orientação sob a forma de ângulos de Euler e, no caso do MPU-6050, de quatérnions.

Unidades mais modernas, como o MPU-6050, utilizado neste trabalho, apresentam saída digital e, portanto, necessitam de algum meio de comunicação serial para que possam ser lidas. Serão abordados alguns dos principais protocolos para este tipo de comunicação na sequência do trabalho.

2.5 COMUNICAÇÃO SERIAL

A comunicação serial surge da necessidade de poupar pinos dos controladores e processadores. De fato, os primeiros métodos de comunicação entre dispositivos eram paralelos, de modo que, para transmitir um conjunto de 8 bits (equivalente a um byte), eram necessárias 8 conexões elétricas (fios) entre os dispositivos.

Logo se percebe a inviabilidade deste tipo de operação em sistemas modernos. Arquiteturas modernas de processadores possuem palavras padrão de 64 bits, o que torna pouco vantajosa a comunicação paralela.

A comunicação serial entre dispositivos pode ser classificada quanto à necessidade de sinal de sincronismo, sendo dividida em [18]:

- **Comunicação Síncrona:** O dispositivo que envia o dado envia também um sinal de sincronismo (*clock*) que dita a taxa de transmissão e o momento de leitura;
- **Comunicação Assíncrona:** Não há necessidade de sinal de sincronismo, entretanto, segue-se um protocolo para ditar o momento em que os dados podem ser lidos.

Além disso, é possível dividir os tipos de comunicação quanto a capacidade de envio e recebimento [18], como segue:

- **Simplex:** A comunicação é unidirecional, isto é, um dispositivo somente envia dados e o outro somente recebe;
- **Half-Duplex:** A comunicação é bidirecional usando uma única linha de dados, isto significa que a linha de dados pode ser usada para leitura ou para escrita, de acordo com comando do dispositivo mestre, porém, não é possível realizar leituras e escritas simultâneas;
- **Full-Duplex:** A comunicação é bidirecional tendo um canal dedicado à transmissão (RX) e um canal dedicado

ao recebimento (TX) de dados. Nesta configuração é possível realizar leituras e escritas simultâneas.

Nos sistemas de comunicação síncrona, a taxa de bits enviados é equivalente à frequência do sinal de sincronismo (*clock*). Já nos protocolos assíncronos, define-se a *baud rate* como a taxa de bits enviada por unidade de tempo dependente do protocolo utilizado [18].

A comunicação serial traz, portanto, a vantagem de se substituir inúmeras linhas paralelas de dados por uma única linha serial que envia o status de um bit a cada ciclo (ou conjunto de alguns ciclos) de relógio.

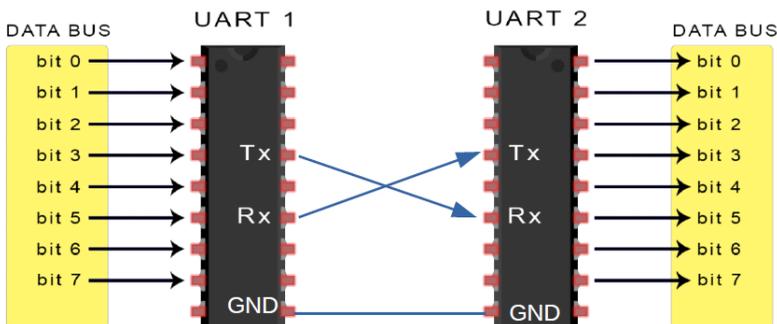
Os dispositivos microcontroladores utilizados neste projeto trazem, de forma embarcada, hardware para implementar alguns protocolos de comunicação, como o UART e o I²C, por exemplo. Na sequência do texto serão apresentados com mais detalhes os protocolos de enlace, como o UART e alguns protocolos de barramento.

2.5.1 Protocolo UART

O protocolo UART (*Universal Asynchronous receiver-transmitter*) é utilizado para traduzir dados de um barramento paralelo, usualmente presente nas arquiteturas de processadores, em uma linha de transmissão serial assíncrona Full-Duplex [19].

Este protocolo é implementado através de um hardware dedicado que procede a interface entre o meio paralelo, isto é, o vetor de dados ou *Data Bus* do processador, com o meio serial através de duas linhas de sinal e uma linha de referência de tensão (GND) [20]. O esquema de ligação entre dois dispositivos UART é mostrado na Figura 9.

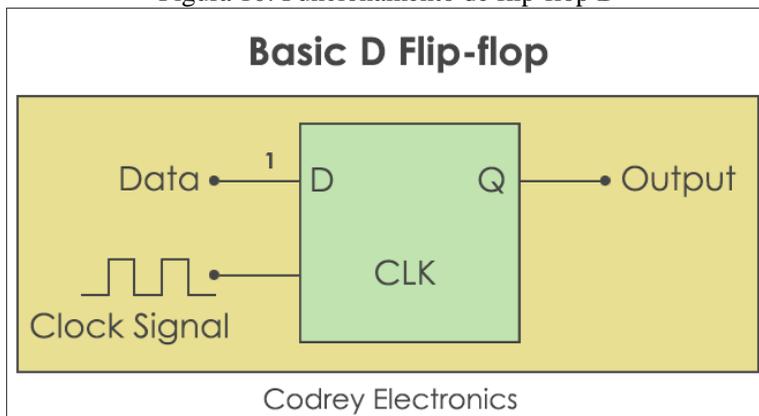
Figura 9: Ligação entre dispositivos UART



Fonte: Adaptado de Circuit Basics [19]

A serialização do barramento paralelo é baseada no funcionamento do flip-flop D. Este flip-flop transmite o nível de um bit da sua entrada para sua saída se, e somente se, houver um pulso de clock em seu pino clk, como mostra a Figura 10.

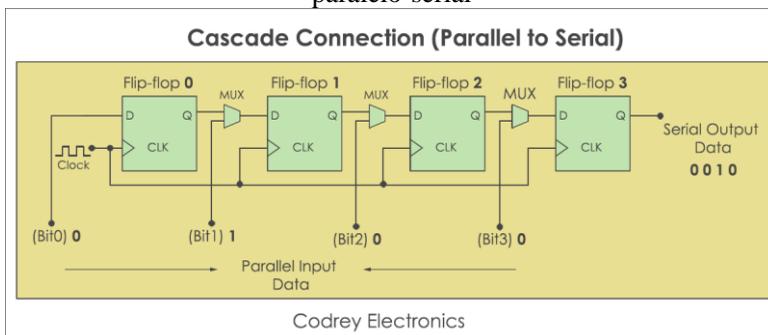
Figura 10: Funcionamento de flip-flop D



Fonte: Codrey [20]

Um conversor paralelo para serial funciona com a ligação em cascata de flip-flops D. Para serializar um barramento de 'n' bits são necessários 'n' flip-flops D em cascata, como mostra a Figura 11 para um barramento de 4 bits.

Figura 11: Ligação de flip-flops D em cascata para gerar um conversor paralelo-serial



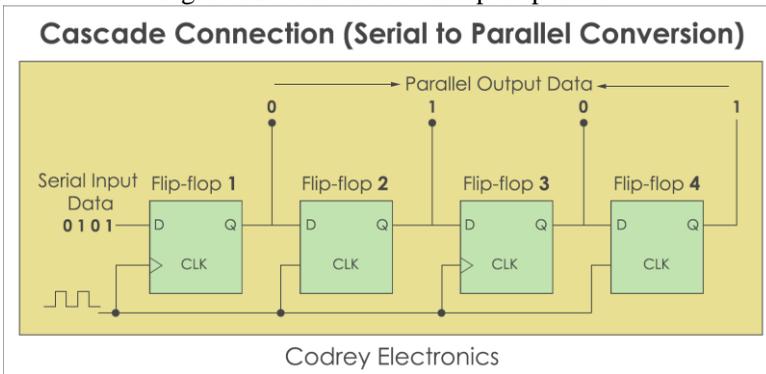
Fonte: Codrey [20]

O receptor, por sua vez, precisa fazer o caminho inverso, ou seja, ao receber dados de forma serial, deve fazer a conversão para jogá-los no

barramento de dados do processador na forma paralela. Tal funcionamento é conseguido com a associação em cascata dos flip-flops, entretanto algumas diferenças aparecem [20].

A cada ciclo de clock, um bit é recebido e é deslocado para a direita. Se o barramento for de ‘n’ bits, ao fim de ‘n’ ciclos de clock o dado poderá ser lido de forma paralela nas saídas de cada flip-flop individualmente [20]. A Figura 12 mostra o esquema de ligação e o ponto de onde os bits serão lidos.

Figura 12: Conversão serial para paralelo



Fonte: Codrey [20]

O protocolo UART trabalha segundo uma lógica que possibilita a comunicação, definindo critérios de reconhecimento de bits e momentos de leitura. Seu passo a passo é explicado a seguir [20].

- **Start bit:** Normalmente, as vias de sinal RX e TX permanecem em nível lógico alto. Quando ocorre uma transição de nível lógico alto para nível lógico baixo no pino TX, o outro dispositivo percebe que a comunicação deverá ser estabelecida;
- **Envio do dado:** Após o start bit, o dado começa a ser serializado e enviado. O pacote de dados pode ter entre 5 e 9 bits dependendo se o pacote apresenta bit de paridade;
- **Bit de paridade:** Após os bits de dado, é possível enviar um bit de paridade ímpar ou par, a depender do hardware. O receptor verifica se o número de bits em nível alto é par ou ímpar e compara com o sinal recebido. Caso haja discrepância, o pacote deve ser reenviado;

- **Stop bits:** Após o envio dos dados mais o bit de paridade, quando for o caso, a linha de sinal permanece em nível alto por tempo equivalente a dois ciclos de instrução, deste modo o receptor interpreta que o pacote foi enviado por completo. O ciclo se reinicia com o envio de um novo start bit.

Cabe destacar sobre este protocolo que, por se tratar de um protocolo assíncrono, os sinais de clock devem ser gerados em cada dispositivo separadamente. Para isto, é importante que os dois dispositivos sejam programados para operar com a mesma taxa de bits, caso contrário, a comunicação não é bem-sucedida. A taxa de bits é gerada com auxílio de timers e é sincronizada nos dois dispositivos por meio do start bit, isto é, quando do recebimento de um start bit os timers dos dois dispositivos são disparados para contar e gerar a mesma baud rate [20].

Os dispositivos microcontroladores que utilizam o protocolo UART operam em níveis TTL de tensão, ou seja, 5Vcc. A transmissão neste nível de tensão, entretanto, não é eficaz pois sofre rápida atenuação causando altas taxas de erro e até a perda de sinal. Deste modo, existem os chamados protocolos físicos que adequam os sinais em níveis TTL vindos da UART para sinais com maior robustez, possibilitando a transmissão por cabos longos que operam em ambientes ruidosos. Serão abordados alguns protocolos de barramento conhecidos na indústria possíveis de serem empregados no desenvolvimento deste projeto.

2.5.1.1 PROTOCOLO DE BARRAMENTO EIA RS-232

A EIA (*Electronics Industries Association*) apresentou a primeira versão do protocolo 232 em 1962 com objetivo de padronizar o modo de comunicação entre DTE (*Data Terminal Equipment*) e DCE (*Data Communication Equipment*). O protocolo EIA-RS232 passou por diversos processos de atualização ao longo dos anos e mantém lugar ainda hoje no mercado. Trata-se de um protocolo que promove a conversão dos sinais em nível TTL disponibilizados pelo microcontrolador em sinais com maior amplitude para conferir-lhes maior robustez e possibilidade de comunicação em maiores distâncias.

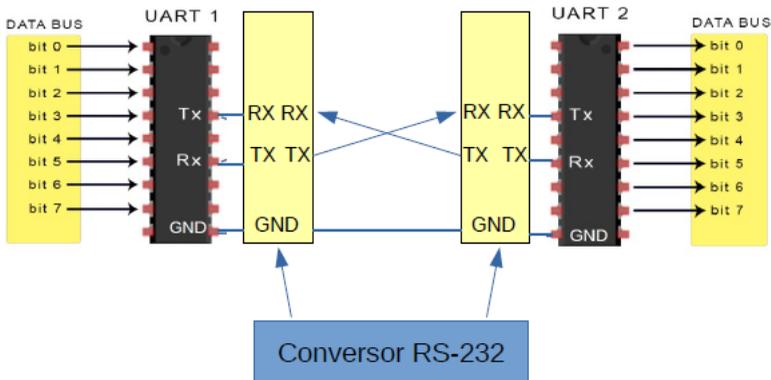
Neste protocolo, o nível lógico alto está associado a tensões entre -3 e -15V e o nível lógico baixo associado a tensões entre 3 e 15V. Os níveis relativamente altos de tensão servem para diminuir a taxa de erro causada por interferências eletromagnéticas [21].

O comprimento máximo de cabo possível de realizar a comunicação foi definido no RS-232C como 15 metros, entretanto, a norma foi revisada e o comprimento de cabo ficou limitado por um valor de capacitância máxima entre as linhas de 2500pF, o que resulta em cabos com comprimento entre 15 e 20 metros [21]. É especificada também a máxima derivada de tensão em relação ao tempo para os sinais, conhecida como *slew rate* e fixada em 30 V/us (volts por microssegundo), que limita a taxa de bits no canal [21].

Os conectores padrão para este protocolo são DB25, com 25 vias e o DB9, com 9 vias. Na prática, são utilizadas apenas três vias, sendo elas o *ground* e as duas vias de sinal. As demais linhas são utilizadas em dispositivos muito específicos para sinalização de respostas entre eles, num sistema conhecido como *handshaking*. A utilização de número maior de vias torna a comunicação mais robusta, porém, mais cara.

Assim, o protocolo RS-232 vem como uma solução para aumentar a capacidade de distância para a comunicação serial. Através deste canal, consegue-se obter baud rates de até 460800 bps. Um exemplo de dispositivos se comunicando através de um barramento RS-232 pode ser visto na Figura 13.

Figura 13: RS-232 usado como meio para comunicação entre dispositivos



Fonte: Adaptado de Circuit Basics [19]

O mercado moderno, entretanto, traz soluções tecnológicas para comunicação mais velozes, com maior taxa de bits e menor taxa de erro. Os protocolos diferenciais são amplamente utilizados na indústria moderna e são abordados neste texto.

2.5.1.2 PROTOCOLO EIA RS-485

O protocolo diferencial EIA RS-485 foi apresentado *pela Electronics Industries Association* em 1983 e se tornou o protocolo base das indústrias médica e eletrônica [22], mostrando características interessantes a estes equipamentos.

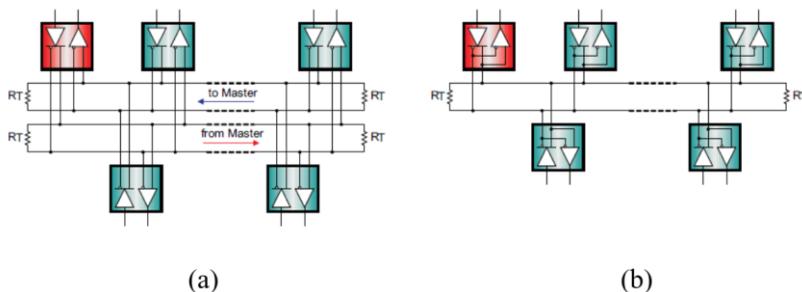
O RS-485 é um padrão somente elétrico. Isto significa que o protocolo define apenas as características elétricas dos drivers e dos receivers que podem ser usados na linha diferencial, não definindo, entretanto, especificações funcionais e mecânicas [22].

As características de um barramento RS-485 são muito boas do ponto de vista operacional, unindo altas taxas de bits com a possibilidade de transmissão em longas distâncias. As principais características deste barramento são [22]:

- Interface diferencial;
- Operação multipontos com alimentação simples em 5Vcc;
- Máxima taxa de bits em 10 Mbps para até 40 pés (12 m);
- Máxima distância de 4000 pés (1219,2 m) à uma taxa de 100 kbps.

Uma rede de dispositivos RS-485 deve ser feita de modo que haja um barramento principal e os dispositivos sejam ligados a ele por linhas curtas. O barramento pode operar no modo Full-Duplex, necessitando de dois pares diferenciais para dados, totalizando 4 vias de dado; ou no modo Half-Duplex, onde é necessário apenas um par diferencial, como mostra a Figura 14, onde se pode ver diferentes dispositivos conectados a um barramento RS-485 nos dois modos de operação descritos.

Figura 14: Barramento RS-485 nos modos (a) Full-Duplex e (b) Half-Duplex



Fonte: Adaptado de Texas Instruments [22]

Os drivers RS-485 operam com nível mínimo de tensão de 1,5 V ao passo que os receptores são sensíveis a sinais com, no mínimo, amplitude de 200mV. A grande vantagem do protocolo RS-485 está no fato de ser diferencial. Os bits são mapeados como a diferença de potencial entre as vias. Deste modo, o protocolo recomenda o uso de cabos do tipo par trançado pois se o mesmo for atingido por uma perturbação eletromagnética, esta irá atacar as duas vias por igual gerando uma interferência de modo comum que será rejeitada pelo receptor [22].

Deste modo, a solução via pares diferenciais se mostra extremamente robusta para aplicações em ambientes suscetíveis a perturbações eletromagnéticas, podendo alcançar longas distâncias e com taxas de bits elevadas. Além disso, os transceivers do protocolo são compatíveis com o protocolo de enlace UART, apresentado anteriormente.

2.5.2 Comunicação I²C

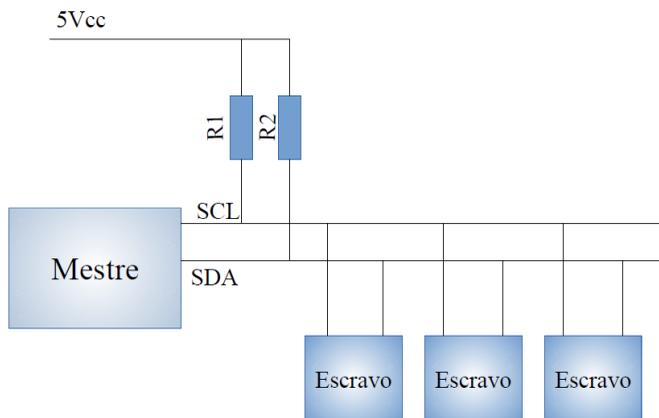
O protocolo de comunicação I²C (do inglês, *Inter-Integrated Circuit*) foi desenvolvido pela Philips na década de 90 e é principalmente utilizado para comunicação entre hardwares diversos e placas mãe ou microprocessadores.

Um barramento I²C é composto por duas vias: a via SCL (do inglês, *Serial Clock*) supre o sinal de sincronismo entre os dispositivos; e a SDA (do inglês, *Serial Data*) supre os bits de sinal que compõem a mensagem. Este protocolo é, portanto, síncrono bidirecional, isto é, half-duplex.

A comunicação via protocolo I²C sempre se dá no modo mestre escravo, isto é, um dos dispositivos é encarregado de administrar a linha enviando endereços e requisitando as leituras ou escritas nos escravos [23].

A quantidade de escravos em um barramento é limitada pela capacidade de endereçamento que pode ser de 7, 10 ou 16 bits, bem como pelo comprimento total de cabo. A capacitância máxima para funcionamento de um barramento I²C está na ordem de 400pF, valor facilmente alcançado por linhas de cabos com comprimento superior a 1m [23]. A Figura 15 traz um exemplo de barramento I²C no sistema mestre escravo.

Figura 15: Diagrama ilustrativo de barramento I²C



Fonte: O autor

Como mostra a Figura 15, o barramento I²C consiste nas linhas de clock e dado, dois resistores de Pull-up, os dispositivos mestre e, por fim, os dispositivos escravos. Naturalmente, os dois pinos do barramento são mantidos em nível lógico alto quando estão no estado neutro. Para iniciar a comunicação, o mestre faz uma transição de nível alto para baixo no pino SDA. Logo em seguida é inserido um sinal de clock na linha SCL e o dado começa a ser transmitido [24].

A comunicação se dá, entretanto nos passos descritos abaixo:

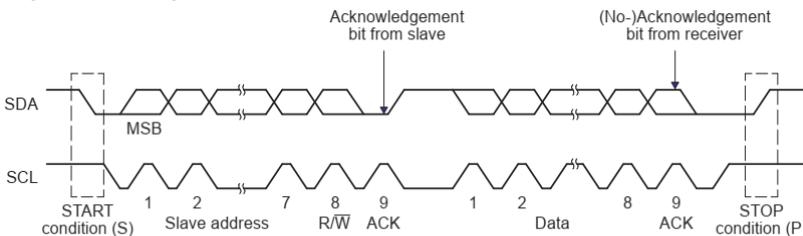
- **Start bit:** Indica o início da comunicação. O mestre deve realizar uma transição nível lógico alto para baixo no pino correspondente ao SDA enquanto o pino referente ao SCL permanece em nível lógico alto.
- **Envio de endereço:** Após o start bit, a cada ciclo do sinal de referência (clock), um novo bit é enviado ao barramento. Todos os escravos fazem a leitura destes bits pois eles são o endereço correspondente ao escravo com o qual o mestre vai estabelecer comunicação. Somente o escravo cujo endereço for correspondente irá iniciar a comunicação. Após o envio do endereço, o mestre envia um bit que define se a comunicação será de leitura ou escrita.
- **Envio do byte:** Depois de identificado o escravo com o qual se deseja estabelecer comunicação, é finalmente

enviado o byte de dados, cada bit dentro de um ciclo do sinal de clock.

- **Etapas comuns:** Toda vez que um byte é enviado, seja de endereço ou de dado, o escravo gera um bit de reconhecimento (*acknowledge*) que indica para o mestre que é hora de enviar um novo byte.
- **Stop bit:** O pino referente ao SDA é colocado em nível alto enquanto o SCL também se encontra em nível alto. Tal situação informa aos escravos que a comunicação acabou.

O passo a passo de comunicação via protocolo I²C está exemplificado graficamente no diagrama da Figura 16.

Figura 16: Diagrama de funcionamento de barramento I²C



Fonte: Texas Instruments [24]

O protocolo de comunicação I²C, em resumo, possui limitações no que diz respeito ao comprimento da linha, limitado pela capacitância entre as vias do barramento; e em velocidade, onde taxas usuais são de 100 kbps e 400 kbps. Ainda assim, muitas aplicações fazem uso deste protocolo pela sua versatilidade e pelo fato de diferentes dispositivos poderem compartilhar o mesmo barramento.

2.6 COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

A compatibilidade eletromagnética é a área do conhecimento que busca garantir que um equipamento funcione corretamente em seu ambiente, não causando interferência a equipamentos vizinhos e não sendo interferido por estes. Estes fenômenos começaram a ser estudados em meados da década de 70 do século XX onde surgiram as primeiras normas para bom funcionamento de equipamentos em ambientes eletromagnéticos [25].

Segundo Liz [25], a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) traz algumas definições importantes sobre conceitos e terminologia referente à compatibilidade eletromagnética. Serão citados apenas os principais para o desenvolvimento do trabalho:

- **Ambiente eletromagnético:** Conjunto de fenômenos eletromagnéticos existentes em um dado local.
- **Ruído eletromagnético:** Fenômeno eletromagnético variável no tempo, aparentemente não contendo informação e capaz de superpor-se a um sinal desejado ou de combinar-se com o mesmo.
- **Perturbação eletromagnética:** Fenômeno eletromagnético capaz de degradar o desempenho de um dispositivo, equipamento ou sistema, ou de afetar desfavoravelmente matéria viva ou inerte.
- **Interferência eletromagnética:** Degradação do desempenho de um equipamento, canal de transmissão ou sistema, causada por uma perturbação eletromagnética.
- **Compatibilidade eletromagnética:** Capacidade de um dispositivo, equipamento ou sistema para funcionar satisfatoriamente no seu ambiente eletromagnético, sem introduzir perturbação eletromagnética intolerável em tudo que se encontre nesse ambiente.

De fato, em um ambiente industrial há altos níveis de perturbações eletromagnéticas que podem se tornar interferência quando encontram um dispositivo sensível. Estas perturbações têm origem nos mais diversos sistemas em funcionamento no ambiente. Em aplicações relacionadas à soldagem, por exemplo, temos as fontes de soldagem e os gabinetes manipuladores como possíveis fontes de perturbação eletromagnética.

Uma forma de abordar um problema de compatibilidade eletromagnética é abordá-lo como o estudo da geração, transmissão e recepção de energia eletromagnética em um ambiente. Deste modo, considera-se uma fonte que emana energia eletromagnética, um meio de propagação e os efeitos gerados sobre um sistema que recebe essa energia [25].

Sob esta abordagem, verifica-se que para diminuir a interferência eletromagnética em um dispositivo deve-se suprimir a emissão de energia eletromagnética na fonte, fazer com que haja um caminho de propagação ineficiente e tornar o receptor menos susceptível às interferências

eletromagnéticas oriundas das perturbações, seja por meios condutivos ou por radiação.

Dentre as três abordagens supracitadas, percebe-se que se tem mais liberdade sobre o meio de propagação da perturbação eletromagnética do que sobre as características particulares da fonte e do receptor. Pensando nisso, define-se o objetivo de tornar o meio de propagação da perturbação eletromagnética ineficiente, de modo que este sinal seja degradado antes que possa se tornar uma interferência [25].

Para perturbações que se propagam por meios condutivos, uma boa forma de degradá-las é através de filtros, que atuam sobre as correntes de modo comum ou modo diferencial, conforme a característica do dispositivo. Liz [25], mostra um exemplo do uso de filtros analógicos para atenuar perturbações eletromagnéticas geradas por uma fonte chaveada. Para este caso específico o ruído eletromagnético predominante era de modo diferencial.

Quando a perturbação eletromagnética se propaga por meio de radiação, através do ar, um modo eficiente para preservar o funcionamento dos dispositivos é através da blindagem eletromagnética [26].

Seja uma região R no espaço que tem suas fronteiras delimitadas por uma superfície metálica fechada constituindo um volume V . A região delimitada pela superfície fechada é chamada de *Partição Blindante*.

A introdução de uma partição blindante em um sistema prevê a atenuação e a reflexão das ondas eletromagnéticas que se confrontam com a mesma promovendo blindagem em duas situações [26]:

1. A fonte de perturbação eletromagnética está dentro da partição blindante: Neste caso a partição blindante protege o ambiente externo contra essa perturbação;
2. A perturbação eletromagnética está fora da partição blindante: Neste caso a partição blindante irá proteger o sistema que opera dentro dela contra interferências externas.

A partição blindante deve ser capaz de bloquear ou atenuar para níveis aceitáveis uma perturbação eletromagnética através de suas fronteiras. Uma partição blindante geralmente é uma superfície metálica que isola um determinado dispositivo do meio externo sob o ponto de vista eletromagnético. A eficácia de uma partição blindante pode ser estimada pela atenuação efetiva que esta promove nos campos elétrico e magnético de uma onda que incide sobre suas fronteiras, como mostra a equação (2.11) para o campo elétrico e (2.12) para o campo magnético [26].

$$S = 20 \log \left(\frac{E_0}{E_1} \right) [dB] \quad (2.11)$$

$$S = 20 \log \left(\frac{H_0}{H_1} \right) [dB] \quad (2.12)$$

Onde S representa a eficácia de blindagem, em decibéis, e os índices 0 e 1 representam os campos antes e depois de confrontar a superfície de uma partição blindante, respectivamente.

2.6.1 Blindagem de cabos

Para que perturbações eletromagnéticas não causem interferência em sinais que transitam por cabos, a comunicação entre os dispositivos deve ser feita por cabos dotados de uma partição blindante.

Dada a geometria de um cabo, a partição blindante do mesmo se dá através de uma malha, geralmente de cobre, que envolve todas as vias de sinal, vide Figura 17. A malha, por sua vez deve estar conectada a um sistema de aterramento, para dar fuga às perturbações induzidas nela.

Os dispositivos a serem conectados nas extremidades deste cabo devem estar dentro de partições blindantes que devem estar conectadas à malha de terra do cabo, como mostra a Figura 18.

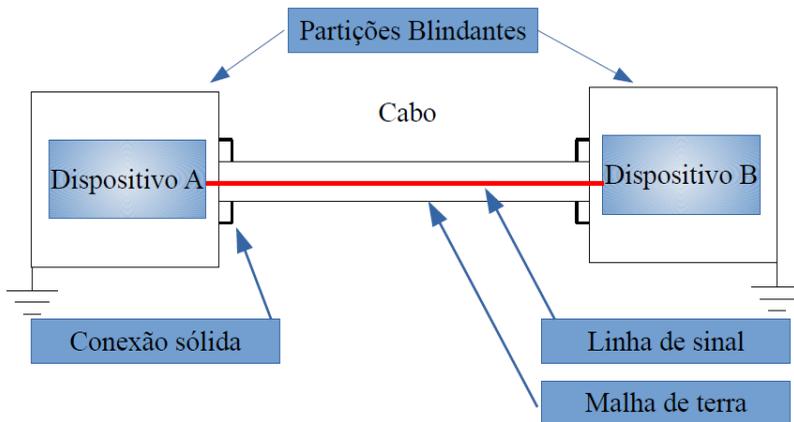
O esquema apresentado na Figura 18 é importante para que o cabo não atue como antena, trazendo para dentro das partições blindantes a perturbação eletromagnética. Pelo fato do cabo ser longo, perturbações eletromagnéticas radiadas podem ser facilmente captadas por ele. A partição blindante deve, ao ser atacada pela perturbação, dar fuga às tensões e correntes induzidas em sua extremidade para o sistema de aterramento. No interior da malha de terra (que é a partição blindante), cria-se um a região equipotencial, que funciona como uma gaiola de Faraday [26], prevenindo as linhas de sinal de serem afetadas pela perturbação.

Figura 17: Cabo com proteção por malha de terra



Fonte: MD Policabos (www.mdpolcabos.com/cabo-manga-e-cabo-manga-pareado/)

Figura 18: Ligação de dispositivos com suas partições blindantes conectadas via malha de terra do cabo



Fonte: O autor

As técnicas de atenuação da energia eletromagnética recebida por um dispositivo devem ser combinadas com técnicas que limitem a emissão desta energia por parte das fontes [26]. Nos ambientes industriais é tarefa difícil mensurar a quantidade de energia emitida sob a forma de perturbações eletromagnéticas devido à quantidade de potenciais fontes desta perturbação e pela presença de dispositivos não homologados pelos órgãos regulamentadores que acabam emitindo energia eletromagnética em níveis superiores aos estabelecidos por norma.

3 O TARTÍLOPE NO PROCESSO ORBITAL

O objeto de estudo do trabalho em questão é o manipulador robótico de soldagem Tartílope. Este equipamento foi desenvolvido no LABSOLDA visando a automatização de processos de soldagem e corte. Sua estrutura permite inclusive a automatização do processo de soldagem orbital de dutos, visando principalmente aplicações no processo de construção de linhas dutoviárias para transporte de gases combustíveis e petróleo [27].

Sua estrutura funcional pode ser dividida em três partes principais, listadas a seguir [27]:

1. **Gabinete de controle:** O gabinete do Tartílope abriga a placa de processamento que usa um controlador ARM LPC2148, e é responsável pela leitura de sinais, comunicação e geração de comandos, além das fontes de alimentação e dos drivers que comandam os motores do robô;
2. **Interface Homem Máquina (IHM):** Parte do sistema que realiza a ponte entre o equipamento e o operador. Através da IHM o operador pode realizar a parametrização do processo, realizar correções em tempo real e dar comandos de início e parada do movimento;
3. **Manipulador de tocha:** Carrinho que se desloca por um trilho metálico conduzindo a tocha por sobre a região de preenchimento do chanfro.

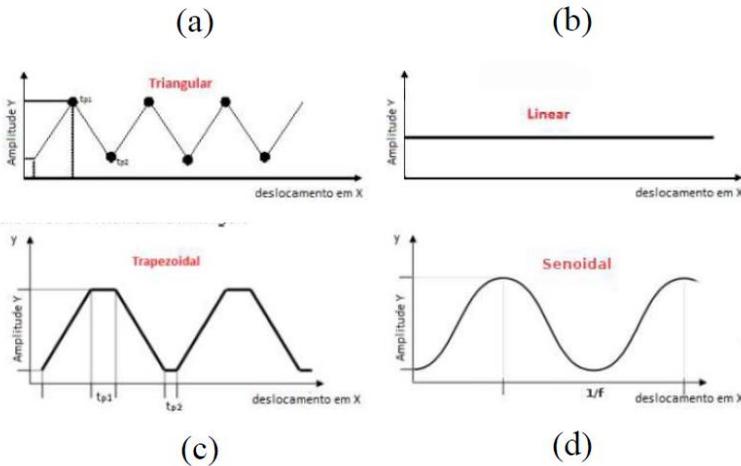
Inserido em aplicações de soldagem orbital, o manipulador de tocha trafega sobre um trilho metálico disposto de forma a envolver o tubo. Neste modo de operação, o usuário deve proceder a parametrização da trajetória buscando um cordão uniforme e estável em qualquer trecho da mesma [6].

Através da IHM do Tartílope, o operador tem acesso aos parâmetros do movimento que devem ser configurados para a soldagem orbital. Tais parâmetros são listados a seguir [27]:

1. **Tipo de tecimento:** Determina o tipo de movimento realizado pela tocha em relação à peça enquanto a solda acontece. O passe pode ser dividido em quatro subitens:
 - a. **Linear:** A tocha se movimenta apenas no sentido da soldagem gerando uma trajetória em linha reta em relação à junta.

- b. **Triangular:** A tocha se movimenta com velocidade constante no sentido da soldagem, porém com movimento de amplitude no sentido perpendicular à junta com tempos de parada nulos, gerando uma trajetória semelhante a uma sequência de triângulos, como mostra a Figura 19.
- c. **Trapezoidal:** A tocha realiza movimentos de amplitude na direção perpendicular à junta com tempos de parada nos vales e picos. Este comportamento gera uma trajetória que se assemelha a uma sequência de trapézios, como mostra a Figura 19.
- d. **Senoidal:** O movimento no sentido da soldagem e o movimento perpendicular à junta são interpolados de forma que a trajetória da tocha se assemelha a uma onda senoidal por sobre a junta, como mostra a Figura 19.

Figura 19: Tipos de tecimento: (a) Triangular, (b) Linear, (c) Trapezoidal e (d) Senoidal



Fonte: Adaptado de Sistemas e Processos de Soldagem [27]

2. **Modo pontos:** Habilita a movimentação do Tartilope por pontos pré-definidos. Isto permite que o Tartilope tenha

padrões de movimento diferentes entre dois pontos distintos. Para marcar um ponto na memória do Tartílope, o usuário precisa acessar o menu “Marcar novo”, em seguida, deslocar o robô para o ponto de interesse e pressionar o botão referente ao número do ponto que deseja salvar. Os pontos são enumerados de 1 a 5 e o usuário deve marcar quantos julgar necessário para parametrização do processo. Um ponto qualquer pode ainda, ser definido como origem ou final de trajetória para orientação do robô, sendo que a unidade de processamento armazena a posição através da contagem do número de passos do motor desde a origem até o ponto.

3. **Parâmetros dos trechos:** Uma vez definidos os trechos, é possível definir os seguintes parâmetros para cada um dos trechos:
 - a. **Velocidade de soldagem:** É a velocidade efetiva com que a tocha percorre a região da junta;
 - b. **Amplitude de tecimento:** É a distância em milímetros entre um pico e um vale da trajetória da tocha, no sentido perpendicular à junta;
 - c. **Frequência de tecimento:** É o número de oscilações completas que a tocha descreve no tempo de 1 segundo;
 - d. **Tempos de parada:** Os tempos de parada superior e inferior dão forma ao trapézio quando o equipamento opera no modo trapezoidal. Quanto maior o tempo de parada, maior é o platô descrito pela tocha (Vide Figura 19 (c)).

O Tartílope possui outros parâmetros e outras funções em seu menu que não serão abordadas nesta análise porque fogem do escopo da soldagem orbital.

Percebe-se que toda a parametrização é feita com base em trechos definidos por posições específicas do carrinho e orientadas por meio da contagem de pulsos que são enviados aos motores. Conforme abordado em [28], os motores de passo são assim chamados pois são construídos, sob o ponto de vista elétrico e mecânico, de forma que precisam ser alimentados por pulsos de tensão e cada pulso corresponde a um passo do motor. Segundo as informações do fabricante, consegue-se a relação entre a rotação do motor, em graus e o número de pulsos, grandeza conhecida como precisão do motor. Normalmente, motores de passo conseguem garantir rotação com boa precisão angular.

Dois situações podem causar mau funcionamento de um motor de passo [28]. A primeira delas está relacionada à velocidade de rotação do motor. Para aumentar a velocidade de um motor de passos, obrigatoriamente, aumenta-se a frequência dos pulsos de alimentação. O aumento da frequência causa a diminuição da largura do pulso no tempo, diminuindo também a energia do mesmo. Com menor energia, a probabilidade de um pulso não conseguir vencer o torque de carga do motor aumenta, aumentando a probabilidade da perda de um passo, isto é, o driver envia o pulso, porém, o motor não responde com um passo [28]. A segunda situação, está relacionada a um aumento da carga mecânica sobre o motor. Em situações onde o torque de carga varia, é possível que hajam perdas de passo. Isto se deve novamente ao fato da energia do pulso não ser suficiente para gerar torque resultante positivo na máquina. Esta segunda situação é comumente observada no Tartilope quando opera em soldagem orbital, uma vez que o torque exigido pelo motor se altera em função da região da trajetória que o robô se encontra, sendo menor na posição vertical descendente e maior na posição vertical ascendente. Além disso, os cabos presos à tocha geram resistências diferentes à medida em que o movimento é executado.

Na observância deste fato percebe-se que: uma vez que a parametrização da soldagem é feita por trechos que têm como referência a contagem de passos, caso haja perda de passo, a parametrização pode ficar comprometida. Além disso, a divisão de trechos traz o problema de que os parâmetros são mantidos constantes dentro do intervalo, deste modo, ao cruzar o ponto que delimita o final de cada trecho, o robô altera sua parametrização de forma abrupta, onde o ideal é uma alteração gradual dos parâmetros.

Inserindo uma malha de controle de posição, através de encoders o problema da perda de passos poderia ser solucionado, uma vez que o driver poderia gerar os pulsos e a unidade de controle verificar se o motor se deslocou efetivamente. Entretanto, conforme observado por Galeazzi [29] a instalação de encoders no Tartilope demandaria um reprojeto das partes mecânicas.

Além disso, está em desenvolvimento no LABSOLDA um manipulador para soldagem interna de tubos, o CSI (Cabeçote de Soldagem Interna), que precisa ser referenciado em relação à Terra para evitar problemas de posição relativa entre o robô e o tubo que causem desvios na leitura da posição de soldagem. Este trabalho traz, deste modo, uma alternativa de orientação da posição de soldagem através de sensores inerciais que possuem vantagens em relação aos encoders no tocante aos custos e na referência de posição.

4 DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

O protótipo desenvolvido tem a função de identificar a posição angular instantânea do robô e enviar esta informação para o gabinete de controle, onde estão implementadas funções que tomam como base essa inclinação para calcular os parâmetros de movimento ideais que serão executados pelo manipulador.

A inclinação do plano de soldagem é medida através de uma unidade de medição inercial, instalada junto ao manipulador. O dispositivo utilizado é o MPU-6050, que é bastante consolidado no mercado pela facilidade de utilização. Uma característica interessante deste sensor é que ele retorna um valor que não é relativo a outras partes do robô, ou seja, o ângulo obtido de uma unidade inercial é medido em relação ao vetor gravidade, que se torna diretamente um referencial inercial do sistema [9].

Dentre os dispositivos inerciais encontrados no mercado, o MPU-6050 se mostrou uma boa alternativa para medição da inclinação angular do robô. O MPU-6050 é a primeira unidade de processamento de movimento de 9 eixos do mundo [30]. Seu hardware contém um acelerômetro e um giroscópio tri axiais com tecnologia MEMS e permite a ligação de outros dispositivos, como magnetômetros, via barramento I²C auxiliar, formando, com isso, um sistema de referenciamento completo. As principais características, observadas na sua folha de dados [30], são citadas a seguir:

1. DMP: O MPU-6050 possui um hardware dedicado ao processamento do movimento, o DMP (*Digital Motion Processor*). Esta funcionalidade auxilia no tratamento dos dados e gera saídas na forma de quatérnions que podem ser aplicados em computação gráfica;
2. Acelerômetro e Giroscópio integrados: Em um mesmo encapsulamento, são encontrados o acelerômetro e o giroscópio. Isto faz com que o sistema completo seja mais compacto e mais barato;
3. Saída digital de 16 bits: Os dados do MPU-6050 são disponibilizados em formato digital, com resolução de 16 bits;
4. Fundo de escala programável: O fundo de escala para medições de aceleração e velocidade angular é programável via software, assim, o usuário pode tirar melhor proveito da resolução da saída;

5. Baixo consumo: O hardware completo drena 3.9 mA quando ligado em uma fonte de 3,3 V.

Baseado nessas características, decidiu-se utilizar este sensor que é popular no mercado e de fácil integração com plataformas de prototipagem como Arduino, por exemplo. A primeira fase de desenvolvimento foi focada na leitura do sensor e interpretação dos valores, a segunda fase foi focada em estabelecer comunicação robusta entre o sensor e o gabinete do Tartilope e a terceira fase se concentrou em definir a equação que calcula os parâmetros de movimento de forma adaptativa em função da inclinação. A descrição dos passos do projeto é feita nas seções seguintes.

4.1 LEITURA E INTERPRETAÇÃO DOS DADOS

Como mencionado, o MPU-6050 possui saída em formato digital com resolução de 16 bits. Podem ser acessados dois tipos de dados através de seus registradores: (a) os dados brutos, que não passam por nenhum sistema de tratamento e (b) dados processados pelo DMP (*Digital Motion Processor*) [30].

O DMP realiza leitura dos dados brutos dos sensores inerciais à uma taxa de 1kHz e realiza procedimento de filtragem e tratamento destes sinais à mesma taxa. Os dados processados são armazenados em um buffer de 1024 bytes do tipo FIFO [30], de onde são lidos pelo controlador. Em um primeiro momento, foram lidos os dados brutos, sem a utilização do DMP e, na sequência do desenvolvimento, observou-se elevados ganhos em se utilizar o recurso DMP.

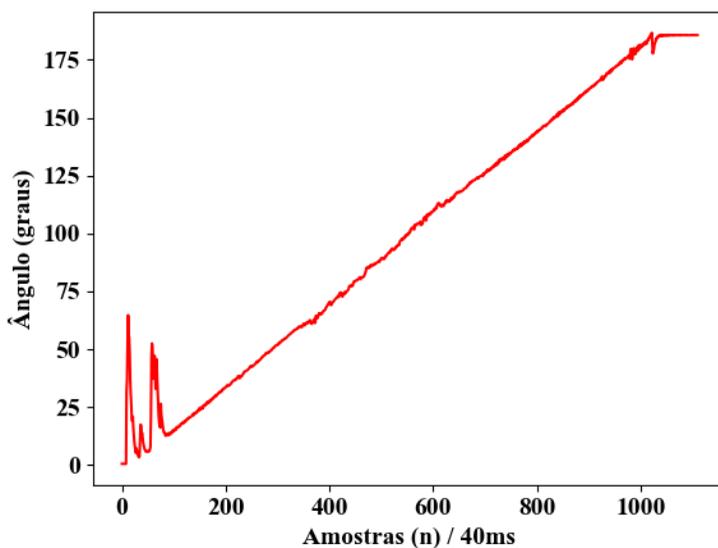
4.1.1 Leitura de dados brutos e processamento via software

Para os primeiros ensaios, utilizou-se o kit de prototipagem STM32F4, do fabricante ST Microeletronics, kit de alto desempenho que possui um processador ARM de 32 bits. Com este kit, foi feita leitura da IMU pelo barramento I²C, de onde podiam ser lidos apenas os dados brutos. Estes dados passavam por condicionamento para poderem ser convertidos em ângulos. O equacionamento para convertê-los em ângulo passa primeiramente pelo ajuste de escala, dando significado físico aos números e, posteriormente, pelo equacionamento de Euler, visto no capítulo 2. Para reduzir a aleatoriedade das medições, os dados eram submetidos ao chamado Filtro Complementar, onde são fundidos os dados do acelerômetro e do giroscópio visando a compensação da

susceptibilidade a ruídos do primeiro e a imprecisão do segundo [9]. A Figura 20 mostra o ângulo em graus calculado a partir das amostras tomadas com intervalo regular de 40 ms enquanto o robô se movimenta da posição plana à sobre-cabeça, percorrendo um deslocamento angular de 180° . Os dados são enviados a um laptop para que possam ser visualizados através de um cabo USB.

Tal sistema se mostra demasiado sensível a acelerações resultantes de vibrações mecânicas. Apesar disso, a susceptibilidade a ruído mecânico não descarta a aplicação do sistema na soldagem, porém, o processo resulta em algoritmos com determinado esforço computacional que pode ser reduzido pelo uso do DMP, além do fato de o DMP realizar a filtragem em taxas mais elevadas do que as possíveis de se conseguir via software, gerando melhor acurácia do processo [9].

Figura 20: Medição de ângulo sem processamento pelo DMP



Fonte: O autor.

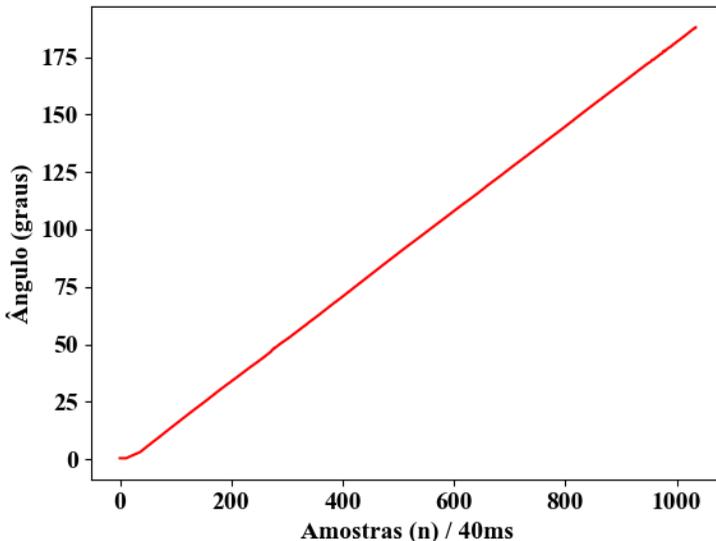
Visando utilizar um recurso importante da IMU, as pesquisas focaram no uso do DMP para proceder a filtragem dos sinais, melhorando a rejeição ao ruído e reduzindo o esforço computacional por parte do controlador.

4.1.2 Leitura de dados processados pelo DMP

Uma segunda abordagem para a leitura do sensor é realizá-la através do registrador FIFO que armazena valores que passaram por um processamento mais complexo, feito pelo DMP, que é muito útil na integração da IMU com aparelhos eletrônicos que realizam cálculos de computação gráfica, como controles de vídeo games e óculos de realidade virtual [30].

A saída deste registrador é dada na forma de quatérnions e pode-se facilmente obter os ângulos de arfagem (ϕ), rolagem (θ) e guinada (ψ) através do equacionamento descrito no item 2 do capítulo 2. O uso do DMP faz com que se reduza o esforço computacional aplicado ao controlador que, agora, já recebe valores tratados e filtrados em alta frequência. Sob as mesmas condições do ensaio da Figura 20, nota-se uma menor influência da vibração mecânica no cálculo da inclinação causada pelo uso do DMP, como mostra a Figura 21.

Figura 21: Medição de ângulo processado pelo DMP



Fonte: O autor.

Observa-se uma rejeição ao ruído significativamente maior do que no sistema do caso anterior. Tal característica é obtida através do

processamento em alta velocidade, mesmo que a leitura do dado seja realizada em taxas mais baixas.

Deste modo, utilizando o recurso do DMP, a IMU não fica subutilizada e os resultados são melhores. Com isso, o projeto passa para sua segunda etapa, que tem seu foco em realizar a comunicação através de uma longa distância entre a IMU e o processador do Tartílope. De fato, este passo é a integração do sistema de medição angular com o robô.

O MPU-6050 fornece inclinação com uma precisão de $0,01^\circ$ para mais ou para menos. A frequência de amostragem, no caso da soldagem orbital, está relacionada à velocidade de soldagem, que tem valores usuais na ordem dos 35 cm/min. Para ter uma margem de segurança, utiliza-se como limite de velocidade de soldagem o valor de 50 cm/min que, no caso do robô utilizado, com diâmetro de trilho de 667 mm, gerou uma velocidade angular de $0,71^\circ/\text{s}$ (graus por segundo), ou seja, uma amostragem à taxa de 25 Hz permite que o maior erro de posicionamento seja de $0,029^\circ$. O aumento da frequência de amostragem consegue reduzir a menor divisão de ângulo, aumentando a resolução que no limite, será igual à resolução do sensor, que é de $\pm 0,01^\circ$.

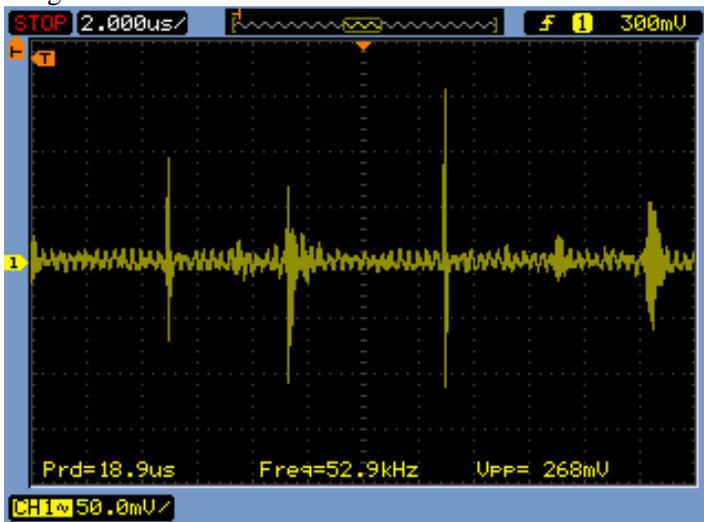
4.2 COMUNICAÇÃO ENTRE SENSOR E TARTÍLOPE

A inclinação lida pela IMU deve ser enviada ao processador do Tartílope, localizado em seu gabinete de controle. A distância entre os dispositivos pode variar entre três e quatro metros.

Para fins de teste de viabilidade, utilizou-se um barramento físico construído a partir de um cabo manga de 6 vias com malha de blindagem e comprimento de 2 metros que usa diretamente o protocolo I²C. Este cabo foi utilizado para estabelecer comunicação entre a IMU e o kit de desenvolvimento STM32F4 sem integração com o Tartílope, apenas para validação das leituras. Em um primeiro momento, a comunicação foi bem-sucedida, a uma taxa de 100 kbps, utilizando o protocolo I²C diretamente. Quando se tentou integrar o sistema com o Tartílope, problemas relacionados à perda de comunicação passaram a ocorrer. O protótipo tinha bom funcionamento em ambiente livre de perturbações eletromagnéticas, entretanto, exposto à presença de equipamentos de soldagem, transformadores e outros robôs, detectou-se a presença de perturbação eletromagnética que atacava os cabos e degradava os sinais, causando erro de leitura ou a perda total de comunicação. A Figura 22 mostra a medição de tensão do barramento CC do kit de desenvolvimento STM32F4, utilizando o acoplamento CA do osciloscópio, de modo a enfatizar a forte perturbação eletromagnética que se propaga, sobretudo,

da fonte chaveada do próprio Tartilope, por meios não condutivos, e se sobrepõe aos sinais que existem entre o sensor e o controlador, transformando-se em uma interferência eletromagnética. Tal interferência chega a induzir tensões de 268 mV de amplitude, correspondente a 8,12% da amplitude do barramento e se sobrepõe aos sinais que transitam pelas linhas de comunicação causando falhas na detecção dos bits.

Figura 22: Barramento 3,3Vcc do processador atacado por ruído eletromagnético



Fonte: O autor

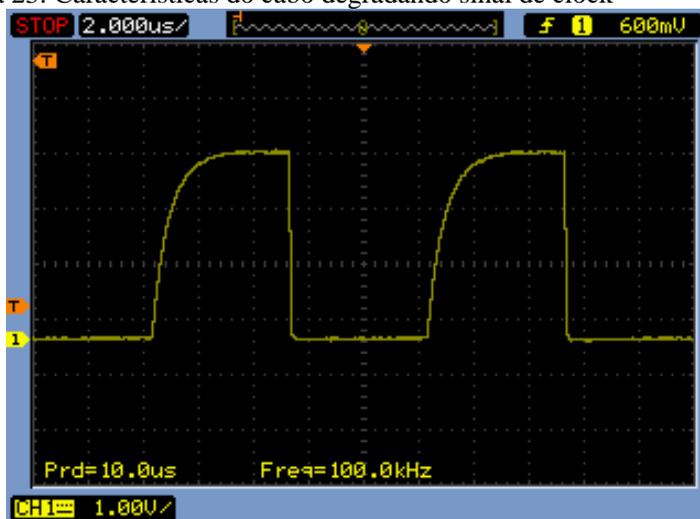
Segundo teoria desenvolvida no capítulo 2 deste trabalho, uma possível solução para este problema é a inserção de partições blindantes que envolvem os dispositivos [26]. Para isso, tanto o sensor como o kit de desenvolvimento STM32F4 foram acomodados no interior de caixas de alumínio fechadas por todos os lados e ligadas entre si pela malha de terra do cabo que também era ligada ao sistema de aterramento do prédio.

De fato, as interferências diminuíram, entretanto, devido ao comprimento do cabo, suas características resistivas e capacitivas geravam uma derivada de tensão demasiado lenta, principalmente no sinal de clock, que faz com que o receptor não identifique os momentos exatos de leitura, ocasionando perda de dados. A forma de onda vista na Figura 23 foi obtida pela observação da linha de clock do sistema de comunicação com a ajuda de um osciloscópio. Uma onda quadrada era

esperada, entretanto, as características do cabo geram as distorções mostradas.

O fato de, nessa etapa, ter sido usado um cabo provisório, com dimensões reduzidas, e ainda assim terem sido observados problemas de comunicação, faz com que espere-se que, em cabos maiores, como como a aplicação exige, este efeito impossibilite a comunicação direta por um barramento I²C. De fato, segundo [23], um barramento I²C é limitado em distância devido a uma limitação em capacitância de aproximadamente 400pF, valor que, embora não tenha sido medido, deve ter sido superado para este cabo provisório.

Figura 23: Características do cabo degradando sinal de clock



Fonte: O autor.

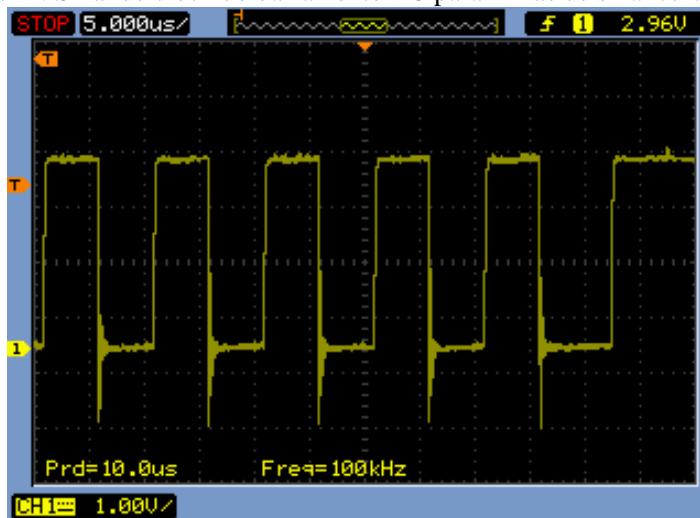
Diante dessa realidade, estudou-se brevemente a possibilidade de realizar uma conversão direta para outro protocolo. Entretanto, tal solução pareceu demandar um circuito complexo e adequação dos níveis de tensão. A proposta então foi utilizar um microcontrolador simples para realizar a adaptação dos barramentos.

Um microcontrolador pequeno (Arduino nano) passou a ser utilizado para realizar a leitura do sensor, via protocolo I²C através de uma pequena placa de circuito impresso, desenvolvida especialmente para esta aplicação. A saída UART do Arduino é ligada ao CI MAX3232, que realiza uma adaptação de barramento, levando os níveis TTL (0 a 5V) do protocolo UART aos níveis do RS-232, proporcionando barramento

suficientemente robusto [31]. De fato, poderia ter sido utilizado um barramento físico ainda melhor, como o RS-485, que alcança maiores distâncias com velocidades ainda maiores [22], entretanto, o barramento RS-232 foi utilizado devido ao seu mais baixo custo e devido, principalmente, ao fato do Tartílope ter sua interface baseada nesse protocolo, não demandando nenhuma adaptação.

Segundo [21], o barramento RS-232, assim como o I²C, é limitado por um valor de capacitância, entretanto, com barramento RS-232 é possível atingir comprimentos de até 20 metros. O uso do Arduino traz ainda a vantagem de poder proceder a leitura de outros sensores que, por ventura, venham a ser instalados junto a tocha, como sensores de distância e temperatura, por exemplo, e enviar todos estes dados por um único barramento até o processador do Tartílope.

Com isso, o barramento I²C continua sendo necessário, entretanto, como o sensor inercial está na mesma placa de circuito impresso que o Arduino, as linhas de comunicação I²C tiveram seu tamanho reduzido a poucos centímetros. Com linhas mais curtas, o barramento I²C apresenta bom funcionamento. O mesmo teste feito com os cabos longos foi realizado novamente para o pequeno barramento roteado em placa de circuito impresso, e os efeitos resistivo e capacitivo entre as linhas não se mostraram um problema nessa nova configuração, situação evidenciada pelas altas derivadas de tensão observadas nos sinais. Como exemplo, a Figura 24 mostra a observação do sinal de clock da comunicação, evidenciando que, para linhas mais curtas, temos uma onda que se aproxima melhor de uma onda quadrada do que no caso com linhas longas.

Figura 24: Sinal de clock do barramento I²C para linhas de sinal curtas

Fonte: O autor.

Com o sensor lido através de linhas curtas pelo Arduino nano, o Arduino realiza a conversão de barramento e procede o envio dos dados ao Tartílope através de um barramento RS-232 que suporta um maior comprimento. No processador do Tartílope foi desenvolvida uma função que, baseada na inclinação recebida, gera alterações nos parâmetros de movimento, conforme mostra a seção 4.3.

4.3 CÁLCULO ADAPTATIVO DE PARÂMETROS

Kindermann [6], em seus trabalhos, mostra a importância de um sistema adaptativo de parâmetros para um processo de soldagem orbital. Testes realizados com parâmetros constantes, isto é, sem sistema adaptativo, mostraram que o cordão de solda fica sujeito a falhas, inclusive registrando perfurações da peça.

A metodologia abordada por Kindermann realiza correções dos parâmetros de soldagem com base na posição e também com base na abertura da raiz, lida por um sensor laser. Seu trabalho também mostra que os parâmetros usados no algoritmo adaptativo são definidos para as posições principais: plana, vertical e sobre cabeça através de ensaios em chapas postas nestas posições.

Seu trabalho mostra ainda a divisão dos trechos onde são definidos os parâmetros de soldagem. Devido às características do robô utilizado,

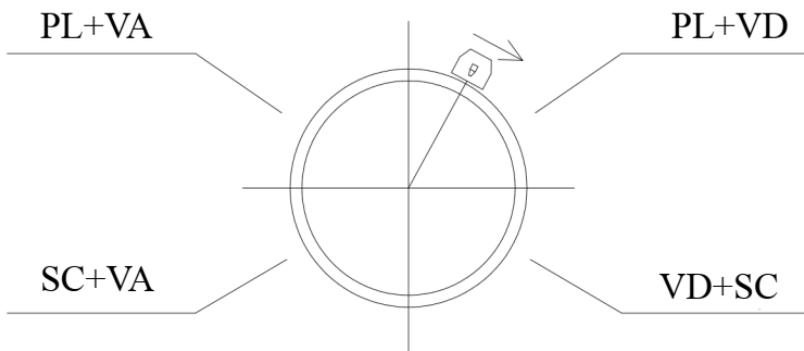
Kindermann realizou a divisão dos trechos em intervalos de 15° contados a partir da posição plana. Ao mostrar a forma de cálculo dos parâmetros de soldagem em função da abertura da raiz, Kindermann mostra também que, uma vez gerados, estes parâmetros podem ser corrigidos de forma linear em função da posição (inclinação do plano de soldagem), ponto de partida para a função de correção criada neste trabalho.

A função que atualiza os parâmetros de movimento baseada na inclinação do robô, realiza um cálculo de média ponderada entre os dois parâmetros preponderantes para cada quadrante da circunferência, como mostra a Figura 25.

O cálculo da média ponderada é feito a partir do cálculo de um conjunto de fatores ponderadores que são multiplicados pelos respectivos parâmetros para definir seu valor em função da inclinação do plano de soldagem.

O fator ponderador é um valor entre 0 e 1, calculado relacionando a posição angular atual com as quatro posições principais (plana, vertical descendente, sobre cabeça e vertical ascendente), podendo ser feita uma analogia com o percentual que a posição atual do robô representa em relação às posições de referência. Por exemplo, se o robô está inclinado a 45° , ele está com 50% de posição plana e 50% de posição vertical descendente.

Figura 25: Composição das posições de soldagem em cada quadrante



Fonte: O autor.

O ângulo é contado a partir da posição plana no sentido horário, evoluindo linearmente até retornar à posição plana. Deste modo, percebe-se que a cada trecho de 90° o robô passa por uma das posições de referência, assim, os fatores ponderadores são calculados por funções

lineares definidas em trechos de 90° . Para posições fora do primeiro quadrante, deve ser feito um ajuste sobre o ponto de início do trecho. As funções para todos os quadrantes são mostradas nas equações abaixo, onde PL , VD , SC e VA são os fatores ponderadores da posição plana, vertical descendente, sobre cabeça e vertical ascendente, respectivamente.

1. Primeiro quadrante:

$$PL = \frac{-Ang}{90} + 1 \quad (4.1)$$

$$VD = \frac{Ang}{90} \quad (4.2)$$

$$SC = 0 \quad (4.3)$$

$$VA = 0 \quad (4.4)$$

2. Segundo quadrante:

$$PL = 0 \quad (4.5)$$

$$VD = \frac{-Ang}{90} + 2 \quad (4.6)$$

$$SC = \frac{Ang}{90} - 1 \quad (4.7)$$

$$VA = 0 \quad (4.8)$$

3. Terceiro quadrante:

$$PL = 0 \quad (4.9)$$

$$VD = 0 \quad (4.10)$$

$$SC = \frac{-Ang}{90} + 3 \quad (4.11)$$

$$VA = \frac{Ang}{90} - 2 \quad (4.12)$$

4. Quarto quadrante:

$$PL = \frac{Ang}{90} - 3 \quad (4.13)$$

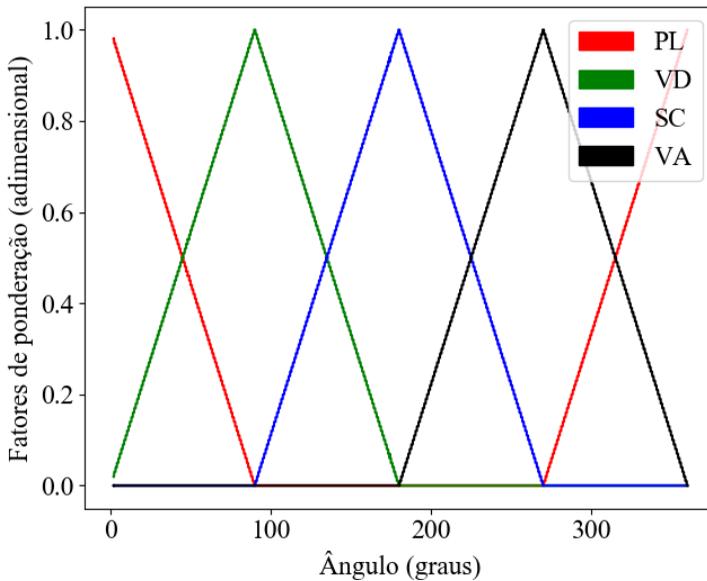
$$VD = 0 \quad (4.14)$$

$$SC = 0 \quad (4.15)$$

$$VA = \frac{-Ang}{90} + 4 \quad (4.16)$$

A combinação das funções mostradas aplicadas a uma revolução completa gera o diagrama mostrado na Figura 26, onde é possível ver os fatores de multiplicação para cada uma das posições de soldagem e sua evolução em função da inclinação do robô.

Figura 26: Fator de ponderação para os parâmetros de soldagem



Fonte: O autor.

Os parâmetros de soldagem são calculados pela soma dos parâmetros de referência, ponderada pelos fatores referentes a cada parâmetro. O cálculo efetivo dos parâmetros é mostrado nas equações a seguir para a velocidade de soldagem, amplitude de tecimento, frequência de tecimento, tempo de parada 1 e tempo de parada 2, respectivamente:

$$Vel = Vel_{PL} \cdot PL + Vel_{VD} \cdot VD + Vel_{SC} \cdot SC + Vel_{VA} \cdot VA \quad (4.17)$$

$$Amp = Amp_{PL} \cdot PL + Amp_{VD} \cdot VD + Amp_{SC} \cdot SC + Amp_{VA} \cdot VA \quad (4.18)$$

$$Fre = Fre_{PL} \cdot PL + Fre_{VD} \cdot VD + Fre_{SC} \cdot SC + Fre_{VA} \cdot VA \quad (4.19)$$

$$T_1 = T_{1PL} \cdot PL + T_{1VD} \cdot VD + T_{1SC} \cdot SC + T_{1VA} \cdot VA \quad (4.20)$$

$$T_2 = T_{2PL} \cdot PL + T_{2VD} \cdot VD + T_{2SC} \cdot SC + T_{2VA} \cdot VA \quad (4.21)$$

As equações (4.17) a (4.21) mostram o cálculo dos referidos parâmetros como a soma dos parâmetros de base para cada posição multiplicados pelos respectivos fatores ponderadores.

Este equacionamento foi implementado no processador do Tartílope juntamente com uma interface onde o usuário entra com os parâmetros de referência para que o sistema proceda a interpolação. O laço de atualização é executado à cada 40 ms, taxa suficiente para que a troca de parâmetros se aproxime de um processo contínuo e não apresente variações abruptas no valor dos parâmetros.

4.4 INTERFACE COM O USUÁRIO

As funções de parametrização foram implementadas no processador do Tartílope. Deste modo, surgiu a necessidade de se criar uma interface onde o usuário entre com os parâmetros de referência que serão interpolados pelo sistema. Com a ajuda da equipe técnica do LABSOLDA, foi criado um novo modo de operação do Tartílope: o modo adaptativo.

Neste modo, o operador seleciona cada uma das quatro posições de referência: Plana, Vertical Descendente, Sobre-Cabeça e Vertical Ascendente e, para cada uma dessas posições, se tem acesso aos seguintes parâmetros:

- 1) Velocidade de soldagem (cm/min);
- 2) Amplitude de tecimento (milímetros);

- 3) Frequência de tecimento (hertz);
- 4) Tempos de parada (segundos).

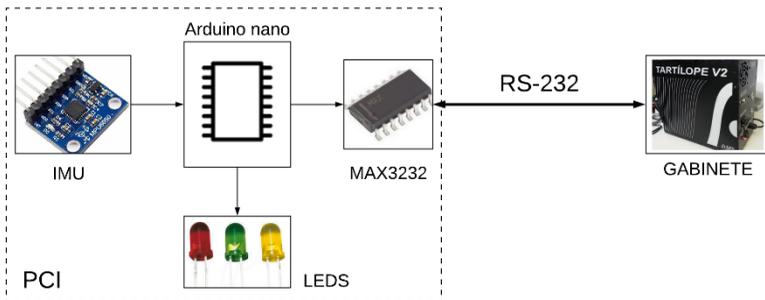
Uma vez especificados, estes parâmetros são acessados pela função de parametrização que realiza a média ponderada entre eles, conforme as equações (4.17) a (4.21) e gera comandos que serão convertidos nas relações de passo para os motores.

4.5 PROTÓTIPO

O resultado da execução dos passos citados neste capítulo é um protótipo que contempla a unidade de medição inercial (MPU-6050), sistema de leitura e comunicação com o Tartílope e uma simplificada interface visual para indicar funcionamento e falhas. Seu diagrama de blocos pode ser visto na Figura 27.

A adaptação de comunicação com o protocolo RS-232 é feita com o CI MAX3232, da Texas Instruments. Este chip recebe sinais em nível TTL, disponibilizados pela UART do Arduino nano e procede a adaptação para um barramento RS-232 com capacidade para até 250 kbps [31].

Figura 27: Diagrama de blocos de protótipo



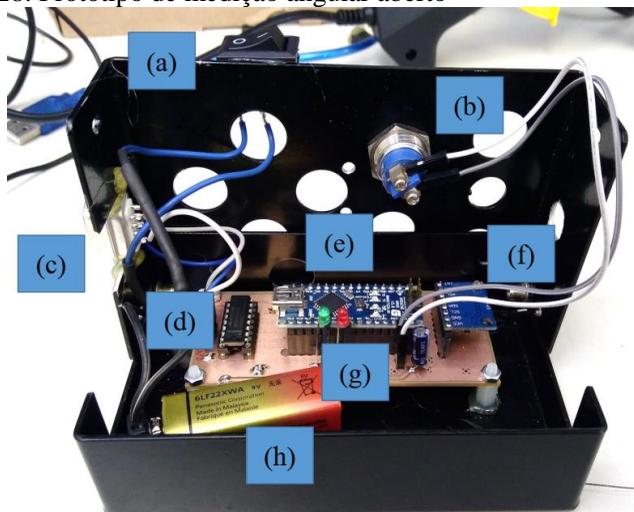
Fonte: O autor.

A interface visual funciona indicando a transmissão de dados através da pulsação intermitente um LED verde e indicando falha na comunicação, acendendo um LED vermelho. Além disso é previsto um botão de reset para reestabelecer a comunicação em caso de falha. A alimentação do protótipo é feita através de uma bateria de 9 Vcc, entretanto, há a opção de alimentar o protótipo através de uma linha de 5 Vcc vinda do Tartílope.

O padrão de conectores adotado foi o DB9, padrão usual para protocolo RS-232, equipando um cabo confeccionado especialmente para esta aplicação. A Figura 28, mostra a parte interna do protótipo com os seguintes componentes:

- a) Interruptor de acionamento;
- b) Botão de reset (visão traseira);
- c) Conector DB9;
- d) CI MAX3232;
- e) Arduino Nano;
- f) MPU-6050;
- g) Interface visual (LED vermelho e LED verde);
- h) Fonte de alimentação (bateria 9 Vcc).

Figura 28: Protótipo de medição angular aberto



Fonte: O autor.

A Figura 29, por sua vez, mostra o protótipo fechado em seu gabinete que tem função de proteção contra choques mecânicos e atua como partição blindante.

Figura 29: Protótipo de medição angular em seu invólucro metálico



Fonte: O autor.

Com o protótipo pronto, foram realizados testes que validaram seu funcionamento através da supervisão dos movimentos do manipulador com um equipamento dedicado à medição de variáveis de soldagem, como explica o capítulo 5.

5 RESULTADOS OBTIDOS

A funcionalidade do sistema desenvolvido foi testada a fim de verificar sua confiabilidade e possibilidade de implementação junto ao Tartilope. Os resultados e metodologia do teste são apresentados nessa seção e, em seguida, é feita uma análise sobre estes resultados.

5.1 DESCRIÇÃO DO TESTE E RESULTADOS

Para validar o sistema, é necessário comprovar que, dada uma parametrização fornecida pelo usuário, o manipulador realizará ajustes nestes parâmetros de forma automática conforme a inclinação de soldagem se altera. Assim, validar a atualização dos parâmetros de movimento implica em medir os movimentos executados pelo manipulador e compará-los com os parâmetros previstos para cada inclinação.

O teste foi realizado com a ajuda de um equipamento dedicado à medição de variáveis de soldagem, o SAP (Sistema Portátil de Monitoração de Variáveis de Soldagem), fabricado pela empresa IMC. Este equipamento, é utilizado no monitoramento de parâmetros de fonte e parâmetros de movimento, tendo capacidade de processamento em alta velocidade e possibilidade de integração com outros sistemas úteis na pesquisa e desenvolvimento em soldagem. Além disso, o Tartilope foi instalado em um corpo de prova tubular que é um pequeno trecho de um tubo semelhante ao usado nas aplicações reais.

O protótipo de medição angular foi acoplado no manipulador do Tartilope de modo que experimente a mesma inclinação que a tocha de soldagem. O gabinete recebe a informação de inclinação do manipulador e, além de corrigir os parâmetros de movimento, codifica esta inclinação em uma saída analógica que foi programada para mapear os ângulos de 0 a 360° em valores de 0 a 10 Vcc. Esta saída analógica foi a única forma encontrada de passar ao SAP a informação de inclinação do Tartilope. Além disso, o SAP procede a leitura de um sensor linear instalado no eixo Y do manipulador de forma que todo o movimento realizado por este eixo é transferido ao sensor e lido pelo SAP.

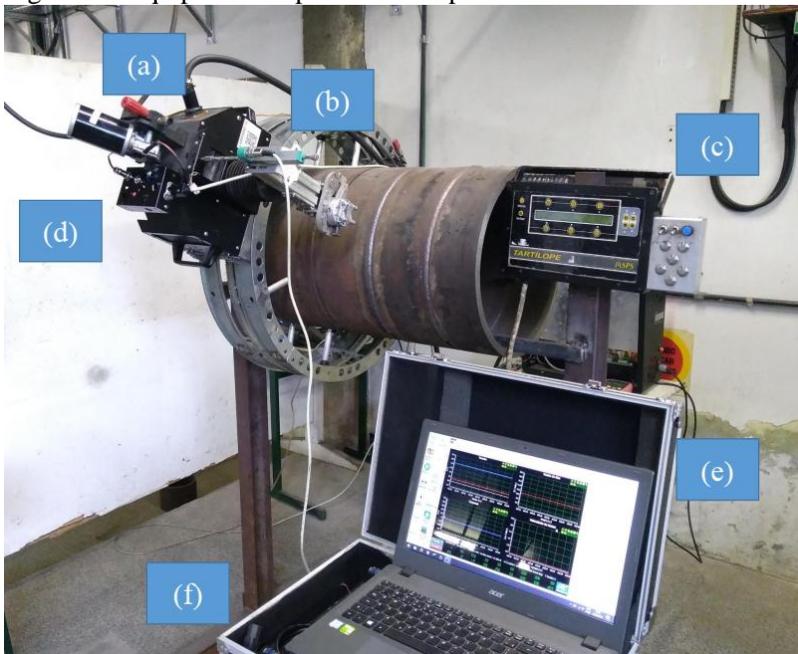
Com os sensores posicionados, o robô foi parametrizado conforme a Tabela 1, e em seguida, o movimento foi iniciado com toda a instrumentação devidamente ligada. A partir daí o sistema de medição angular envia suas medições para o Tartilope que realiza correções na trajetória em tempo real. Tais correções são medidas pelo sensor linear e, ao final de uma revolução completa, o SAP gera um arquivo de dados que

contém os movimentos da tocha e a inclinação do plano de soldagem. Este arquivo foi analisado computacionalmente através de programa escrito na linguagem de programação Python.

A Figura 30 mostra a bancada de testes montada com todos os componentes necessários para realização do ensaio, sendo eles:

- a) Carrinho manipulador sobre seus trilhos;
- b) Sensor linear;
- c) IHM do Tartilope;
- d) Sistema de medição angular;
- e) Laptop de apoio;
- f) SAP.

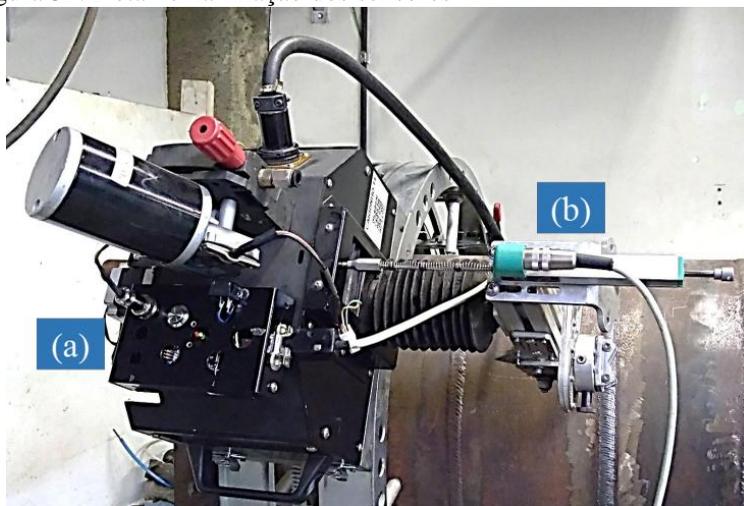
Figura 30: Equipamentos posicionados para teste



Fonte: O autor.

A Figura 31 apresenta um detalhe na fixação do protótipo sob teste (a) e do sensor linear (b). Para o sensor linear, é importante que haja um bom alinhamento em relação ao eixo Y para evitar erros de medição. O protótipo de medição angular deve ser posicionado de modo que esteja sujeito à mesma inclinação que a tocha de soldagem, para não haver erros sistemáticos.

Figura 31: Detalhe na fixação dos sensores



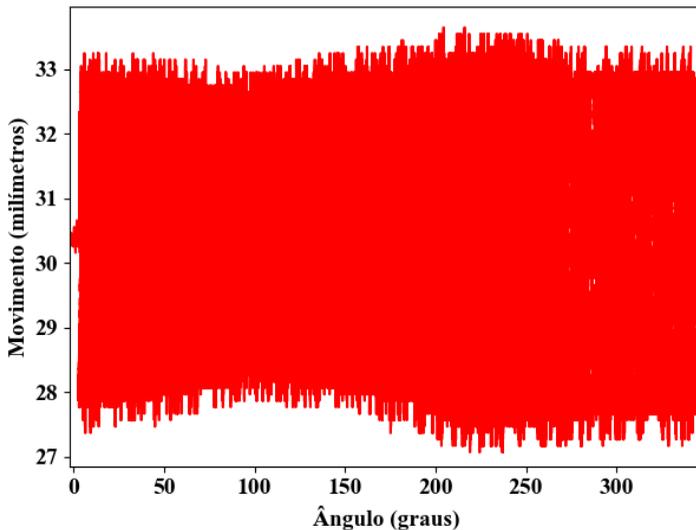
Fonte: O autor.

Tabela 1: Parâmetros de referência carregados no Tartilope

| Parâmetro | Posição de Soldagem | | | |
|-------------------|---------------------|--------------|--------------|--------------|
| | PL | VD | SC | VA |
| Velocidade | 50 cm/min | 40 cm/min | 50 cm/min | 40 cm/min |
| Amplitude | 5 mm | 5 mm | 6 mm | 5 mm |
| Frequência | 2 Hz | 3 Hz | 3 Hz | 1 Hz |
| Tempo de Parada 1 | 40 ms | 0 ms | 0 ms | 200 ms |
| Tempo de Parada 2 | 40 ms | 0 ms | 0 ms | 100 ms |

Uma rotina escrita na linguagem Python procede a leitura do arquivo de dados gerado pelo SAP e faz a plotagem para análise visual. O gráfico visto na Figura 32, é resultado da plotagem direta dos parâmetros de movimento lidos pelo sensor linear, no seu eixo Y, e a inclinação em graus no eixo X. A imagem é saturada de linhas, onde não se consegue ver os detalhes de frequência e tempos de parada do movimento. Entretanto, a envoltória deste sinal mostra a evolução das amplitudes de tecimento em função da inclinação.

Figura 32: Alteração do movimento de tecimento em função da inclinação do plano de soldagem

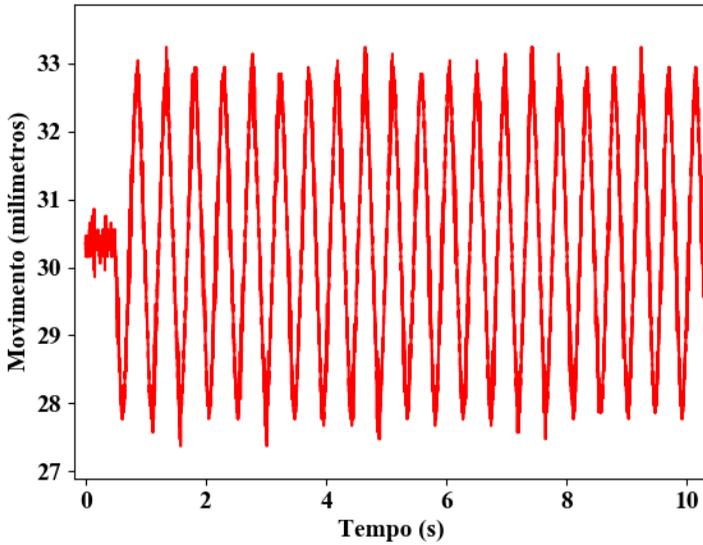


Fonte: O autor.

Os pontos esparsos que podem ser vistos na figura, são originados por folgas nos eixos do manipulador, neste caso no eixo Y. Estas folgas geram certo grau de aleatoriedade na posição do manipulador e são tratados nos trabalhos de Galeazzi [29]. Para ter uma visão mais precisa do movimento em cada posição, foi dado um *zoom* no gráfico nas regiões correspondentes às posições plana, vertical descendente, sobre-cabeça e vertical ascendente, porém, tendo o movimento plotado em função do tempo, para a visualização da frequência e tempos de parada. A Figura 33 mostra o detalhe da posição plana.

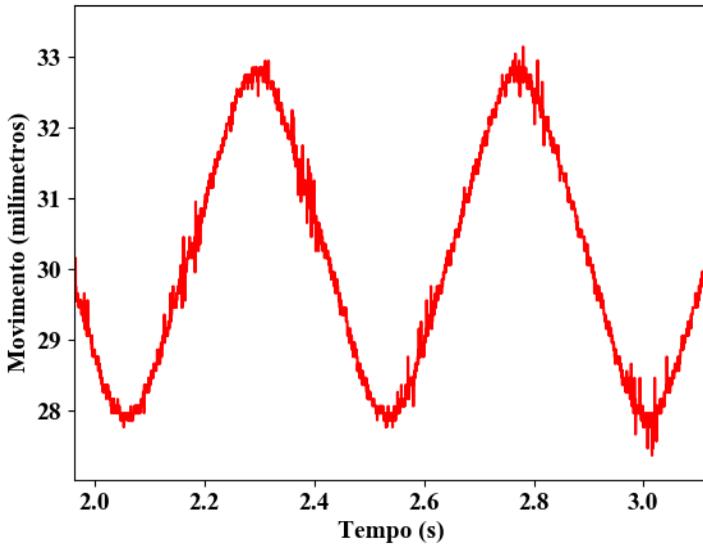
A imagem mostra que as amplitudes de movimento estão condizentes. Os tempos de parada, entretanto, não se manifestaram de forma visível nessa figura. Uma aproximação ainda maior foi feita e é mostrada na Figura 34, onde percebe-se que o robô não executou adequadamente o tempo de parada de 40ms que havia sido programado para cada pico e vale. Atribui-se este desajuste ao tempo de parada muito curto programado, à folga do eixo Y do manipulador [29] e a algum possível erro de calibração.

Figura 33: Movimento do eixo Y do manipulador na posição plana



Fonte: O autor.

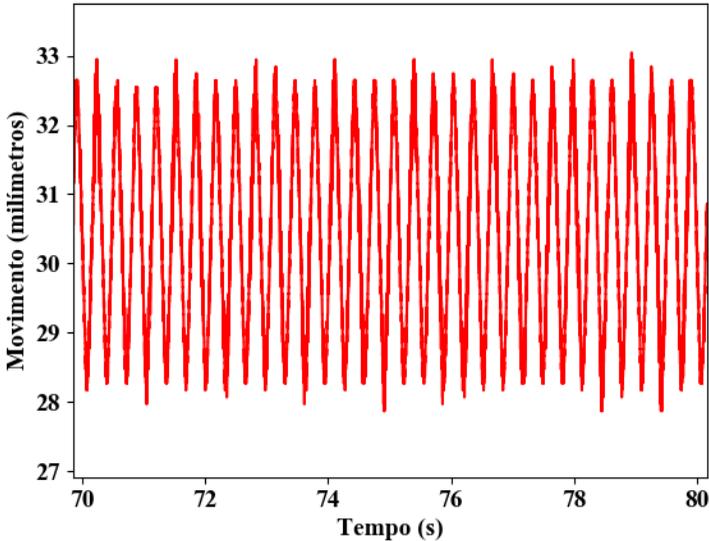
Figura 34: Detalhe do tempo de parada na posição plana



Fonte: O autor.

Para ver de forma mais detalhada as variações no movimento na posição vertical descendente, o mesmo processo foi feito, ampliando o gráfico na região desta posição, como mostra a Figura 35.

Figura 35: Movimento do manipulador na posição vertical descendente



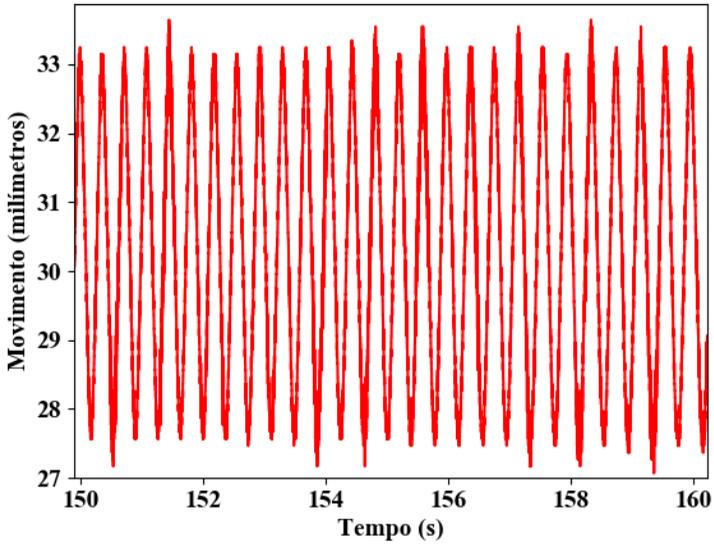
Fonte: O autor.

Uma análise visual da figura revela que houve variação de frequência em relação à Figura 33 respeitando a parametrização.

Para visualizar o movimento na posição sobre-cabeça, foi gerado o gráfico da Figura 36 que foi obtido sob a mesma metodologia dos anteriores, através da ampliação do gráfico nesta posição. A posição sobre-cabeça tem apenas variação da amplitude do movimento em relação à posição anterior, por isto, o gráfico apresenta pouca variação.

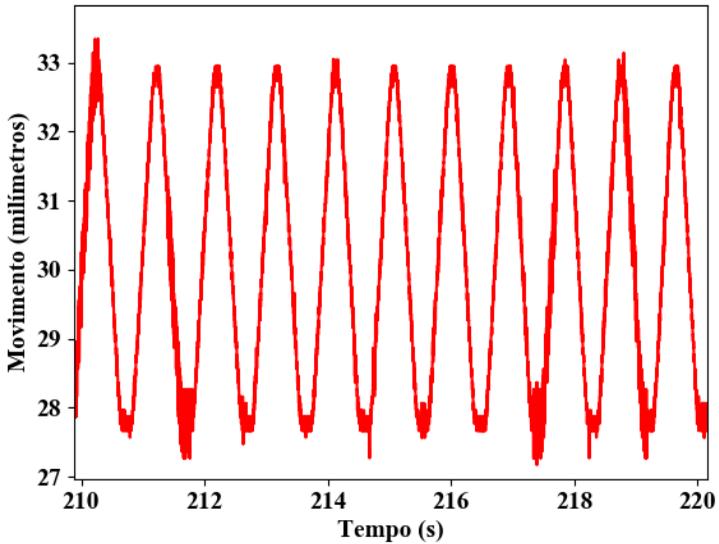
Por fim, mostra-se o padrão de movimento para a posição vertical ascendente, com a ajuda da Figura 37. Nesta posição, foram programados tempos de parada que refletem em platôs nos picos e vales da trajetória de movimento, como pode ser visto na Figura 37. Para que seja mais visível este fato, mostra-se uma imagem ampliada de um ciclo de movimento, com seus tempos de parada mostrados de forma mais expressiva na Figura 38.

Figura 36: Movimento do manipulador na posição sobre-cabeça



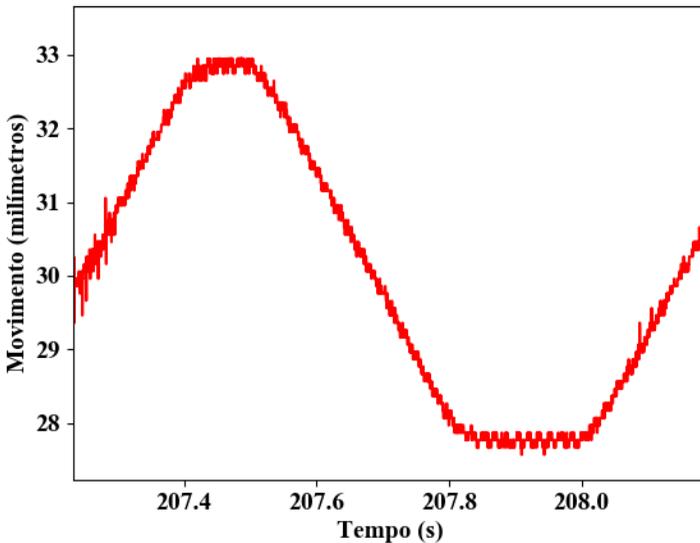
Fonte: O autor.

Figura 37: Movimento do manipulador na posição vertical ascendente



Fonte: O autor.

Figura 38: Detalhe dos tempos de parada



Fonte: O autor.

Uma análise mais detalhada dos dados foi feita mensurando a amplitude média, a frequência e os tempos de parada. A amplitude é calculada pela diferença entre a média dos picos e dos vales, a frequência é determinada pela contagem de ciclos completos em uma janela de um segundo e os tempos de parada são obtidos pela diferença de tempo entre as amostras iniciais e finais de cada platô. Estes cálculos foram feitos para as posições referência e para os pontos 45° , 135° , 225° e 315° , que são os pontos médios entre a marcação dos quadrantes. Para as posições intermediárias, a parametrização do movimento é composta por 50% de cada parâmetro adjacente.

Os resultados são mostrados nas Tabela 2 e Tabela 3, para as posições de referência e nas Tabela 4 e Tabela 5 para as posições intermediárias.

Tabela 2: Parametrização e resposta medida para as posições plana e descendente

| Parâmetro | Posição de soldagem | | | |
|------------|---------------------|--------|---------|--------|
| | PL | | VD | |
| | Comando | Medido | Comando | Medido |
| Amplitude | 5 mm | 5,1 mm | 5 mm | 4,9 mm |
| Frequência | 2 Hz | 2 Hz | 3 Hz | 3 Hz |
| TP1 | 40 ms | 0 ms | 0 ms | 0 ms |
| TP2 | 40 ms | 0 ms | 0 ms | 0 ms |

Tabela 3: Parametrização e resposta medida para as posições sobre-cabeça e ascendente

| Parâmetro | Posição de soldagem | | | |
|------------|---------------------|--------|---------|--------|
| | SC | | VA | |
| | Comando | Medido | Comando | Medido |
| Amplitude | 6 mm | 6,1 mm | 5 mm | 5 mm |
| Frequência | 3 Hz | 3 Hz | 1 Hz | 1 Hz |
| TP1 | 0 ms | 0 ms | 200 ms | 211 ms |
| TP2 | 0 ms | 0 ms | 100 ms | 94 ms |

Tabela 4: Comando gerado pelo sistema e resposta medida

| Parâmetro | Posição de soldagem | | | |
|------------|---------------------|--------|---------|--------|
| | 45° | | 135° | |
| | Comando | Medido | Comando | Medido |
| Amplitude | 5 mm | 5 mm | 5,5 mm | 5,4 mm |
| Frequência | 2,5 Hz | 2,5 Hz | 3 Hz | 3 Hz |
| TP1 | 20 ms | 0 ms | 0 ms | 0 ms |
| TP2 | 20 ms | 0 ms | 0 ms | 0 ms |

Tabela 5: Dados de movimento para inclinações indicadas

| Parâmetro | Posição de soldagem | | | |
|------------|---------------------|---------|---------|--------|
| | 225° | | 315° | |
| | Comando | Medido | Comando | Medido |
| Amplitude | 5,5 mm | 5,38 mm | 5 mm | 5,1 mm |
| Frequência | 2 Hz | 2 Hz | 1,5 Hz | 1,5 Hz |
| TP1 | 100 ms | 95 ms | 120 ms | 116 ms |
| TP2 | 50 ms | 54 ms | 70 ms | 69 ms |

Por último, sob uma metodologia diferente, a velocidade é verificada através do seu valor médio, calculada pela equação (5.1).

$$V = \frac{P [cm]}{\Delta_t [min]} [cm/min] \quad (5.1)$$

Onde o perímetro P é calculado com base no raio da circunferência descrita pelo trilho do robô.

A velocidade média esperada é obtida realizando o cálculo de uma média aritmética simples entre as velocidades para cada posição definida, deste modo, temos o que mostra (5.2).

$$\frac{50 + 40 + 50 + 40}{4} = 45 [cm/min] \quad (5.2)$$

O tempo para execução de uma revolução completa foi medido e, com ele calculada a velocidade média com a qual o robô percorreu uma rotação completa em torno do tubo de testes, que pode então ser confrontada com a velocidade média esperada, como mostra a Tabela 6.

Tabela 6: Cálculo de velocidade média em uma revolução completa

| | |
|-------------------------------------|-------|
| Raio (cm) | 66,7 |
| Perímetro (cm) | 209,5 |
| Tempo (min) | 4,4 |
| Velocidade média executada (cm/min) | 47,5 |
| Velocidade média esperada (cm/min) | 45 |

Atribui-se o pequeno desvio a erros inevitáveis no disparo do cronômetro e a erros inerentes ao sistema de transmissão. O resultado, entretanto, se mostrou coerente com o esperado.

Desta forma, se mostra que o dispositivo projetado pode ser utilizado em conjunto com o Tartílope para geração de parâmetros adaptativos de movimento com base na inclinação do plano de soldagem.

5.2 DISCUSSÕES

O sistema de medição angular desenvolvido para o Tartílope foi testado sob metodologia que comprova a eficiência dos comandos e a resposta do robô. Não foram realizados, entretanto, testes com soldagem, a fim de verificar as características metalúrgicas da solda. Este teste fica proposto para trabalhos de alunos cujo foco das pesquisas seja estudar as características metalúrgicas da soldagem.

O que se observa através deste teste é que o movimento executado pelo manipulador se mostrou muito próximo ao esperado, com a singular exceção de quando tempos de parada muito curtos são programados. Assim, mostra-se que o sistema possui condições de ser implementado. O processo de soldagem orbital é um processo lento, com velocidades da ordem de 30 cm/min, deste modo, com a frequência em que os dados são enviados ao Tartílope (25 Hz), em termos de processo, pode se afirmar que a atualização dos parâmetros se dá de forma contínua, característica importante e que leva a uma boa qualidade de soldagem.

A velocidade foi validada através de seu valor médio. A pesar de Galeazzi [29] ter proposto um método para medição de forma contínua da velocidade tangencial do robô, a velocidade média condizente encontrada mostra que os comandos foram gerados de forma correta, assim,

garantindo que o Tartílope esteja com a relação de passos correta para o trilho, a velocidade instantânea deve ser fiel à parametrizada.

6 CONCLUSÃO

Seguindo a proposta de trabalho, que ditava o norte das pesquisas, foi possível criar e testar um protótipo de sistema de medição angular aplicado na atualização de parâmetros de movimento em função da inclinação do plano de soldagem.

A sequência do trabalho mostra as tentativas e escolhas para a conclusão do primeiro protótipo, o qual foi submetido a testes que visavam validar seu funcionamento no contexto da soldagem orbital, caracterizada por ser realizada em um ambiente hostil, com elevados níveis de perturbações eletromagnéticas e altas temperaturas. A dificuldade do projeto está em fazer com que os diferentes sistemas que o compõe, trabalhem em harmonia e de forma robusta, já que falhas neste sistema podem causar perda de peças que têm elevados custos para a indústria.

O conjunto de testes realizados mostram que, mesmo em ambiente industrial, o sistema é capaz de operar com eficiência e robustez, alterando de forma correta os parâmetros de movimento no processo orbital. Uma grande vantagem do sistema é a utilização de unidades de medição inercial, que medem a posição do robô em relação ao plano de referência da Terra, característica que permite conhecer a inclinação absoluta do manipulador, que é útil quando não se pode vê-lo, como ocorre nas aplicações de soldagem interna de tubulações.

Através de pesquisas de tecnologias relacionadas aos sensores inerciais MEMS, protocolos de comunicação e interferência eletromagnética, conseguiu-se criar um sistema funcional e que atende às necessidades da soldagem orbital. Testes realizados com protótipo mostram que os resultados são sólidos e confiáveis para utilização no processo orbital.

Alguns passos futuros relacionados ao desenvolvimento seriam o reprojeto do carrinho manipulador, prevendo a necessidade de acomodar o sensor inercial. Isto envolve projeto mecânico, para adequar o espaço necessário e projeto elétrico, prevendo linhas de comunicação e alimentação dos sensores; além disso, como sugestão futura fica o uso de um protocolo de comunicação mais rápido, como o RS-485, que se mostra uma tendência na indústria e permite linhas de comunicação mais longas.

REFERÊNCIAS

- [1] FORTES, Cleber; VAZ, Cláudio Turani. **Apostila de Eletrodos Revestidos**. Brasil: Esab Br, 2005. 32 p. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901097rev_1_apostilaeletrodosrevestidos_ok.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2019.
- [2] MELLER, Ramon Natal et al. **SOLDAGEM ORBITAL MECANIZADA PARA A UNIÃO DE TUBOS NA CONSTRUÇÃO DE LINHAS DUTOVIÁRIAS**. In: RIO OIL & GAS EXPO AND CONFERENCE 2014. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Petróleo, Gás e Biocombustíveis - Ibp, 2014.
- [3] RIFFEL, Kauê Correa. **AVANÇOS TECNOLÓGICOS DO PROCESSO TIG: TÉCNICAS INOVADORAS DE ALIMENTAÇÃO DE ARAME E PROCEDIMENTOS AUTOMATIZADOS COMO CONTRIBUIÇÃO PARA A UNIÃO DE TUBOS INTERNAMENTE CLADEADOS**. 2018. 172 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.
- [4] CARVALHO, Renon Steinbach. **Robô CNC para a automação da soldagem MIG/MAG em posições e situações de extrema dificuldade**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.
- [5] DIRENE FILHO, Hellinton. **MIG/MAG CCC - AVANÇOS NA TECNOLOGIA DE CONTROLE DA TRANSFERÊNCIA METÁLICA COMO SOLUÇÃO PARA O PASSE DE RAIZ**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.
- [6] KINDERMANN, Renan Medeiros. **SOLDAGEM ORBITAL DO PASSE DE RAIZ – ALGORITMOS PARA CONTROLE ADAPTATIVO POR MEIO DE SENSORIAMENTO LASER**. 2016. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

[7] FIGUEIRÔA, Daniel Wallerstein et al. **Influência da Posição e dos Parâmetros de Soldagem na Soldagem TIG Orbital Aplicada a Tubulações de Aço Baixo Carbono**. Soldagem & Inspeção, [s.l.], v. 20, n. 4, p.446-455, dez. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si2004.11>.

[8] BIASI, Sergio Coutinho de; GATTASS, Marcelo. **Utilização de quatérnios para representação de rotações em 3D**. Rio de Janeiro: Apostila, 2002. 35 p.

[9] CARVALHO, Eduardo Morais. **Protótipo de um dispositivo para captura de movimentos dos membros superiores em tempo real usando sensores inerciais**. 2016. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Biomédica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2016.

[10] SANTOS, Michel Valmor dos. **Números Complexos, Quatérnios e Rotações Florianópolis 2012**. 2012. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Licenciatura em Matemática, Departamento de Matemática, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

[11] JAMBERSI, Andreyson Bicudo; SILVA, Samuel da. **A Sutileza dos Quatérnios no Movimento de Rotação de Corpos Rígidos**. Revista Brasileira de Ensino de Física, [s.l.], v. 38, n. 2, p.12-26, jun. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0015>.

[12] BIGOLIN, Leonardo. **SISTEMAS INERCIAIS PARA ACELEROMETRIA E USO EM MEDIÇÕES DE VCI**. 2016. 14 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016

[13] RIBAS, Renato P.. **Microsistemas Integrados (MEMS)**. In: SWART, Jacobus W. **“Oficina de Microfabricação: Projeto e Construção de CI’s MOS**. Campinas: Unicamp, 2002. Cap. 14. p. 2-25.

[14] SANDHU, Bal S.. **An Overview of MEMS Sensors**. Usa: Arm, 2015. 11 p.

- [15] YAZDI, N.; AYAZI, F.; NAJAFI, K. **Micromachined Inertial Sensors**. Proceedings of the IEEE, vol.89, nº8, 08 agosto de 1998.
- [16] MORI, Anderson Moraes. **Uso de sistema inercial para apoiar navegação autônoma**. 2013. 180 f. Dissertação (Mestrado) – Área de concentração: Engenharia de Transportes, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.
- [17] SOUZA, Stefanie von Randow de; MACHADO, Álvaro Muriel Lima. CALIBRAÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS EM ACELERÔMETROS MEMS. **Boletim de Ciências Geodésicas**, [s.l.], v. 22, n. 4, p.835-850, dez. 2016. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1982-21702016000400048>.
- [18] MORAES, Raimés. **Introdução ao Microcontrolador 8051**. Florianópolis: Notas de Aula, 2014. 76 p.
- [19] CIRCUIT BASICS (Usa). **Basics of UART Communication**. Disponível em: <<http://www.circuitbasics.com/basics-uart-communication/>>. Acesso em: 01 maio 2019.
- [20] CODREY (Usa). **UART Communication Protocol – How it works?** 2018. Disponível em: <<https://www.codrey.com/embedded-systems/uart-serial-communication-rs232/>>. Acesso em: 01 maio 2019.
- [21] **Interface Circuits for TIA/EIA - 232F: Design Notes**. Dallas: Texas Instruments, 2002.
- [22] KUGELSTADT, Thomas. **The RS-485 Design Guide**. Dallas: Texas Instruments, 2016.
- [23] CAMARA, R. C. Pantaleão. **Barramento e protocolo I²C**. Universidade Federal do Vale do São Francisco. Notas de aula, 2017.
- [24] TEXAS INSTRUMENTS (Usa). **TMS320x280x, 2801x, 2804x Inter-Integrated Circuit (I2C) Module Reference Guide**. Dallas: Texas Instruments, 2011. 40 p
- [25] LIZ, Muriel Bittencourt de. **CONTRIBUIÇÃO PARA A REDUÇÃO DA INTERFERÊNCIA ELETROMAGNÉTICA EM FONTES CHAVEADAS**. 2003. 89 f. Tese (Doutorado) - Curso de

Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

[26] MENEZES, Phillipe Oliveira. **Análise da eficácia de blindagem de materiais condutores, ferromagnéticos e compostos de grafite.** 2016. 46 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, Mg, 2016.

[27] Sistemas e Processos de Soldagem – SPS. **Tartilope V4 Manual de operação.** Florianópolis, 2016.

[28] CONSTANDINOU, Timothy G.. **Tudo Sobre Motores de Passo.** Santa Maria: Ufsm, 2005. 5 p.

[29] GALEAZZI, Daniel. **SOLDAGEM MIG/MAG ORBITAL COM SENSORIAMENTO LASER: ANÁLISE E MELHORIAS DE CONDIÇÕES OPERACIONAIS PARA AUMENTO DA CONFIABILIDADE.** 2019. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019.

[30] INVENSENSE. **MPU-6000 and MPU-6050 Register Map and Descriptions Revision 4.2.** Borregas Ave, CA, U.S.A: 2013.

[31] TEXAS INSTRUMENTS (Usa). **MAX3232 3-V to 5.5-V Multichannel RS-232 Line Driver/Receiver With ±15-kV ESD Protection.** Dallas, Texas: Texas Instruments, 2011. 40 p