

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

Rafael Polezi Lucas

**SISTEMA DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS EM  
MANIPULADOR CARTESIANO PARA APLICAÇÕES EM  
SOLDAGEM NAVAL**

Dissertação submetida ao Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica da Universidade Federal de  
Santa Catarina para a obtenção do  
Grau de Mestre em Engenharia  
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra  
Co-orientador: Prof. Dr. Nelso Gauze  
Bonacorso

Florianópolis

2011

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da  
Universidade Federal de Santa Catarina

L933s Lucas, Rafael Polezi

Sistema de geração de trajetórias em manipulador cartesiano para aplicações em soldagem naval [dissertação] / Rafael Polezi Lucas ; orientador ; Jair Carlos Dutra. -

Florianópolis, SC, 2011.

113 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia mecânica. 2. Navios - Soldagem. 3. Manipuladores (Mecanismo). I. Dutra, Jair Carlos. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU 621

Rafael Polezi Lucas

**SISTEMA DE GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS EM  
MANIPULADOR CARTESIANO PARA APLICAÇÕES EM  
SOLDAGEM NAVAL**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 21 de dezembro de 2011.

---

Prof. Julio Cesar Passos, Dr.  
Coordenador do Curso  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.  
Orientador  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr.  
Co-Orientador  
Instituto Federal de Educação Tecnológica

**Banca Examinadora:**

---

Prof., Dr. Armando Albertazzi Gonçalves Júnior,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Prof., Dr. Edson Roberto De Pieri,  
Universidade Federal de Santa Catarina

---

Dr. Raul Gohr Júnior,  
IMC Soldagem



A minha mãe Cristina (in memoriam) por toda sua luta e sabedoria,  
E ao meu pai Lucas e irmão Gabriel



## AGRADECIMENTOS

Ao meu mestre e co-orientador, Prof. Nelso Gauze Bonocorso, pelos conhecimentos transmitidos desde minha graduação, pela grande colaboração e dedicação nesta tese e os conselhos durante este mestrado.

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação e oportunidade de fazer parte da equipe do LABSOLDA.

A Raul Gohr Júnior pelos conhecimentos transmitidos e pela grande visão e conhecimento sobre o desenvolvimento de sistemas eletrônicos e os conselhos.

Ao amigo Paulo Palomino pelo companheirismo e pelos conselhos.

A Miguel Mannes Hillesheim, Tiago Peixoto, Renato Rosseti, Alexandre Blum Weingartner, Paulo Roberto Pereira, Julio Pavei Furlanetto, Fernando Costenaro, Renon Steinbach Carvalho, Eduardo Bidese Puhl, Cleber Guedes e Cleber Marques que atuaram e ajudaram no desenvolvimento deste trabalho.

A Giovanna Nascimento Corrêia, Tahiriny Ghizoni Kafka, Henrique Martinello Savi e Alair José da Silva Junior pela grande oportunidade de orienta-los.

A Jônathas Alexandre Alves, Miguel Guayasamin, Marcelo Pompermaier Okuyama, Fabio Renato Michelin, Felipe Kalil Mendonça, Diego Erdmann dos Santos, Erwin Werner Teichmann, João Facco de Andrade, Alessandro Okagawa Falleiros, Ramon Natal Meller, Hellinton Direne Filho, Pedro Bruciapaglia e Marcus Barnetche pela grande amizade.

A toda equipe do LABSOLDA, em especial a Marcia Paula Thiel.

Aos professores Armando Albertazzi Gonçalves Júnior e Edson Roberto De Pieri por aceitar o convite de avaliar este projeto de mestrado.

A Universidade Federal de Santa Catarina e ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Ao CNPQ, pela bolsa de pesquisa e apoio financeiro para viagens.

A minha família por todo o apoio e ajuda durante esta caminhada, principalmente ao meu pai pelo grande exemplo de dedicação.

E aos meus queridos amigos da equipe Canela Pro Adventure, pelo despertar para o esporte e as várias aventuras.



“A maioria das pessoas escolhem o caminho fácil, o caminho de menor resistência. Mas batalhar e sofrer são a essência de uma vida que vale a pena ser vivida. Se você não está exigindo de você algo além da zona de acomodação, expandindo e aprendendo à medida que avança, está escolhendo uma existência sem sentido. Está negando a você mesmo uma viagem extraordinária.”

(Dean Karnazes)



## RESUMO

Este trabalho trata do desenvolvimento de um sistema de controle aplicado em manipuladores do tipo cartesiano para geração e correção de trajetórias de soldagem. O referido sistema foi inicialmente configurado para aplicações típicas de soldagem naval com o manipulador de dois graus de liberdade denominado Tartilope V2F. Este equipamento é constituído por dois eixos prismáticos e ortogonais. O eixo Y é responsável pelo seguimento da junta e o movimento de tecimento transversal do cordão de solda enquanto que o eixo X é um trilho flexível que se molda a superfícies curvas, viabilizando assim a soldagem de juntas de costados, blocos e painéis de navios. Este desenvolvimento tem como diferencial o *hardware* e um *software* estruturado em linguagem C++ com orientação a objeto que facilita a criação de novas funcionalidades ao Tartilope V2F e a adaptação a outros manipuladores cartesianos com mais graus de liberdade. O sistema de controle desenvolvido para o Tartilope V2F é composto pelos módulos: interface do usuário, suporte à soldagem, geração dos comandos de movimento, acionamento dos eixos, entradas analógicas usadas para receber os sinais de sensores de correção automática da trajetória e o de entradas e saídas digitais para sincronismo com equipamentos periféricos. A interface do usuário é de fácil uso possibilitando a programação das trajetórias de soldagem com vários passes e trechos filetados com tecimento do tipo trapezoidal via uma tela sensível ao toque. Este módulo conta ainda com a possibilidade de correção de todos os parâmetros da trajetória durante a soldagem. Em vista da fragilidade da tela sensível ao toque, foi desenvolvido o módulo de suporte a soldagem que é um dispositivo portátil resistente aos respingos de soldagem. Esse dispositivo permite o operador posicionar a tocha, carregar programas da interface do usuário para execução e realizar também correções de todos os parâmetros da trajetória durante a soldagem. O módulo de geração dos comandos de movimento gera os sinais de direção e passo de cada eixo e os envia para os respectivos *drivers* de acionamento dos motores de acordo com a trajetória programada ou corrigida. O microcontrolador LPC2148 deste módulo é também responsável por gerenciar o módulo de entradas analógicas e o de entradas e saídas digitais. O módulo de acionamento dos eixos do Tartilope V2F foi substituído em função da necessidade de ampliação da faixa de velocidade de posicionamento e da própria tocha de soldagem. Em ambos os eixos foram usados o conjunto otimizado de

acionamento: *driver* bipolar em corrente com tecnologia DSP com seu respectivo motor de passo de alto torque. Por fim para validar o sistema foram realizados ensaios em laboratório, num primeiro momento focando as funcionalidades e desempenho e no segundo momento simulando a sua aplicação na soldagem do costado de uma embarcação. Excelentes resultados de soldagem e de integração entre operador e manipulador foram obtidos em ambos os momentos.

Palavras-chave: correção de trajetória, manipulador cartesiano, soldagem naval, tecimento transversal, trajetórias de soldagem.

## ABSTRACT

This research deals with the development of a system control applied in cartesian manipulators for trajectory generation and correction of welding. The system was initially configured for typical applications in naval welding with manipulator in two degrees of freedom called Tartilope V2F. This equipment is constituted by two axes: orthogonal and prismatic. The Y axis is responsible for following the joint and the transversal weaving movement of the weld bead, while the X axis is a flexible rail which molds itself to curved surfaces, enabling the welding of broadsides joints, blocks and panels of ships. This development has as differentials the hardware and a software structured in C++ language with object orientation that facilitates the creation of new functionality to Tartilope V2F and the adaptation of other cartesian manipulators with more degrees of freedom. The control system developed for Tartilope V2F is composed by the following modules: user interface, welding support, generation of motion commands, activation in the axis, analogical input used for receiving the signals from trajectory automatic correction the trajectory sensors and digital input and output for synchronizing with peripheral equipment. The user interface is easy to use, allowing the programming of welding trajectories with multiple passes and filleted excerpts with trapezoidal weaving type via touch screen display. This module also counts with the possibility of correcting all trajectory parameters during welding. Due to the fragility of touch screen display, a welding support module, which is a portable device resistant to welding spatter was developed. Such device allows the operator to position the torch, load user interface programs for execution, and also perform corrections in all trajectory parameters the during welding. The module motion command generation generates step and direction signals for each axis and sends for the respective drivers the activation of motors according to the programmed or corrected trajectory. The LPC2148 microcontroller this module is also responsible for managing the module analogical input and the digital input and output. The module activation in the axis of Tartilope V2F was substituted due to need for expanding the range velocity in positioning and also the welding torch. In both axes an optimized activation pack was used: a bipolar driver in current with DSP technology with its respective high-torque step motor. Finally, laboratory experiments were performing for validating the system, initially focusing on features and performance, and later simulating its application in welding vessel

broadships. Excellent welding results and the integration between operator and manipulator have been obtained in both stages.

Keywords: trajectory correction, cartesian manipulator, naval welding, transversal weaving, welding trajectory.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1- Terceiro navio petroleiro entregue à Transpetro com 183 metros de comprimento e 48,3 mil toneladas de capacidade [6] .....            | 24 |
| Figura 2-Método de fabricação por blocos [7].....                                                                                               | 25 |
| Figura 3-Linha automática para a fabricação de painéis [4] .....                                                                                | 26 |
| Figura 4-Complexidade da montagem de um bloco .....                                                                                             | 27 |
| Figura 5-Edificação de uma embarcação .....                                                                                                     | 28 |
| Figura 6 - Aplicação de manipuladores de soldagem [4].....                                                                                      | 30 |
| Figura 7 - Tartilope V2F montado sobre uma superfície curva [12].....                                                                           | 31 |
| Figura 8 - Diagrama global de um sistema automático de soldagem [13] .....                                                                      | 33 |
| Figura 9 - Diagrama global de um manipulador de soldagem .....                                                                                  | 34 |
| Figura 10 - Principais tipos de tecimento transversal da tocha de soldagem. Em A o triangular, em B o trapezoidal e em C o retangular [15]..... | 35 |
| Figura 11 - Soldagem na indústria naval .....                                                                                                   | 36 |
| Figura 12 - Robô na indústria naval [16].....                                                                                                   | 37 |
| Figura 13 - Manipulador de soldagem ESAB de dois graus de liberdade [17].                                                                       | 38 |
| Figura 14 - Soldagem de costado. Em A o detalhe da junta e em B os cordões de solda. ....                                                       | 39 |
| Figura 15 - Soldagem automatizada de costado [18] .....                                                                                         | 40 |
| Figura 16 - Soldagem mecanizada com correção manual [18] .....                                                                                  | 41 |
| Figura 17 - Uso do sinal de corrente para encontrar o centro da junta [13] .....                                                                | 43 |
| Figura 18 - Sistema de seguimento de junta laser .....                                                                                          | 44 |
| Figura 19 - Em A o sistema de controle em malha fechada de posição e em B o sistema em malha aberta.....                                        | 47 |
| Figura 20 - Tecimento empregados na fabricação naval e sua caracterização da velocidade no espaço das juntas .....                              | 48 |
| Figura 21 - Perfil de velocidade trapezoidal [24].....                                                                                          | 49 |
| Figura 22 - Diagrama de blocos do novo sistema de controle do Tartilope V2F .....                                                               | 52 |
| Figura 23 - Digrama funcional da integração do manipulador com a fonte de soldagem.....                                                         | 54 |
| Figura 24 - Concepção funcional do sistema de controle do manipulador .....                                                                     | 57 |
| Figura 25 - Protótipo da placa eletrônica de controle do manipulador: em A a face superior e em B a face inferior .....                         | 58 |
| Figura 26 - Face superior da placa eletrônica de controle do manipulador.....                                                                   | 59 |
| Figura 27 - Diagrama de blocos entradas analógicas.....                                                                                         | 60 |
| Figura 28 - Kit de desenvolvimento MCB2140 [25] .....                                                                                           | 61 |
| Figura 29 - Estrutura do software de controle do movimento.....                                                                                 | 62 |
| Figura 30 - Métodos da classe tecimento.....                                                                                                    | 63 |
| Figura 31 - Fluxograma executa movimento .....                                                                                                  | 64 |
| Figura 32 - Tecimento trapezoidal da tocha de soldagem.....                                                                                     | 65 |
| Figura 33 - Em A o perfil trapezoidal de velocidade da junta em B o perfil retangular .....                                                     | 67 |

|                                                                                                                                  |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 34 - Protocolo de Comunicação IHM-ARM, em A a estrutura do protocolo e em B os dados utilizados na comunicação .....      | 71  |
| Figura 35 - Fluxograma da interface do usuário .....                                                                             | 72  |
| Figura 36 - Diagrama de classes da interface do usuário .....                                                                    | 73  |
| Figura 37 - Tela inicial .....                                                                                                   | 75  |
| Figura 38 - Tela de configuração das trajetórias .....                                                                           | 76  |
| Figura 39 - Tela executar trajetória .....                                                                                       | 78  |
| Figura 40 - Placa mãe modelo PCM-9562 [29] .....                                                                                 | 79  |
| Figura 41 - Monitor sensível ao toque modelo XENARC 700TSV [31] .....                                                            | 81  |
| Figura 42 - Design sistema de suporte a soldagem .....                                                                           | 82  |
| Figura 43 - Diagrama de blocos hardware sistema de suporte a soldagem .....                                                      | 83  |
| Figura 44 - Placa eletrônica do módulo de suporte a soldagem. Em (a) a frente e em (b) o verso .....                             | 84  |
| Figura 45 - Diagrama de Blocos Suporte a Soldagem .....                                                                          | 85  |
| Figura 46 - <i>Drivers</i> motor de passo; em A o Antigo <i>driver</i> Tartílope V2F [10] e em B o <i>driver</i> STR8 [32] ..... | 87  |
| Figura 47 - Curva torque x velocidade do motor HT23. Em A com tensão de 24 V e em B com 48 V [32] .....                          | 88  |
| Figura 48 – Circuitos elétricos. Em A o de alimentação e em B o de intertravamento .....                                         | 89  |
| Figura 49 - Primeira unidade de controle do manipulador .....                                                                    | 90  |
| Figura 50 - Lado direito do painel eletroeletrônico de controle e acionamento do Tartílope V2F .....                             | 91  |
| Figura 51 – Lado esquerdo do painel eletroeletrônico de controle e acionamento do Tartílope V2F .....                            | 92  |
| Figura 52 - Equipamentos da bancada de simulação da soldagem naval .....                                                         | 93  |
| Figura 53 - Cordão de solda realizado com alta velocidade de tecimento .....                                                     | 95  |
| Figura 54 - Programação por trechos, em A 13,0 mm de amplitude e em B 9,0 mm .....                                               | 95  |
| Figura 55 - Programação por trechos, em A 4,5 Hz de frequência e em B 1 Hz .....                                                 | 96  |
| Figura 56 - Correção da linha de simetria do tecimento .....                                                                     | 97  |
| Figura 57 - Correção na velocidade de soldagem .....                                                                             | 97  |
| Figura 58 - Geometria da junta em V .....                                                                                        | 98  |
| Figura 59 - Soldagem da junta da figura 58 com o Tartílope V2F .....                                                             | 99  |
| Figura 60 - Resultado da soldagem de passes da junta da figura 58 .....                                                          | 100 |
| Figura 61 - Tartílope V2 .....                                                                                                   | 109 |
| Figura 62 - Diagrama de Blocos Tartílope V2F .....                                                                               | 111 |
| Figura 63 - Placa de Controle PC104 .....                                                                                        | 112 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Principais especificações dos eixos do Tartilope V2F .....       | 51 |
| Tabela 2- Números de pinos usados em cada funcionalidades específica .....  | 56 |
| Tabela 3 - Parâmetros de entrada de cada eixo do Tartilope V2F.....         | 68 |
| Tabela 4 - Parâmetros de movimento para soldagem da junta da figura 58..... | 99 |



## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIMBOLOGIAS**

CNC – Controle numérico computadorizado  
UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina  
LABSOLDA – Laboratório de soldagem  
FINEP– Financiadora de Estudos e Projetos  
IHM – Interface Homem-Máquina  
MIG/MAG – Metal Inert Gas / Metal Active Gas  
CCD – Charge coupled device  
CMOS – complementary metal oxide semiconductor  
PC – Computador pessoal  
USB – Universal serial bus  
CPU – Unidade central de processamento  
CI– Circuito integrado  
PC104 – Computador embedded  
ARM - Advanced RISC Machine  
HID - Human Interface Device  
E/S – Entrada/Saída  
A/D – Analógico para digital  
D/A– Digital para analógico  
PWM – Modulação por largura de pulso  
UART – Universal asynchronous receiver/transmitter  
SPI – Serial peripheral interface bus  
BIOS – Sistema básico de entrada/saída  
RISC – Computador com um conjunto reduzido de instruções  
I<sup>2</sup>C – Circuito Inter-integrado  
DSP – Digital signal processor  
JTAG – Joint test action group



## SUMÁRIO

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO</b>                                       | <b>23</b> |
| 1.1 FABRICAÇÃO NAVAL                                      | 24        |
| 1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES                             | 31        |
| 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO                                    | 32        |
| <b>2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                            | <b>33</b> |
| 2.1 TIPOS DE TRAJETÓRIA DE SOLDAGEM                       | 34        |
| 2.2 ROBÔS VERSUS MANIPULADORES DE SOLDAGEM                | 36        |
| 2.3 CORREÇÃO EM TRAJETÓRIAS DE SOLDAGEM                   | 40        |
| 2.4 CONTROLE DE MOVIMENTO DE MANIPULADORES                | 45        |
| 2.5 GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS                                | 47        |
| <b>3 SISTEMA DE CONTROLE DO MANIPULADOR</b>               | <b>51</b> |
| 3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA DE CONTROLE                    | 51        |
| 3.2 GERADOR DOS COMANDOS DE MOVIMENTO                     | 54        |
| 3.2.1 Seleção da CPU do Gerador dos Comandos de Movimento | 55        |
| 3.2.2 <i>Hardware</i> desenvolvido                        | 56        |
| 3.2.3 <i>Software</i> de controle do manipulador          | 60        |
| 3.2.4 Geração das Trajetórias de soldagem                 | 65        |
| 3.2.5 Protocolo de Comunicação USB                        | 70        |
| 3.3 INTERFACE COM O USUÁRIO                               | 71        |
| 3.3.1 Estrutura do <i>software</i>                        | 72        |
| 3.3.2 Telas                                               | 73        |
| 3.3.3 <i>Hardware</i> Interface                           | 78        |
| 3.4 SISTEMA DE SUPORTE A SOLDAGEM                         | 81        |
| 3.4.1 <i>Hardware</i> sistema suporte a soldagem          | 81        |
| 3.5 ACIONAMENTO DE MOTORES                                | 86        |
| 3.6 UNIDADE DE CONTROLE DO MANIPULADOR                    | 89        |
| <b>4 RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>                          | <b>93</b> |
| 4.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA                                  | 93        |
| 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS                                | 94        |

|                                                            |            |
|------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4.2.1 Soldagem com alta velocidade de tecimento</b>     | <b>94</b>  |
| <b>4.2.2 Soldagem por trecho e capacidade de correção</b>  | <b>95</b>  |
| <b>4.2.3 Soldagem por passes</b>                           | <b>98</b>  |
| <b>5 CONCLUSÕES</b>                                        | <b>101</b> |
| <b>6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>                  | <b>103</b> |
| <b>REFERÊNCIAS</b>                                         | <b>105</b> |
| <b>APÊNDICE A – Histórico do Manipulador Tartílope V2F</b> | <b>109</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria de construção naval é bastante antiga no Brasil, vindo dos remotos tempos coloniais [1]. O setor foi crescendo e em constante modernização até o final da década de 70, quando a indústria naval brasileira atingiu seu ápice e chegou a ser a 2ª no mundo, somente atrás do Japão [2].

A partir da década de 80, a situação mudou e iniciou-se uma gradativa diminuição da produção nacional. O setor a nível mundial passou por uma fase difícil fomentado pelas crises internacionais do petróleo. Esta crise motivou o estabelecimento de novas rotas e a emergência dos estaleiros asiáticos, com custos de produção altamente subsidiados, tornando os preços muito mais atraentes. No que se refere aos fatores internos, a situação econômica crítica pela qual passou o país atingiu de maneira significativa as grandes empresas estatais, inviabilizando encomendas em maior escala [3].

Em 1990, com a abertura do mercado de navegação expôs os estaleiros brasileiros à concorrência internacional, deixando claro que as políticas de incentivo ao setor não foram associadas em investimento de capacitação tecnológica, produtiva e gerencial. Por falta de apoio financeiro a indústria naval brasileira deixou de construir navios e perdeu a competitividade de outrora. Atualmente a indústria naval mundial é dominada pela Coreia do Sul, China e Japão, países que possuem estaleiros com vastas linhas de montagem, atuando na produção de navios petroleiros, graneleiros e porta-contentores [4].

A liderança mundial asiática no setor de construção naval é fruto de forte investimento na automação, principalmente na Coreia do Sul e Japão. A automação dos estaleiros garante rapidez na produção, repetibilidade e qualidade. As facilidades neles encontrados juntamente com a modernização dos processos de fabricação, através da logística e do sistema *just-in-time* contribuíram muito para a redução dos custos de produção e do prazo de entrega de uma embarcação. Esses fatores determinantes tornaram os estaleiros coreanos referências mundiais e os mais competitivos [5].

A expansão recente da indústria petrolífera, principalmente pela descoberta da camada de exploração do pré-sal em águas marítimas, acabou por reativar a indústria de construção naval do Brasil que se encontrava em crise nas duas últimas décadas. A Petrobrás tem um importante papel no ressurgimento da indústria naval nacional quando encomendou uma série de embarcações e plataformas exploratórias no

país com índice de nacionalização da ordem de 65 %, gerando assim empregos, tecnologia e renda.

Em 2010 foram entregues a Transpetro, que é subsidiária da Petrobrás, três navios petroleiros. Esse fato histórico é considerado um marco, visto que nunca se produziu no Brasil navios deste porte, figura 1.



Figura 1- Terceiro navio petroleiro entregue à Transpetro com 183 metros de comprimento e 48,3 mil toneladas de capacidade [6]

## 1.1 FABRICAÇÃO NAVAL

Navios ou mesmo plataformas semi-submersíveis são construídos pelo método de produção por blocos conforme mostra a figura 2. Esse método é constituído por cinco etapas, que são: tratamento anti-corrosivo das chapas e pintura, processamento onde as peças são cortadas e identificadas, sub-montagem onde as peças são unidas formando sub-blocos, montagem onde são feitos os blocos propriamente ditos e edificação onde é realizado o posicionamento e união dos blocos.

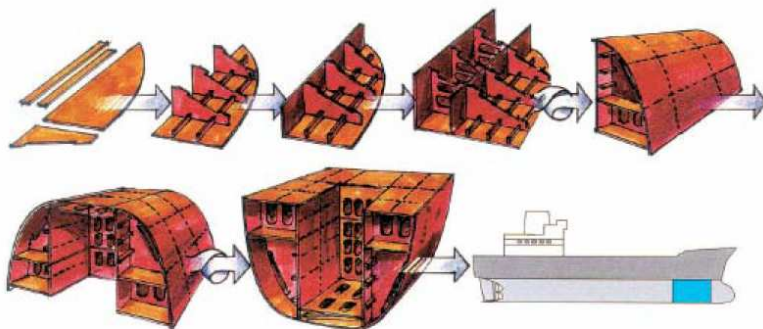


Figura 2-Método de fabricação por blocos [7]

O primeiro processo de transformação é o de processamento, onde as chapas são separadas e levadas para as estações de corte, para que sejam cortadas nos perfis necessários para a montagem dos sub-blocos. As principais tecnologias de corte utilizadas são o oxicorte, plasma e mais recentemente o laser. Essas operações de corte são geralmente realizadas de forma automatizada em máquinas do tipo CNC com a obtenção de ótimos resultados dimensionais.

A próxima etapa de transformação compreende a sub-montagem, onde são montadas pequenas estruturas que depois unidas irão compor os blocos [8]. Um produto desta etapa são os painéis enrijecidos que são considerados intermediários, ou seja, componentes com características de projeto e construção bastante similares, podendo deste modo aproveitar as vantagens de uma fabricação em série, como pode ser visualizado na figura 3. Em sua grande maioria estes painéis são feitos de forma automatizada por proporcionar alta velocidade de soldagem e com isto menor imposição de calor e minimização das deformações.



Figura 3-Linha automática para a fabricação de painéis [4]

A partir dos painéis são montados os sub-blocos que são partes de um bloco, que é uma estrutura completa de uma parte do navio. Nestas etapas o processo de soldagem a arco elétrico é o mais empregado, mas em sua grande maioria de forma manual, principalmente em função das diferentes posições de soldagem, das tarefas não padronizadas e pela dificuldade de acessibilidade, conforme pode ser visto na figura 4. Cabe salientar que se os painéis e sub-blocos apresentarem altos níveis de distorções dimensionais, as montagens dos respectivos blocos serão feitas de forma irregular. Esse problema gera atrasos devido à necessidade de correções e, também, devido a complexidade de montagem das estruturas envolvidas [7].



Figura 4-Complexidade da montagem de um bloco

A última etapa é a edificação que envolve o alinhamento e união dos blocos que compõem a estrutura do navio. Esta é a etapa mais crítica de montagem, pois envolve a movimentação de grandes blocos conforme mostra a figura 5. Essa operação é complexa e os desvios dimensionais das estruturas produzidas nas etapas anteriores devem ser menores que as tolerâncias admitidas pelo projeto para que aconteça uma correta união dos blocos. Essas uniões de blocos abrangem o alinhamento do casco, reforços transversais e longitudinais, decks, divisórias, vigas e tubulações.



Figura 5-Edificação de uma embarcação

A correção de elementos estruturais com altos níveis de desvios dimensionais é um dos processos que mais consomem tempo de produção. Estima-se que o processo de correção envolvido com as distorções de fabricação consuma 30 % do trabalho total. Esse problema pode-se tornar ainda mais crítico, por que os projetos atuais de construção naval e *offshore* têm buscado cada vez mais a redução de peso, a fim de melhorar a dirigibilidade, desempenho e economia de combustível. Essas medidas apenas são possíveis com a utilização de materiais mais resistentes e de menor espessura. Porém, essa tendência de redução da espessura torna ainda mais significativa a influência do calor nas alterações dimensionais e nas tensões residuais na estrutura [4,7].

Uma solução natural para essa problemática é o investimento em automação da soldagem para aumentar a qualidade e diminuir o tempo de produção. Com a utilização de sistemas mecanizados ou automatizados, além de se conseguir uma maior repetitividade, é possível atingir velocidades de soldagem maiores e consequentemente uma menor imposição de calor e menores índices de distorções. Além disso, a produção obtida com esses sistemas, na maioria dos casos, é superior quando comparada com a condução manual da tocha de soldagem.

A soldagem a arco elétrico é o processo de fabricação mais utilizado na construção naval, onde 70% dos estaleiros nacionais utilizam somente a soldagem manual. Isto gera dois grandes problemas no setor naval brasileiro. O primeiro é a dependência de mão-de-obra especializada de soldadores, porém há cada vez menos soldadores preparados para o mercado de trabalho. Este fato é a causa raiz do segundo problema que é a busca por qualidade e produtividade, que na real situação acaba levando a necessidade de investimento tanto na formação de soldadores e em sistemas de mecanização e de automatização da soldagem. Com a crescente demanda será necessário sanar os problemas mencionados, buscando tornar a indústria naval mais competitiva em termos de preço e qualidade com os concorrentes internacionais [9].

Na soldagem manual o soldador fica exposto diretamente à radiação emitida pelo arco, aos gases tóxicos provenientes de reações químicas, aos salpicos de gotas de metal fundido a alta temperatura. Além disso, o soldador realiza muitas tarefas como ajustar parâmetros de soldagem, controlar a qualidade do cordão de solda e guiar a pistola em posições desconfortáveis. Essas tarefas deixam o soldador fadigado rapidamente causando uma baixa produção na soldagem manual [10].

A automação dos processos de soldagem na construção naval representa um desafio não apenas para os estaleiros brasileiros, mas em todo o mundo. Os sistemas automatizados de soldagem, que se tornaram comuns na indústria automobilística, não podem ser utilizados com a mesma amplitude na indústria naval em função das diferentes posições de soldagem e das tarefas não padronizadas. Entretanto, a soldagem aparece como o processo de fabricação que mais emprega robôs e manipuladores, Figura 6. Esses equipamentos são utilizados com o objetivo de melhorar a qualidade, obter repetibilidade e agilidade nos trabalhos, além de abrir caminho para a utilização de processos de soldagem com maior produtividade [4-11].



Figura 6 - Aplicação de manipuladores de soldagem [4]

As maiores empresas atuais de construção naval são a *Hyundai Heavy Industries*, *Samsung Heavy Industries* e *Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering*, todas da Coreia do Sul. Essa conquista se deve ao grande investimento em sistemas automatizados e mecanizados que abrangem desde a construção do casco do navio, blocos e painéis de embarcações. Neste contexto, fica claro que o emprego de manipuladores de tocha vem se mostrando cada vez mais importante para obtenção de trabalhos realizados em menor tempo e maior qualidade [4-11]. Sob a ótica da soldagem, é interessante a implementação de sistemas automatizados, principalmente, por que, robôs podem realizar soldagem por longos períodos, com qualidade e eliminar as condições desfavoráveis ao soldador, uma vez que este passa a monitorar e não atuando diretamente na soldagem [10].

Fica bastante evidente a necessidade de investimento pesado para tornar a indústria naval nacional mais competitiva. Um dos meios é a automação da soldagem para se atingir tal meta, mas o Brasil carece de equipamentos oriundos de tecnologia nacional. O que inibe investimentos para o desenvolvimento e expansão do setor de soldagem, posto que equipamentos de origem estrangeira possuem elevados custos de aquisição e de manutenção, o que torna pouco atrativa a compra destes sistemas [11].

## 1.2 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

Visando contribuir para sanar tal carência nacional, o laboratório de soldagem da UFSC, LABSOLDA, desenvolveu um equipamento robusto de dois graus de liberdade, X e Y, denominado Tartilope V2F (para maiores informações ler apêndice), Figura 7. Este manipulador de tocha de solda possui um trilho flexível, eixo X, que se molda a superfícies curvas viabilizando a construção dos cascos de navios, blocos, painéis e revestimentos com praticamente todos os processos de soldagem. Apesar de possuir uma mecânica adequada e robusta seu sistema de geração de trajetórias de soldagem é limitado e possui uma interface de programação pouco amigável ao usuário nas operações de soldagem naval.

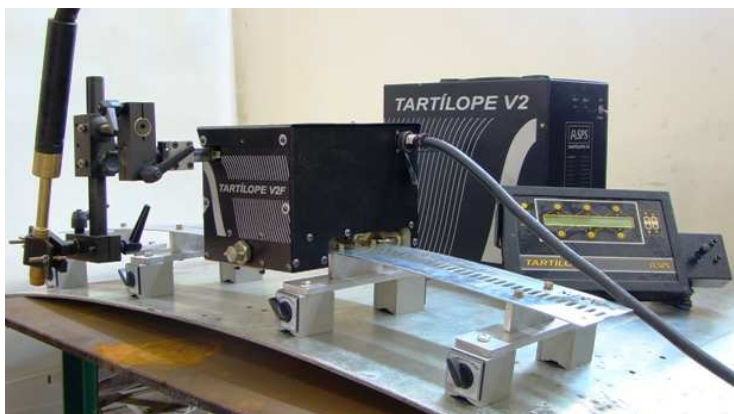


Figura 7 - Tartilope V2F montado sobre uma superfície curva [12]

Atualmente, o LABSOLDA está inserido no projeto CT-Aquaviário, financiado pelo FINEP, cujo tema é o desenvolvimento de um sistema robótico integrado para automatização da soldagem na indústria naval. O presente trabalho de dissertação está totalmente vinculado neste projeto de pesquisa e tem como objetivo geral desenvolver um sistema flexível de geração de trajetórias no manipulador cartesiano Tartilope V2F para aplicações em soldagem naval.

Para cumprir tal objetivo, faz-se necessário atingir as seguintes metas específicas:

- Desenvolver uma nova concepção de *hardware* e de *software* para cada um dos módulos do sistema de controle do manipulador: geração dos comandos de movimento, interface com o usuário, suporte a soldagem e de comunicação com periféricos;
- selecionar novos motores e *drivers* para acionamento dos eixos, de modo a se ampliar a faixa de velocidade de operação da tocha;
- desenvolver uma interface do usuário dedicada a programação de trajetórias de soldagem, com a possibilidade de programar passes, trechos e realizar correções na trajetória durante a execução;
- desenvolver um sistema de suporte para eventuais correções na trajetória pelo operador durante a realização da soldagem;
- realizar ensaios de soldagem em laboratório para validar o sistema de controle do manipulador desenvolvido.

### 1.3 ESTRUTURA DO TEXTO

O presente trabalho foi dividido em sete capítulos, sendo à introdução o primeiro.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica sobre o controle de manipuladores de soldagem com foco nas trajetórias de soldagem utilizadas na indústria naval.

No terceiro capítulo, é apresentado o desenvolvimento do projeto como um todo, abrangendo o desenvolvimento do *hardware* e *software* para a geração e correção de trajetórias para o manipulador Tartilope V2F.

O quarto capítulo descreve os testes experimentais de avaliação do sistema desenvolvido. Num primeiro momento realizando soldas testando a programação por trechos e a capacidade de correção e num segundo momento simulando a soldagem de costado de uma embarcação.

Finalizando no quinto capítulo são apresentadas as conclusões sobre o sistema desenvolvido, no sexto capítulo são apresentadas sugestões para os trabalhos futuros e no sétimo são apresentadas as referências utilizadas neste trabalho.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O sucesso de um procedimento de soldagem depende fundamentalmente da seleção adequada dos parâmetros de soldagem e da correta execução da trajetória da tocha. Por sua vez, os parâmetros de movimento nestes procedimentos, na maioria dos casos, devem ser corrigidos pelo operador em virtude dos desvios dimensionais das juntas e das deformações causadas pelo calor do arco elétrico.

Na soldagem automatizada para se ter um controle efetivo do processo se adaptando às condições reais é necessário um sistema dinâmico que movimente a tocha de soldagem e controle os parâmetros de soldagem de forma similar ao demonstrado na figura 8. Existem três fatores para que um sistema de soldagem automatizado seja tão eficaz quanto um soldador experiente:

1. Base de conhecimento;
2. Sensores e interfaces;
3. Sistema programável e flexível de controle.

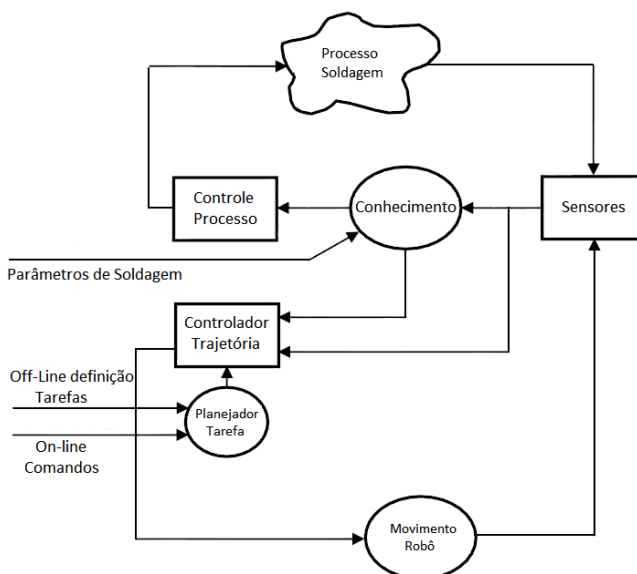


Figura 8 - Diagrama global de um sistema automático de soldagem [13]

A execução de trajetórias de um sistema automático de soldagem é constituída de maneira básica por cinco partes. A primeira

delas é o manipulador, o qual diz respeito à estrutura mecânica de deslocamento da tocha. A segunda é o controlador, que é destinado ao controle de movimento na execução da trajetória de soldagem e a comunicação com a fonte de solda. A terceira é o acionamento, com as tecnologias de motores e *drivers* para o deslocamento do manipulador. A quarta é a IHM que é responsável por realizar a interface com o usuário de programação e a correção de trajetória. Por fim, o sensor é o responsável por realimentar o estado da soldagem, de modo a prover uma correção automática da trajetória de soldagem, conforme mostra a figura 9 [11].

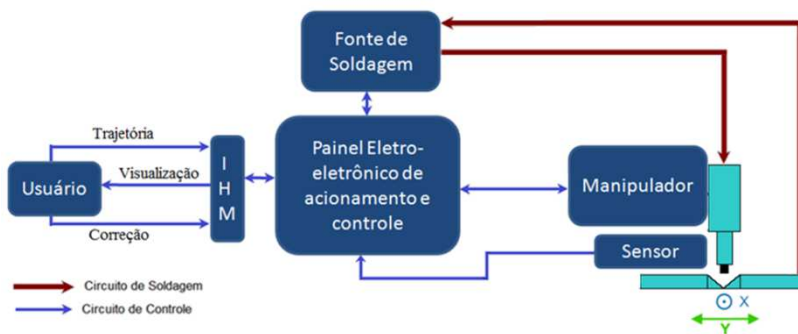


Figura 9 - Diagrama global de um manipulador de soldagem

## 2.1 TIPOS DE TRAJETÓRIA DE SOLDAGEM

Para cada posição e geometria da junta de soldagem existe um tipo de trajetória da tocha que proporciona melhor resultado. Na posição plana com junta de topo, geralmente utiliza-se uma trajetória de soldagem sem tecimento, que corresponde ao deslocamento da tocha sobre a junta no sentido longitudinal da soldagem sem nenhum movimento transversal.

A técnica de soldagem com tecimento transversal, figura 10, é bastante aplicada em juntas com chanfro, que são bastante comuns na indústria naval. Esta técnica é caracterizada pela deposição de material com oscilação transversal da tocha sobre o chanfro, o qual permite depositar cordões mais largos e com um reduzido número de passes de solda.

As variáveis envolvidas e suas unidades usuais são [14]:

- Velocidade de soldagem (mm/s): é a velocidade de deslocamento longitudinal da tocha, ou seja, é a velocidade correspondente à do eixo X;
- Amplitude (mm): é a distância entre o pico máximo e o pico mínimo do movimento de tecimento do eixo Y;
- Frequência (Hz): é o número de ciclos de oscilação de tecimento do eixo Y por segundo;
- Tempo de parada (s): é o tempo no qual a tocha se desloca apenas no eixo X nos movimentos trapezoidal e retangular. E o tempo que a tocha fica parada no eixo X e Y no movimento triangular;
- Sentidos de partida: permitem ao usuário a escolha dos sentidos na partida da tocha, ou seja, nos sentidos positivo ou negativo dos eixos X e Y.

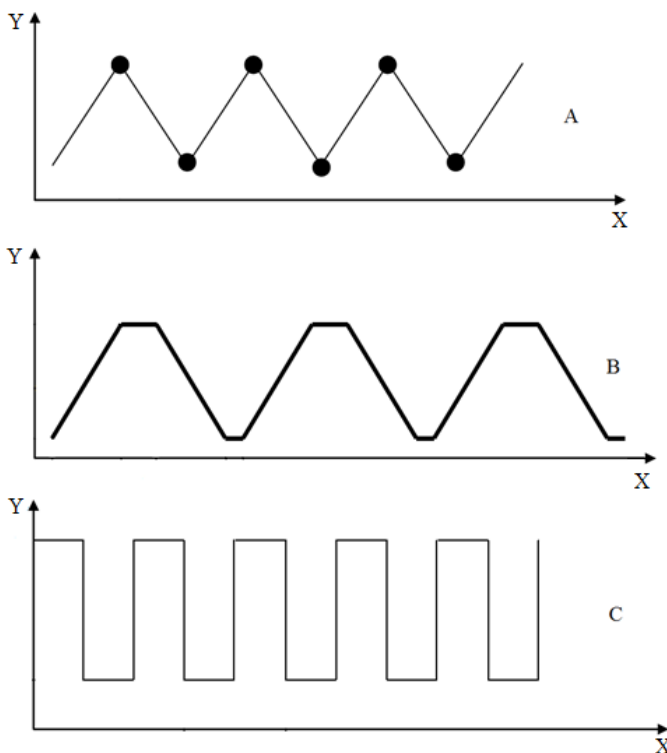


Figura 10 - Principais tipos de tecimento transversal da tocha de soldagem. Em A o triangular, em B o trapezoidal e em C o retangular [15]

## 2.2 ROBÔS VERSUS MANIPULADORES DE SOLDAGEM

A soldagem robotizada é um termo bastante abrangente e não necessariamente significa um trabalho autônomo. Esta pode ser do tipo mecanizada onde o equipamento tem a função de executar o movimento da tocha de soldagem ou da peça a ser soldada. E para garantir a qualidade e a repetibilidade da solda é necessário que um operador supervisione a soldagem e execute as correções necessárias para a realização da tarefa. Na soldagem automatizada o operador é substituído por sensores que detectam os desvios de execução da tarefa e informam ao controlador para realização das devidas correções [10].

A construção naval é bastante complexa, possuindo vários tipos de juntas a serem soldados, por exemplo, na fabricação de painéis que possuem características bastante similares, já se possui soluções automatizadas bem definidas. A grande dificuldade está na soldagem de superfícies livres, como se encontra na construção de blocos e na edificação de uma embarcação como pode-se ver na figura 11.



Figura 11 - Soldagem na indústria naval

Por essa figura percebe-se que na edificação de uma embarcação, há diferentes geometrias e posições de soldagem. Num

primeiro momento pode-se pensar na utilização de um robô antropomórfico, que executa movimentos similares ao do braço humano, tendo a facilidade de posicionamento e orientação da tocha de soldagem no espaço. Porém, neste tipo de aplicação o problema da utilização deste robô está ligado ao fato que haverá dificuldade de operação, como em ambientes confinados, ocasionando colisões durante a execução da trajetória. E outro ponto fundamental é que os robôs antropomórficos, de uma forma geral, são pesados e necessitam de grande rigidez em sua base, dificultando as operações de transporte e instalação em campo [11].

Entretanto existem soluções para a automatização da indústria naval baseadas em robôs como pode-se ver na figura 12. Neste caso foi instalado um robô FANUC sobre trilhos que são montados e desmontados manualmente e usados para transportar o robô e os cabos de alimentação pela estrutura do navio. O robô é dotado de um sistema de controle dedicado, onde são salvos vários tipos de tarefas. Aliado ao sensoriamento laser, o robô é capaz de identificar as tarefas em sua área de trabalho e selecionar programas pré-definidos para execução das respectivas soldagens.



Figura 12 - Robô na indústria naval [16]

O que se verifica na indústria naval é uma tendência à utilização de manipuladores de soldagem compactos, figura 13, visto que a maioria das operações de soldagem é realizada em campo, principalmente na etapa de edificação de uma embarcação. Os diferenciais deste tipo de robô são: robustez, facilidade de transporte e instalação [11]. Em geral são mais simples e realizam soldagem em todas as posições.



Figura 13 - Manipulador de soldagem ESAB de dois graus de liberdade [17]

Uma grande vantagem da utilização destes manipuladores é a possibilidade de utilizar o movimento de tecimento, permitindo um melhor acabamento dos cordões de solda realizados. Essa técnica é aplicada com bastante sucesso na soldagem de juntas chanfradas, figura 14-A, que são encontradas na soldagem de costado de embarcações.

Quando não se utiliza tecimento este tipo de soldagem tem uma tendência a apresentar um alto índice de problemas, sendo que os mesmos advêm da necessidade de realizar vários passes filetados, que devido a forma que são executados são mais propensos a: falhas de fusão, porosidade, trincas e outros. Isto é muito comum na soldagem MIG/MAG de união manual como pode-se perceber na figura 14-B.



Figura 14 - Soldagem de costado. Em A o detalhe da junta e em B os cordões de solda.

Outro detalhe complicado na construção naval são as posições de soldagem não usuais, tais como vertical e horizontal, impondo ao soldador um grande esforço físico, impedindo-o de utilizar uma maior velocidade e a própria realização do movimento de soldagem. Em contrapartida na soldagem automática, o movimento de tecimento permite o preenchimento da junta em um único passe ou com um número reduzido de passes, através de movimentos triangulares ou trapezoidais que cobrem toda a junta. Desta forma cordões de solda mais regulares e com melhor acabamento superficial são obtidos.

O costado de uma embarcação além de possuir regiões curvas é uma das soldas mais complicadas de se mecanizar ou automatizar, figura 15. Em função da geometria e posição deste tipo de junta o Tartilope V2F do LABSOLDA foi escolhido para ser aplicado na soldagem naval. Esta escolha advém do fato dele ser compacto, de fácil instalação e utilizar um trilho flexível que se molda as várias situações encontradas na fabricação de uma embarcação.



Figura 15 - Soldagem automatizada de costado [18]

### 2.3 CORREÇÃO EM TRAJETÓRIAS DE SOLDAGEM

A efetiva automatização da indústria naval passa pelo desenvolvimento de sistemas de correção da trajetória de soldagem. As chapas e juntas possuem imperfeições que podem surgir pelo empenamento da peça devido ao calor, mau posicionamento inicial da tocha ou mau preparo da junta que necessitam ser compensados para uma correta soldagem da junta. A visualização da trajetória percorrida pelo arco no chanfro não é muito fácil, mas de grande necessidade para se conseguir um bom cordão de solda. De fato, um inadequado seguimento da junta é uma das mais significativas fontes de problemas de qualidade na soldagem mecanizada ou automatizada [4].

Na soldagem manual o soldador ao realizar a soldagem possui sensibilidade e compensa as falhas da junta. Já nos manipuladores não existe esta sensibilidade, apenas programa-se uma trajetória ideal sem compensar as possíveis falhas de posicionamento e defeitos de fabricação na peça a ser soldada. Para compensar tais distorções na soldagem mecanizada geralmente há um operador que fica supervisionando a soldagem e realizando correções na trajetória de

forma manual, como pode-se perceber no manipulador da figura 16. Para o soldador, essas tarefas são muito mais confortáveis do que realizar a solda manualmente.



Figura 16 - Soldagem mecanizada com correção manual [18]

Além disso, na soldagem mecanizada não há necessidade que um soldador experiente opere o equipamento. Com poucas horas de treinamento adequado do operador é possível conseguir ótimos resultados. Outro detalhe conveniente é o fator de trabalho. Na soldagem manual a fadiga é grande, já na robotizada o equipamento pode operar durante horas sem folga. Concluindo, as vantagens são significativas e o investimento nesta tecnologia é uma tendência confirmada mundialmente.

Na soldagem automatizada o sistema é dotado da sensibilidade do soldador, sendo que esta é conseguida por meio de sensores que observam o processo, conforme a seguinte lógica [4]:

- O sensor mede o ambiente da soldagem e gera uma resposta aos estímulos do ambiente;
- a unidade de processamento, trata os sinais do sensor e processa os dados de modo a definir a correção necessária;

- a unidade de potência recebe os comandos necessários para alinhar ou nivelar a tocha sobre a superfície a ser soldada;

Na soldagem de costado de uma embarcação o tipo de correção mais utilizada é o de seguimento de junta que pode ser encontrado na forma automatizada com princípios de operação baseados em sensores mecânicos, acústicos, indutivos ou óticos. Entretanto o mais utilizado é o que utiliza as próprias variáveis do arco voltaico como sensor. O princípio de operação deste sistema se baseia na leitura das próprias variáveis elétricas de soldagem, corrente e tensão, para obter informações do posicionamento da tocha de soldagem em relação à junta [10,13].

Estes sistemas se baseiam na variação da tensão ou da corrente de soldagem, que surge durante o movimento de tecimento da tocha ao longo da seção transversal da junta, devido à variação da distância do bico de contato e a peça, podendo através desta técnica gerar um perfil da junta. Para o caso da soldagem com o processo MIG/MAG convencional é necessário apenas o sinal de corrente para que se obtenha o perfil da junta, como pode-se perceber na figura 17. Caso os valores da corrente sejam iguais nos extremos do movimento de tecimento, a tocha de soldagem esta centralizada na junta. Caso os valores sejam diferentes, eles indicarão que a tocha se encontra descentralizada, necessitando correção de posicionamento do eixo Y de modo a centralizar a tocha de soldagem em relação à junta [10,13].

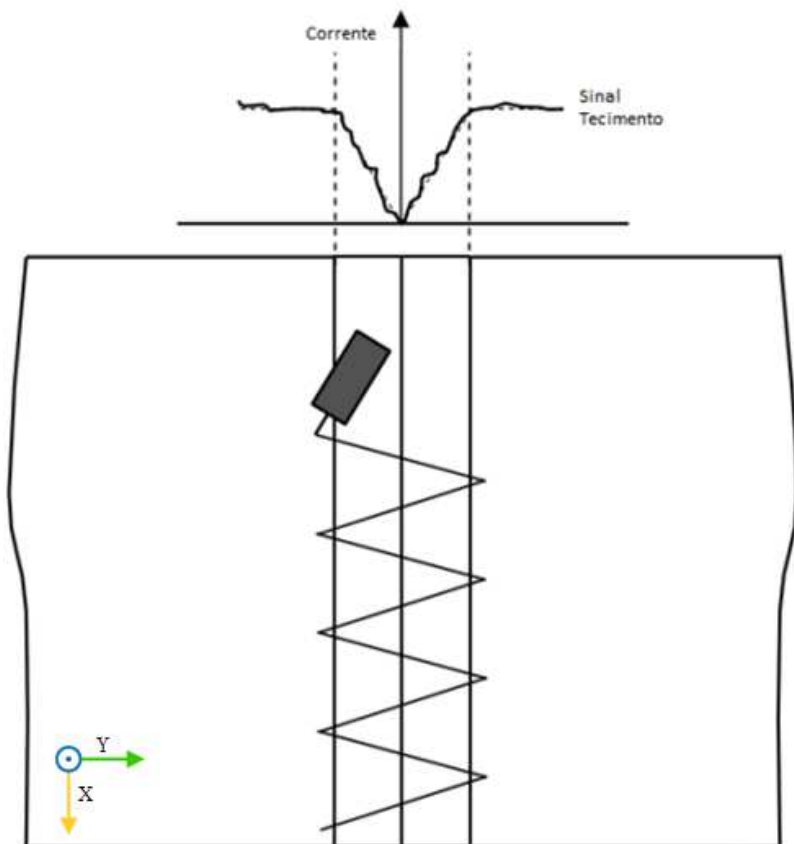


Figura 17 - Uso do sinal de corrente para encontrar o centro da junta [13]

O sensoriamento pelas variáveis do próprio arco tem como vantagem o baixo custo de aquisição e manutenção, imunidade do sensor ao ambiente de soldagem, a ausência de dispositivos acoplados à tocha e também a ausência de uma distância de offset entre o sensor e a tocha. Entretanto este sistema é lento, visto a impossibilidade de utilizar a corrente instantânea, sendo necessário utilizar a corrente média. Nas soldagens de costado de navios, no primeiro passe que é a raiz, o sistema possui uma boa leitura, em virtude da grande variação da distância bico-de-contato peça (DBCP), mas nos últimos passes onde já se tem material depositado na junta a variação da distância bico-de-contato peça é pequena, não permitindo a leitura da junta de forma precisa, logo prejudicando a correção da trajetória [10,13].

Atualmente há uma tendência a utilização de sensores baseados em sistemas de visão que permitem resultados mais precisos. Primeiramente com câmeras CCD, mas com o intuito de mapear a junta para apenas depois realizar a soldagem. Com este não há o seguimento da junta durante a soldagem, devido à saturação do CCD em função da luz gerada pelo arco e pela interferência do campo eletromagnético gerado pelo arco elétrico. O seguimento de junta de melhor performance e um dos mais utilizados é do tipo laser baseado em câmeras 3D. O funcionamento é baseado no princípio de triangulação do laser. Uma fonte de baixa potência é usada para gerar um plano de laser que é projetado sobre a superfície da junta a ser soldada. A luz refletida é captada por uma lente que alimenta o sistema de imagem composta geralmente de um CCD ou um sensor CMOS. Estes sinais são processados e permitem indicar ao sistema de controle que há necessidade de correção na trajetória de soldagem como pode-se visualizar na figura 18 [13].

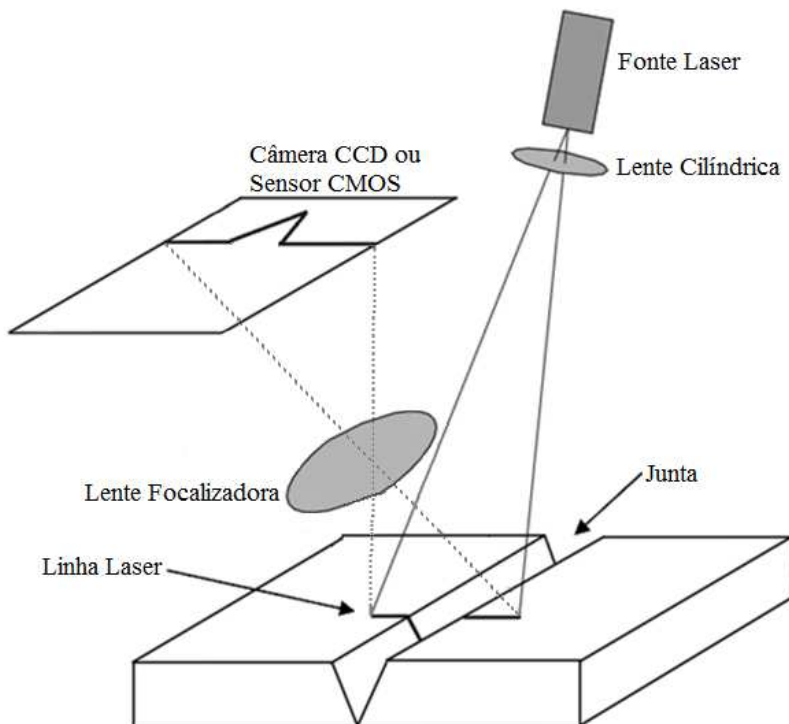


Figura 18 - Sistema de seguimento de junta laser

## 2.4 CONTROLE DE MOVIMENTO DE MANIPULADORES

Na automação da soldagem, é indispensável um controle de movimento dos eixos do manipulador que mantenha os valores regulados durante a soldagem, posto que falhas nesse módulo interferem diretamente sobre a qualidade dos cordões de solda [11]. O controlador é o componente que determina e, frequentemente, monitora o movimento de cada eixo.

Um sistema de controle de movimento em sua maioria deve ser dotado de uma série de ferramentas que devem fornecer as seguintes funcionalidades [19]:

- Capacidade de mover objetos físicos no ambiente de trabalho, ou seja, capacidade de manipulação;
- capacidade de obter informações sobre o estado do sistema e interagir com o ambiente, ou seja, capacidade sensorial;
- capacidade de explorar informações para modificar o comportamento do sistema, ou seja, capacidade de inteligência;
- capacidade de armazenamento, elaboração e fornecimento de dados sobre a atividade do sistema, ou seja, capacidade de processamento de dados.

O sistema de controle de qualquer manipulador é realizado por meio de um sistema composto por um *software* e *hardware* de controle, que processa os sinais de entrada e converte estes sinais em uma ação ao qual foi programado [20]. No desenvolvimento de controladores de movimento, pode-se partir para a elaboração de todo o *hardware* e *software* de controle. Evidentemente, esta forma de trabalho promove maior flexibilidade, dado que há possibilidade de modificar qualquer parte do sistema, a fim de que o mesmo seja adaptado as necessidades impostas na execução da tarefa. Contudo, o desenvolvimento de um *hardware* e *software* próprio acarreta em um elevado tempo de desenvolvimento e a necessidade de um grande número de pessoas envolvidas no projeto [11].

O *software* pode ser desenvolvido em um computador pessoal ou num microcontrolador. Neste aspecto, deve-se levar em consideração os pontos fortes e fracos de cada possibilidade. O microcontrolador por sua vez reduz o custo do projeto, é rápido e dedica-se apenas ao controle do manipulador, entretanto possui limitações em relação ao tamanho do *software*. Já o computador pessoal possui alta taxa de

processamento e maior espaço de alocação de *software*. Pode-se ainda aplicar uma solução mista, em que a parte mais leve e dedicada do *software* fica no microcontrolador e a parte de maior processamento fica no computador pessoal [20].

O sistema de *hardware* se constitui de motores, cabos, dispositivos de entrada, sensores, amplificadores de potência e circuitos integrados. Sendo o *hardware* o responsável por fazer o elo entre o *software* e os atuadores e sensores do sistema, adaptando os sinais elétricos de modo a interagir com o dispositivo que se deseja controlar.

Para um efetivo controle de um manipulador, há a necessidade que o *hardware* e o *software* funcionem em sintonia, para que se obtenham bons resultados no controle de uma determinada tarefa. Basicamente os sistemas de controle seguem a lógica detalhada na figura 19-A, onde num primeiro momento é gerado um comando de posição, ou seja, a descrição de uma tarefa. Esta é processada pelo controlador que executa todos os cálculos necessários, comparando a tarefa atual com o estado do sistema, que é realimentado por sensores. Em função da diferença de posição entre o comando e o estado atual do eixo informado pelo sensor, o compensador do controlador determina o nível de atuação que deve ser imposto ao atuador. Geralmente esta medida de atuação é interpretada por uma unidade de potência, *driver*, que fornece a energia necessária, que por fim gera no atuador um deslocamento linear ou rotacional. Esse deslocamento é lido pelo sensor que fecha malha de controle com o objetivo de se obter erro nulo de posição.

Este modelo apresentado é característico de um sistema de controle em malha fechada que é bastante robusto e com um alto grau de repetibilidade, porém mais caro e complicado de se implementar. Em contrapartida, existem sistemas, figura 19-B, que não possuem o sensor de realimentação, conhecido como controle em malha aberta, onde os atuadores são ativados e se espera que cumpram exatamente o comando determinado [34-21]. Um caso típico deste tipo de sistema em malha aberta são os manipuladores de soldagem acionados via motor de passo.

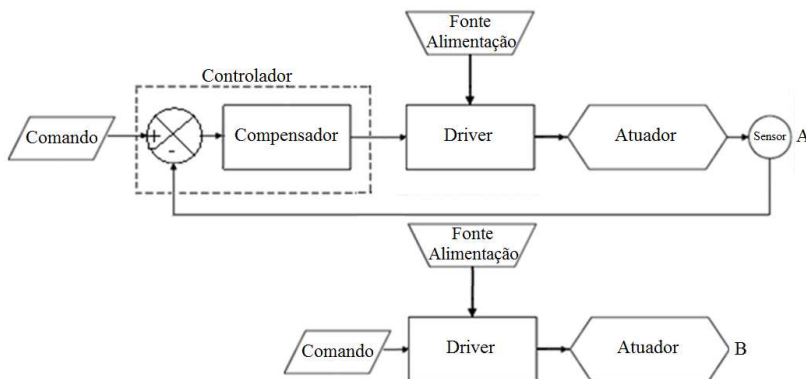


Figura 19 - Em A o sistema de controle em malha fechada de posição e em B o sistema em malha aberta

## 2.5 GERAÇÃO DE TRAJETÓRIAS

A geração de trajetória consiste em gerar o histórico temporal das variáveis de junta para que o manipulador realize um movimento desejado no espaço cartesiano. A especificação do movimento desejado pode ser realizado tanto no espaço das juntas quanto no espaço cartesiano. Usualmente em soldagem este movimento é especificado através dos pontos iniciais e finais, da forma geométrica do caminho e o tempo de deslocamento [13-22].

Em uma trajetória existe uma dependência temporal, enquanto que o caminho é uma descrição puramente espacial, sem relação com o tempo. Uma trajetória pode ser encarada como um caminho ao qual se impõe um perfil de velocidade. A maioria dos métodos para geração de trajetória consiste em calcular os parâmetros da curva tomada pelo caminho, de forma a acomodar os pontos iniciais e finais e o tempo para execução, tendo como resultado uma função parametrizada no tempo. Para que se tenham as referências para o controlador de movimento das juntas é necessário fazer o mapeamento da trajetória no espaço cartesiano para a trajetória no espaço das juntas. Isto é feito ponto a ponto utilizando o modelo cinemático inverso do manipulador [13-22].

Para a realização dos procedimentos de soldagem naval, uma técnica muito utilizada é o tecimento transversal, que é o movimento oscilatório da tocha em relação ao eixo longitudinal do cordão de solda [10]. Os principais tipos de tecimentos são o trapezoidal e o triangular, conforme mostra a figura 20.

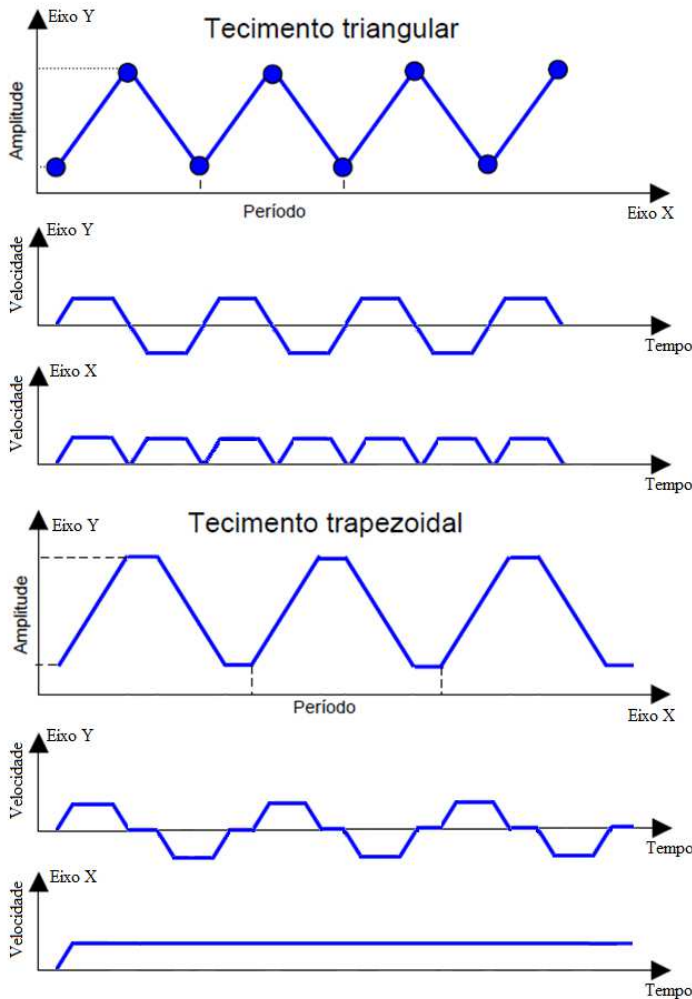


Figura 20 - Tecimento empregados na fabricação naval e sua caracterização da velocidade no espaço das juntas

Num manipulador, depois de saber como relacionar o espaço das juntas com o espaço operacional, é necessário proceder o planejamento da trajetória, que engloba o conjunto de estudos e métodos que permitem definir os regimes de velocidade dos diversos motores, de forma a fazer o manipulador cumprir os objetivos de

deslocamento esperado [21]. Além disso, o tipo de perfil de velocidade usado é de extrema importância na geração de uma trajetória.

O perfil de velocidade trapezoidal, figura 21, é um dos mais simples. Inicia-se com uma velocidade nula, acelera seguindo um movimento uniformemente variado fazendo com que a velocidade aumente linearmente até a velocidade desejada, a qual se mantém constante por um intervalo de tempo. Após esse tempo, o sistema começa a desacelerar fazendo com que a velocidade decaia linearmente até parar. Neste exato momento o sistema chega à posição desejada [23].

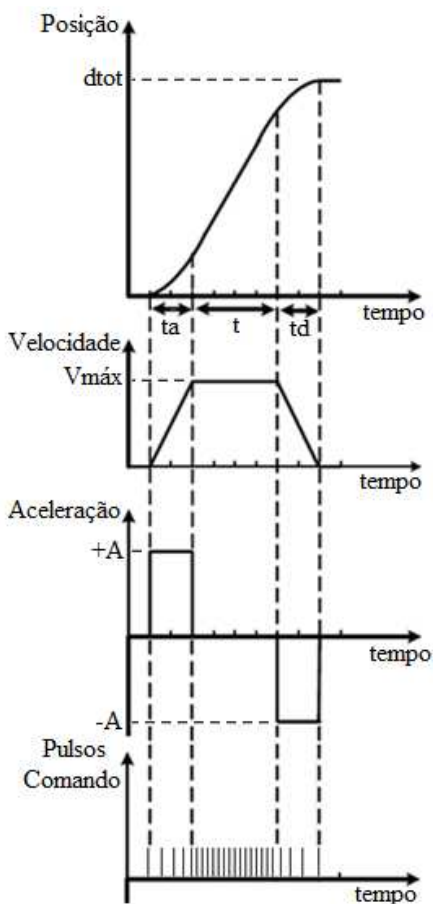


Figura 21 - Perfil de velocidade trapezoidal [24]

As equações necessárias para obtenção dos valores da velocidade máxima e da aceleração, para um perfil trapezoidal generalizado são apresentadas a seguir [24]:

$$d_{tot} = V_{m\acute{a}x}(\frac{t_a}{2} + t + \frac{t_d}{2}) \quad (2.1)$$

$$V_{max} = \frac{d_{tot}}{(\frac{t_a}{2} + \frac{t_d}{2}) + t} \quad (2.2)$$

$$A = \frac{V_{max}}{t_a} \quad (2.3)$$

Onde:

$d_{tot}$  – distância total do deslocamento;

$V_{max}$  – velocidade máxima;

$A$  – aceleração;

$t_a, t_d$  – tempo de aceleração e de desaceleração;

$t$  – tempo de operação com velocidade constante.

### 3 SISTEMA DE CONTROLE DO MANIPULADOR

É muito comum na indústria naval a realização de preenchimento de juntas em vários passes nas posições de soldagem não convencionais, como a vertical e a horizontal. Diante destas características de procedimento de soldagem constatou-se que tanto o *hardware* quanto o *software* do manipulador Tartílope V2F não eram adequados para as aplicações no setor naval. Além disso, há necessidade de se desenvolver uma interface de programação mais intuitiva e com a opção de correção de todos os parâmetros da trajetória durante a execução da soldagem e de ampliar a faixa de velocidade dos eixos. Na tabela 1 são apresentadas as antigas especificações técnicas dos eixos do referido manipulador.

| Tabela 1 - Principais especificações dos eixos do Tartílope V2F |                |
|-----------------------------------------------------------------|----------------|
| Dados Técnicos                                                  |                |
| Curso do eixo X                                                 | 1200 mm        |
| Curso do eixo Y                                                 | 300 mm         |
| Resolução do eixo X                                             | 0,119 mm       |
| Resolução do eixo Y                                             | 0,276 mm       |
| Velocidade máxima do eixo X                                     | 1,60 m/min     |
| Velocidade máxima do eixo Y                                     | 3,75 m/min     |
| Tecnologia de acionamento                                       | motor de passo |

#### 3.1 VISÃO GERAL DO SISTEMA DE CONTROLE

Diante da situação exposta anteriormente, foi decidido desenvolver um novo sistema de controle para o Tartílope V2F, figura 22, com o objetivo de torná-lo mais rápido, robusto e flexível na realização das tarefas de soldagem naval.

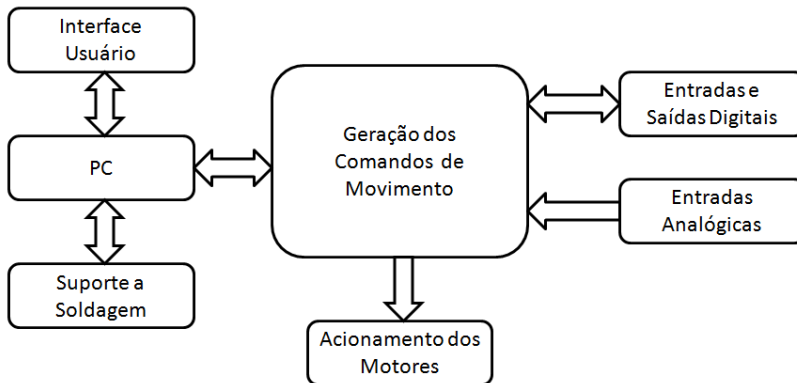


Figura 22 - Diagrama de blocos do novo sistema de controle do Tartílope V2F

Cada um dos seis módulos do sistema de controle do Tartílope V2F tem funções específicas:

1. A interface usuário é o dispositivo onde o operador escolhe e configura o tipo de trajetória a ser realizada pelo manipulador. Esta interface permite programar e corrigir desde uma simples trajetória de soldagem até uma trajetória com tecimento composta de vários passes e trechos;
2. o suporte a soldagem é um dispositivo portátil para operação em campo, que permitirá posicionar, carregar programas configurados na interface do usuário e realizar correções na trajetória pelo operador durante a soldagem;
3. a geração dos comandos de movimento realiza inicialmente a leitura das informações proveniente da interface do usuário e dos módulos de entrada digital e analógico. A seguir processa essas informações e gera os sinais de comando para os *drivers* de acionamento dos motores de cada eixo do Tartílope V2F e também os sinais de disparo e de sincronismo para a fonte de soldagem;
4. o acionamento dos motores é o responsável por interpretar e amplificar os sinais de comandos recebidos do módulo de geração dos comandos de movimento para acionamento dos motores de cada eixo do Tartílope V2F;
5. o módulo de entrada e saída digitais é uma interface por onde ocorre a comunicação de sinais elétricos entre os equipamentos periféricos e o módulo de geração dos comandos de movimento. O disparo da fonte de soldagem e o

reconhecimento de arco aberto pelo manipulador são respectivamente exemplos de uso dos sinais digitais de entrada e de saída deste módulo;

6. o módulo de entradas analógicas é uma interface utilizada quando se deseja realizar a correção automática da trajetória de soldagem com a realimentação via sensores que detectem as características elétricas do arco, tensão e corrente, ou a geometria da junta.

Essa concepção descentralizada foi adotada para dividir a tarefa entre os controladores do sistema e para que se tenha liberdade e facilidade de implementar novas funcionalidades ao equipamento. O sistema de controle proposto para o manipulador cartesiano opera conforme mostra a figura 23. O operador num primeiro momento seleciona e configura, via interface do usuário, às trajetórias de soldagem. A interface do usuário possui uma tela sensível ao toque, que facilita a configuração e manipulação do sistema.

Depois de configurado e confirmado para execução, a trajetória é enviada ao módulo de suporte a soldagem, onde o usuário poderá movimentar manualmente o sistema e disparar a soldagem, além de poder realizar pequenas correções na trajetória durante a realização da soldagem. Os sistemas da interface do usuário e do suporte a soldagem acabam sendo redundantes, mas em função do ambiente altamente agressivo da soldagem para as telas sensíveis ao toque, optou-se também pelo desenvolvimento de um controle remoto simplificado e robusto para operação em conjunto com a realização da soldagem.

Todas as informações recebidas pelas interfaces, do usuário e do suporte a soldagem, serão processadas no computador interno do sistema de controle do manipulador e encaminhada via canal USB para o módulo de geração dos comandos de movimento.

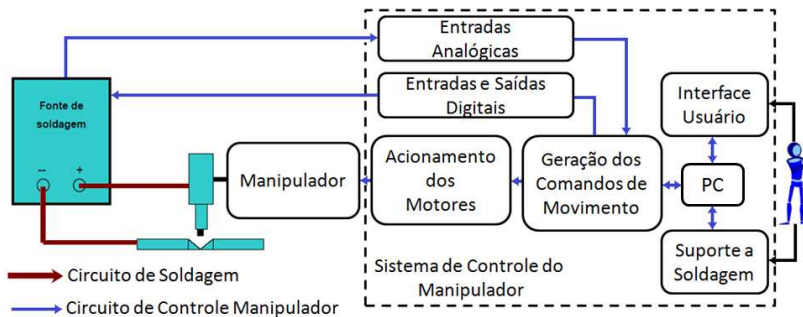


Figura 23 - Digrama funcional da integração do manipulador com a fonte de soldagem

### 3.2 GERADOR DOS COMANDOS DE MOVIMENTO

O gerador dos comandos de movimento do Tartilope V2F é o módulo mais importante, visto que é onde serão processadas as informações da trajetória e gerado os sinais de acionamento dos eixos. Para implementação deste módulo, partiu-se com três possibilidades. A primeira seria a readequação do PC-104, mas foi descartada, em função do sistema ser limitado quanto ao número de eixos e os inconvenientes de trabalhar com uma estrutura PC não dedicada ao controle de periféricos.

Outra possibilidade seria a utilização de um *software* de controle CNC. A referida tecnologia surgiu em meados do século XX e hoje é bastante difundida, tendo neste período um desenvolvimento bem grande de *softwares* para edição e controle de trajetórias. Atualmente existe uma extensa variedade de controladores, distinguindo-se entre sistemas de grande complexidade e de custo elevado a sistemas simples e de baixo custo. Entretanto a soldagem é dinâmica e muitas vezes há a necessidade de alterar os parâmetros da trajetória programada durante a execução da mesma. Como a tecnologia CNC segue um programa pré-determinado, fica impossibilitado aplicar correções na trajetória durante a execução, sendo isto o seu limitante [11].

Em virtude disto, optou-se pelo desenvolvimento do gerador dos comandos de movimento num microcontrolador, que possui varias funcionalidades próprias para o controle de sistemas que necessitam de *timers* para contagem de tempo, canais de leitura de sinais analógicos e entradas e saídas digitais. Tendo o cuidado de escolher um microcontrolador com características que abranjam as necessidades de

controle do Tartílope V2F e permita futuras expansões e novas funcionalidades ao sistema de controle.

### 3.2.1 Seleção da CPU do Gerador dos Comandos de Movimento

A seleção da CPU para o gerador dos comandos de movimento foi uma das tarefas mais críticas, pois a escolha errada poderia influenciar diretamente em trabalhos futuros. Sempre se teve a preocupação de dimensionar um *hardware* que suportasse o Tartílope V2F e também tivesse flexibilidade para aplicar a outros equipamentos. Em função disto, foram definidas algumas exigências para delinear esta escolha, são elas:

- Gerar comandos de movimento do tipo digital para até 6 eixos;
- definir e corrigir as variáveis de movimento;
  - velocidade de soldagem;
  - amplitudes de tecimento;
  - frequências de tecimento;
  - linhas de simetria do tecimento;
  - posição e velocidade dos eixos.
- integração com fonte de soldagem;
  - sinal de comando de saída para disparo da fonte de soldagem;
  - sinal de comando de entrada para disparo do movimento do manipulador;
  - sinal de comando de saída para realizar o movimento de tecimento sincronizado com o processo de soldagem da fonte;
  - sinais de comando de saída para seleção de novos parâmetros da fonte para cada referido trecho de soldagem;
- permitir comunicação via USB e serial, para integração com outros dispositivos;
- microcontrolador com alta taxa de processamento, e com arquitetura de pleno domínio que permita alterações e atualizações no processo de geração dos comandos de movimento.

Foram estudados vários processadores digitais de sinais e DSPs que poderiam servir de CPU. A solução que melhor se adequou as características exigidas foi o microcontrolador LPC2148 que atualmente é fabricado pela NXP, subsidiária da Philips.

O LPC2148 é um microcontrolador com tecnologia ARM que utiliza um núcleo ARM7TDMI-S, oferecendo alta performance, poder de processamento e baixo consumo, características ideais para sistemas *embedded*. Este microcontrolador possui memória de programa *flash* de alta velocidade e um processador de 32 bits que permite a execução de programas em até 60 MHz. É um microcontrolador completo para o acionamento dos eixos de um manipulador, pois permite trabalhar com sinais digitais de uso geral, interrupções externas e de *timers*, unidades de PWM, conversores A/D e D/A e comunicações do tipo UART, SPI e USB [33].

### 3.2.2 Hardware desenvolvido

O microcontrolador LPC2148 possui 64 pinos, dos quais 22 são restritos do sistema, como alimentação, oscilador, LED de indicação do estado de funcionamento, entre outras funções vitais. Restando 42 pinos para desenvolvimento do *hardware* de controle. Estes pinos foram distribuídos para as diversas funcionalidades exigidas de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2- Números de pinos usados em cada funcionalidades específica

| Função do <i>Hardware</i>                 | Número de Pinos |
|-------------------------------------------|-----------------|
| Chaves de <i>homes</i> e de fins de curso | 7               |
| Sinais de comando dos <i>drivers</i>      | 12              |
| Comunicação com a fonte de soldagem       | 3               |
| Sinais analógicos dos sensores externos   | 3               |
| Sinal de Emergência                       | 1               |
| Comunicação: USB, UART e SPI              | 10              |

Por fim, definido a quantidade de pinos para cada funcionalidade específica do *hardware*, foi elaborada na figura 24 a concepção funcional do sistema de controle do manipulador.

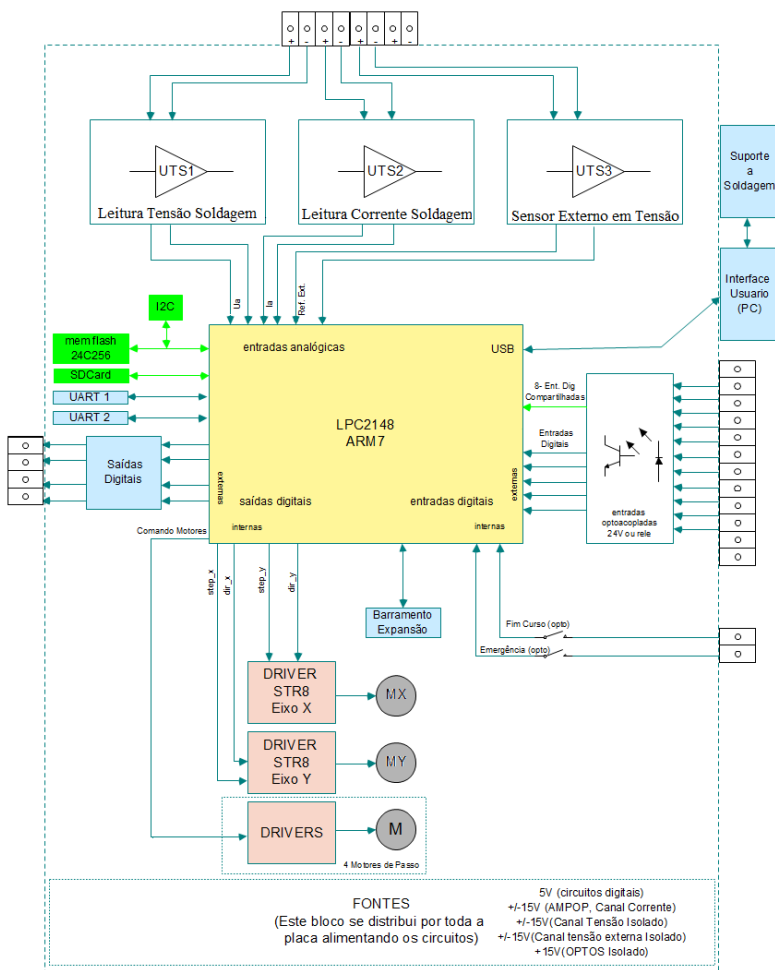


Figura 24 - Concepção funcional do sistema de controle do manipulador

Com base no diagrama da figura 24 foi projetada uma placa eletrônica, dupla face com componentes fixados em ambos os lados, de funcionalidade flexível abrangendo todas as necessidades das exigências citadas anteriormente e aproveitando de todos os pinos disponíveis do microcontrolador. Na face superior foram fixados os componentes de tecnologia *through-hole* e na face inferior foram fixados os de tecnologia *surface mount*. Devido à complexidade desta

placa eletrônica o primeiro protótipo para validação, figura 25, foi executado em uma fresadora específica de usinagem de placa de circuito impresso.

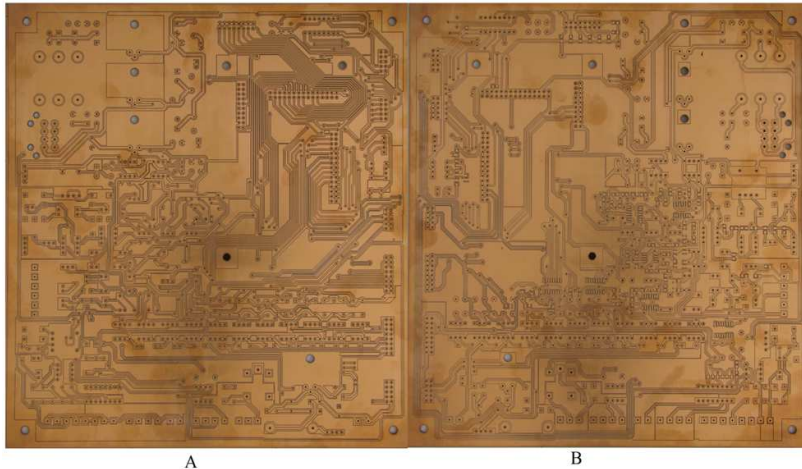


Figura 25 - Protótipo da placa eletrônica de controle do manipulador: em A a face superior e em B a face inferior

Depois das correções realizadas no protótipo e da consolidação de todos os circuitos necessários para o *hardware* de controle do manipulador procedeu-se com o desenvolvimento de uma placa de circuito impresso do tipo dupla face, figura 26, composta pelos seguintes blocos:

1. Fontes de alimentação;
2. placa do microcontrolador LPC2148;
3. expansão das entradas e saídas digitais;
4. comunicação serial RS232;
5. comunicação SD Card;
6. comunicação serial SPI;
7. saídas de comando não isoladas para *drivers*;
8. entradas analógicas;
9. entradas digitais isoladas;
10. saídas digitais isoladas;
11. fonte alimentação do comando isoladas dos *drivers*;
12. saídas de comando isoladas para *drivers*.

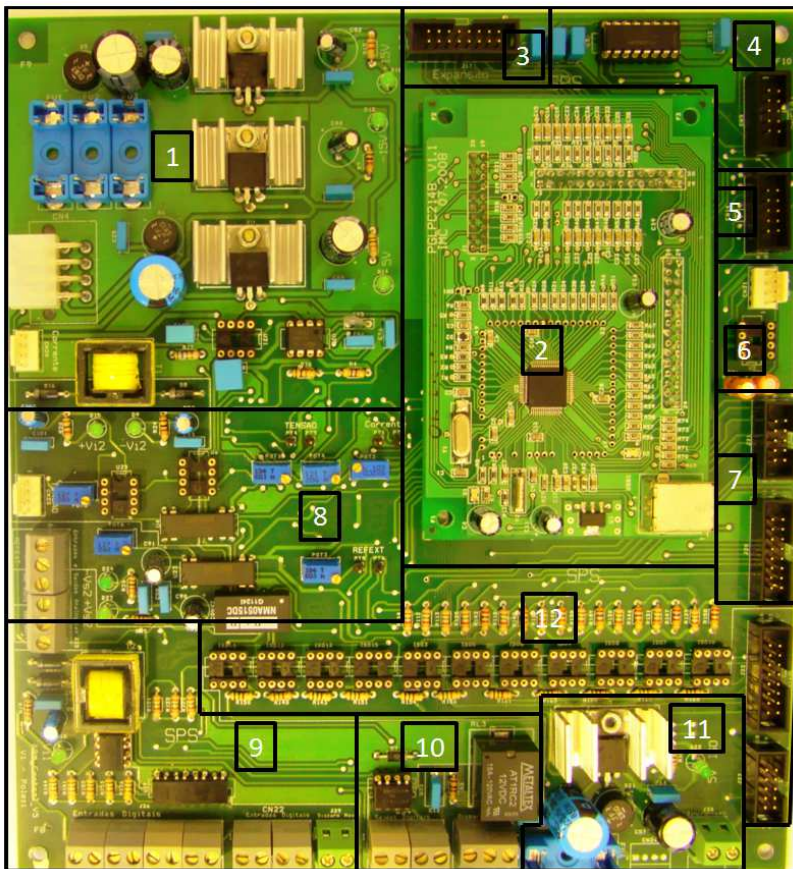


Figura 26 - Face superior da placa eletrônica de controle do manipulador

Neste projeto foi utilizado opto-acopladores em todos os sinais de entrada e de saída do microcontrolador LPC2148 com o objetivo de proteção deste componente e adequação dos níveis de tensões elétricas. A desvantagem de utilizar opto-acopladores é a necessidade de utilizar varias fontes de alimentação. Para tratar de todos os sinais foram necessários o desenvolvimento de cinco fontes de alimentação do tipo linear conforme descrito na figura 24.

Os outros circuitos desenvolvidos foram os de comunicação e de gravação de dados, que corresponde ao SD Card, memória *flash* e a comunicação serial, sendo que as implementações destes foram feitas a partir de circuitos integrados, sendo necessário apenas a correta ligação

destes com o LPC2148 e a disponibilização das tensões de alimentação corretas. O *slot* de *SD card*, é utilizado nas aplicações onde não há necessidade de alterar os parâmetros da trajetória abolindo assim, a interface do usuário, enquanto que a memória *flash* é usada para gravar pequenos dados, tais como variáveis do sistema que se deseja recuperar após desligar o equipamento.

Os circuitos analógicos foram desenvolvidos em conjunto com outro mestrando e segue a lógica detalhada na figura 27. Basicamente o sinal de tensão ou corrente é filtrado, com o objetivo de eliminar os ruídos de alta frequência e dividido de forma que possa ser tratado pelos componentes eletrônicos seguintes. Após isso, este passa por um opto-acoplador e por fim ajustado para a faixa de tensão de entrada do conversor analógico-digital de 10 bits do LPC2148. Em suma, este módulo de entradas analógicas transforma por exemplo, o sinal de tensão do arco elétrico, faixa de -50 V a +50 V, em um sinal na faixa de de -3,3 V a 3,3 V. Com essas características o erro máximo de medição da tensão do arco elétrico é de aproximadamente 0,1 V.



Figura 27 - Diagrama de blocos entradas analógicas

### 3.2.3 Software de controle do manipulador

O *software* e *hardware* de controle do manipulador foram elaborados em paralelo, logo num primeiro momento o desenvolvimento do *software* se fez no kit MCB2140 da Keil, figura 28. Este kit é voltado ao desenvolvimento do microcontrolador LCP2148. A vantagem de sua utilização foi a não necessidade de se preocupar com possíveis defeitos de *hardware*, que são muito comuns em protótipos.

A placa inclui, além dos componentes mínimos para operar o microcontrolador, periféricos que podem ser aproveitados para testes e depuração do *software*. Entre esses componentes, incluem-se aí, duas portas seriais RS-232, *buzzer*, potenciômetro para simulação de sinais analógicos, oito *LEDs*, porta USB, conector de *SD card* e vários pinos digitais disponíveis para uso, proporcionando uma grande flexibilidade para desenvolvimento e estudo da plataforma.

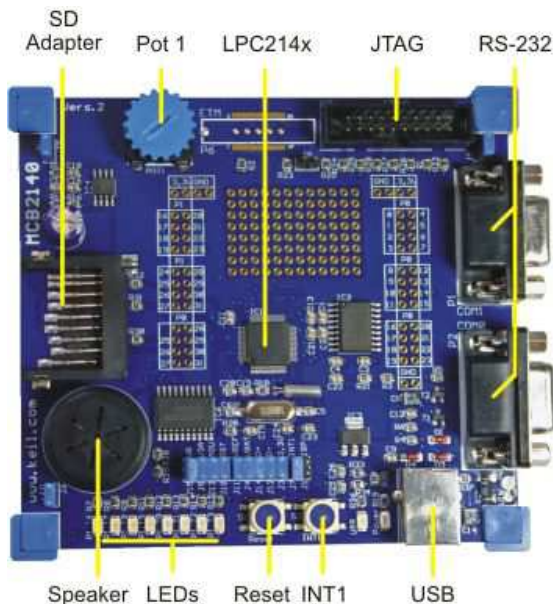


Figura 28 - Kit de desenvolvimento MCB2140 [25]

É fundamental que o *software* seja de fácil entendimento e possa ser modificado por programadores distintos, a fim de corrigir defeitos ou implementar novas funcionalidades. Buscando estas características, escolheu-se a linguagem C++ para programação do LPC2148. É uma linguagem orientada a objeto, permitindo uma fácil legibilidade, reutilização e manutenibilidade do código.

Na programação orientada a objetos é implementado um conjunto de classes que definem os objetos presentes no *software*. Cada classe determina o comportamento (definido nos métodos ou funções) e estados possíveis (atributos ou variáveis) de seus objetos, assim como o relacionamento com outros objetos. A importância desta estrutura implica que qualquer aplicação que necessite utilizar uma determinada classe, basta criar uma instância deste em qualquer parte do *software*, com isto permitindo a fácil reutilização de código.

Outro ponto importante na linguagem C++ é a abstração dos dados. Na definição das classes, as variáveis podem ser públicas ou privadas. Quando designada como pública, as variáveis podem ser usadas por outros objetos. Caso contrário, apenas o próprio objeto pode usar suas variáveis. Esta característica aumenta a estabilidade do *software*.

O *software* de controle do manipulador foi estruturado nos seguintes módulos: startup, configurações, USB e processos. O módulo startup possui o arquivo responsável por inicializar o LPC2148. O segundo módulo possui as rotinas de configuração do LPC2148 e serve de apoio aos demais módulos, o módulo USB possui todas as configurações para a comunicação HID e de interface com o usuário e o último módulo possui as rotinas de controle de movimento do manipulador Tartilope V2F. A figura 29 mostra a estrutura dos módulos e seus arquivos de programa.

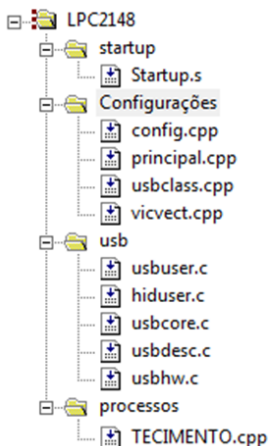


Figura 29 - Estrutura do software de controle do movimento

O segundo módulo é o de configuração que possui várias classes que configuram o LPC2148, sendo que cada uma tem uma função específica:

- Principal.cpp: contém a função *main* que basicamente cria os objetos, chama alguns métodos de inicialização e realiza a geração das trajetórias, através da interpretação dos dados da USB e a geração de comandos de acionamento dos motores para realizar das trajetórias programadas;
- config.cpp: como o próprio nome sugere, ele configura os pinos do LPC2148 e o *timer* para acionamento dos eixos;
- usbclass.cpp: é responsável por receber e armazenar os dados provenientes da USB via a interface do usuário;

- `vicvect.cpp`: este arquivo tem este nome devido ao LPC2148 possuir um vetor de tratamento de interrupções. Neste é tratado as interrupções do *timer* de alta frequência, que é utilizado para realizar a contagem do tempo para sinais de *step* para acionar os motores, e a interrupção da USB a cada novo pacote de dados da interface;

A figura 29 ainda especifica o objeto USB, que é o responsável por tratar da inicialização e recebimento de pacotes de dados, entretanto esta classe será detalhada mais a frente junto com o protocolo de comunicação USB implementado para integração do LPC2148 com a interface de usuário.

Seguindo a lógica de orientação a objetos, concedeu-se um objeto chamado `processos`, cujos métodos e atributos são as ações que o manipulador irá realizar. A classe `tecimento` é a responsável por realizar os movimentos, de `tecimento` e de `movimentação`, do manipulador. Na figura 30 é mostrado um trecho de código desta classe com os principais métodos.

```

//***** RECEBIMENTO DE PACOTES DA USB *****
void tecimentoclass::USB_interpretar(void)...
void tecimentoclass::USB_config(void)...
void tecimentoclass::USB_manual(void)...
void tecimentoclass::USB_trecho_bruto(void)...
void tecimentoclass::USB_trecho_process(void)...
void tecimentoclass::USB_atualizar_bruto(void)...
void tecimentoclass::USB_atualizar_process(void)...
void tecimentoclass::USB_correcao(void)...
void tecimentoclass::USB_start(void)...
void tecimentoclass::USB_stop(void)...
void tecimentoclass::USB_pause(void)...
void tecimentoclass::USB_resume(void)...
void tecimentoclass::USB_atualiza_dados_interface(void)...
// ***** MÉTODO DE ATUALIZAÇÃO DE DADOS *****
void tecimentoclass::processa_trecho( Etrechos* trecho)...
void tecimentoclass::carrega_trecho( Etrechos* trecho)...
//***** ROTINA DE EMENDAR TRECHO *****
void tecimentoclass::emendar_trecho(void)...
void tecimentoclass::controle(void)...
//***** ROTINA DO TIMER *****
void tecimentoclass::temporizacao(void)...
void tecimentoclass::correcao(void)...
//***** ROTINA DE ACIONAMENTO DOS MOTORES ***
void tecimentoclass::acionamento_motores(void)...
void tecimentoclass::executar_M1(void)...
void tecimentoclass::executar_M2(void)...
//***** ACIONAMENTO DOS PINOS *****
void tecimentoclass::M1_dir( int s)...
void tecimentoclass::M2_dir( int s)...
void tecimentoclass::M1_step()...
void tecimentoclass::M2_step()...
void tecimentoclass::M1_clr_step()...
void tecimentoclass::M2_clr_step()...

```

Figura 30 - Métodos da classe `tecimento`

Basicamente estes métodos norteiam o funcionamento do sistema de controle do manipulador, a figura 31 mostra a relação destes métodos na geração de uma trajetória. O método `USB_interpretar` é o

responsável por identificar os dados que vêm da interface do usuário via USB sobre a trajetória a ser realizada, que depois de analisada chama os outros métodos da USB, como o *USB\_manual* que é o responsável por movimentar manualmente o manipulador, o *USB\_trecho\_process* que é o responsável por processar os dados da interface para realizar as trajetórias de soldagem com tecimento.

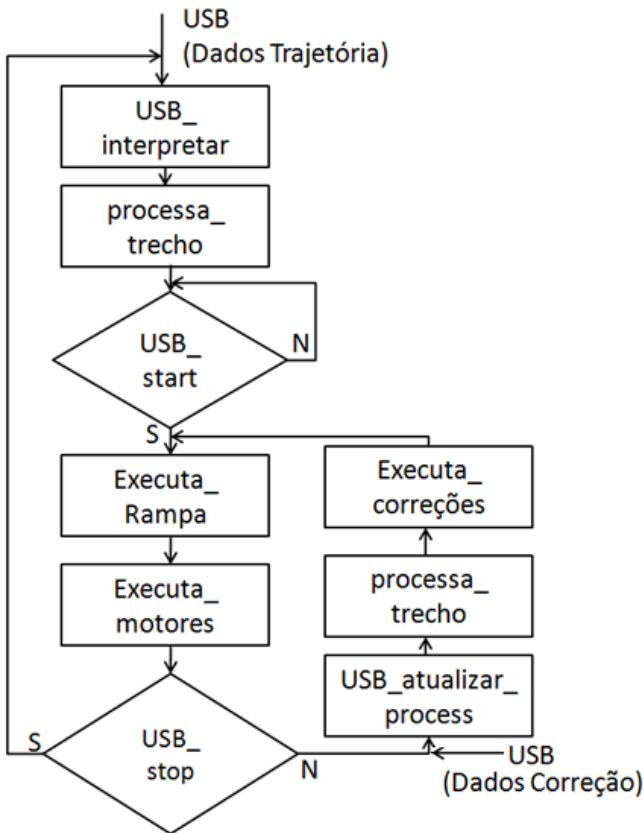


Figura 31 - Fluxograma executa movimento

Após receber e interpretar os dados, estes são processados pelo método *USB\_trecho\_process* e *processa\_trecho*, que são os responsáveis por pegar todas as informações fundamentais, como velocidade de soldagem, amplitude, frequência, tempos de paradas e tipo de tecimento para a montagem da trajetória. Depois de planejada a trajetória, fica-se a espera do disparo do movimento. Quando este for

identificado são executados os métodos de *executa\_rampa* e *executa\_motores*, sendo o primeiro responsável por iniciar o movimento através de uma rampa de velocidade e o segundo por executar o movimento na velocidade de regime pretendida.

O controle de movimento expresso neste fluxograma é realizado devido a utilização de dois canais de interrupção, um é o canal de interrupção da USB e o outro é uma interrupção de *timer* de alta frequência que esta configurada em 100 KHz. Fundamentalmente esta é a responsável pela contagem do tempo para geração dos sinais de comando para os motores, logo quando se dispara o movimento esta interrupção é acionada e começa a geração dos comandos da trajetória.

Nesta fase ocorre a execução de três tarefas. A primeiro é a interrupção da USB que fica verificando se algum dado novo veio da interface do usuário, de modo a atualizar a trajetória ou embutir alguma correção de movimento a trajetória que esta sendo executada. A segundo é a interrupção de *timer* que faz a contagem do tempo para o próximo incremento de posição de cada eixo. A terceiro é o programa *main* que realiza o respectivo acionamento de cada motor.

Nesta configuração, a interrupção do *timer* que determina o instante de acionamento dos motores é a de maior prioridade seguida da interrupção USB de correção da trajetória.

### 3.2.4 Geração das Trajetórias de soldagem

A cinemática do manipulador foi determinada com base na trajetória de tecimento trapezoidal, figura 32. Além de ser o tipo de movimento mais utilizado na soldagem naval de juntas do tipo V, por simplificação deste obtém-se o tecimento triangular.

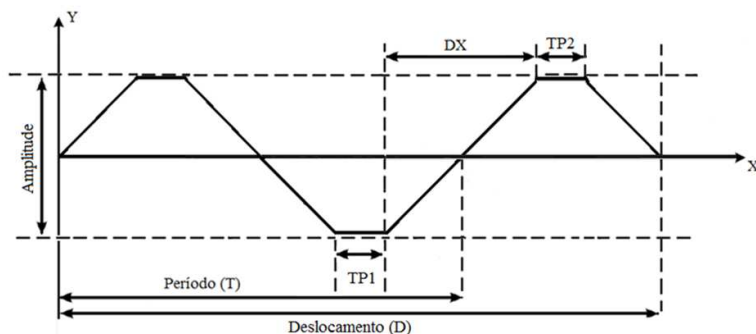


Figura 32 - Tecimento trapezoidal da tocha de soldagem

A amplitude representa a distância de deslocamento do eixo Y sobre a junta a ser soldada e o deslocamento é a distância total de movimento do eixo X. O período T representa o tempo para realizar um ciclo de tecimento.

Na configuração da trajetória de soldagem o usuário fornece os seguintes dados: deslocamento (D), velocidade de soldagem ( $v_s$ ), os tempos de parada nas extremidades da oscilação (TP1 e TP2), amplitude (A) e frequência de tecimento (f).

O movimento trapezoidal no espaço das juntas é representado na figura 20, sendo que o eixo X mantém uma velocidade constante depois de atingido a velocidade de soldagem, enquanto o eixo Y sempre esta variando sua velocidade em função do movimento de tecimento. Para o cálculo da velocidade de tecimento do eixo Y é utilizado a equação 3.1.

$$Velocidade\_Y = \frac{2.Amplitude}{T-TP_1-TP_2} \quad (3.1)$$

No movimento triangular no espaço das juntas, como está representado na figura 20, o eixo X mantém um movimento interpolado com o eixo Y. De modo a compor corretamente o movimento é necessário encontrar o valor de DX que é obtido pela equação 3.2, que é a projeção do deslocamento do eixo X em relação ao deslocamento do eixo Y.

$$D_X = \frac{Velocidade\_X.(T-TP_1-TP_2)}{2} \quad (3.2)$$

Com estas relações é possível determinar todas as variáveis para compor os movimentos de tecimento do Tartilope V2F. Entretanto o cálculo da velocidade dos eixos não leva em consideração o tempo de aceleração do motor, que passa a ter influência com a utilização de frequências de tecimento elevadas. Para acelerar o motor de passo foi utilizado um perfil de velocidade do tipo trapezoidal, que possui uma etapa de aceleração, velocidade constante e desaceleração, conforme mostra a figura 33-A.

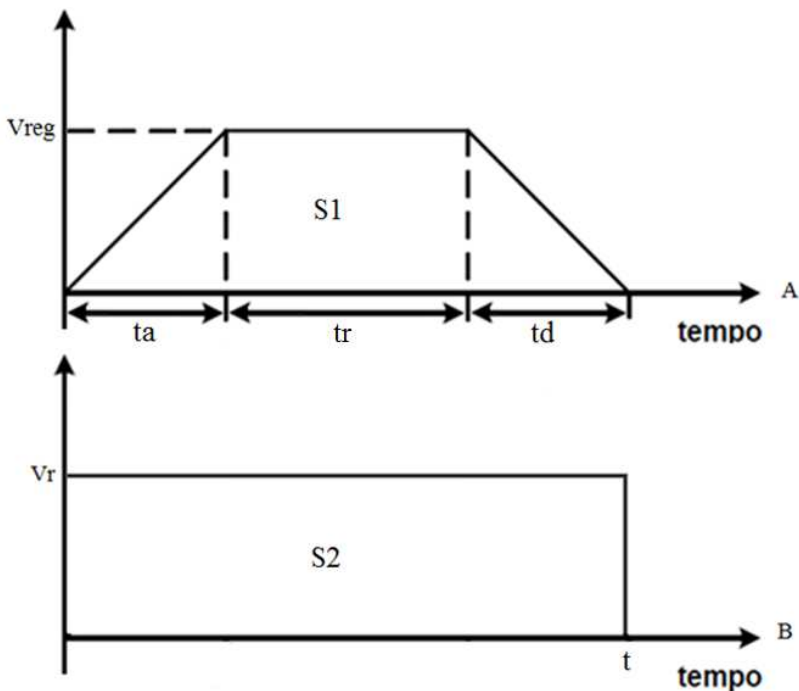


Figura 33 - Em A o perfil trapezoidal de velocidade da junta em B o perfil retangular

Para determinar a velocidade de regime do perfil trapezoidal  $V_{reg}$ , levando em consideração que o tempo de aceleração  $t_a$  é igual ao tempo de desaceleração  $t_d$ , foi utilizado a seguinte equação:

$$S_1 = S_2 \Rightarrow 2 \cdot \frac{t_a \cdot V_{reg}}{2} + (t - 2 \cdot t_a) \cdot V_{reg} = V_r \cdot t \quad (3.3)$$

Onde :

$$t_a = t_d = \frac{V_{reg}}{a} \quad (3.4)$$

Substituindo a equação 3.4 na equação 3.3, obtém-se:

$$V_{reg}^2 - at \cdot V_{reg} - at \cdot V_r = 0 \quad (3.5)$$

Como solução da equação 3.5, tem-se:

$$V_{reg} = \frac{a.t - \sqrt{a^2.t^2 - 4.a.Vr.t}}{2} \quad (3.6)$$

De acordo com o princípio de funcionamento dos motores de passo, a sua velocidade de deslocamento é proporcional à frequência da corrente elétrica em seus enrolamentos. É de conhecimento que quanto mais branda for a aceleração mais facilmente o motor sairá da inércia e atingirá a velocidade desejada sem perder passos ou ter o travamento do movimento. Buscando respeitar esta característica foi utilizada uma metodologia para definição do número e instantes de tempo de cada pulso na rampa de velocidade [24]. Essa metodologia usa como parâmetros de entrada de cada eixo a relação de transmissão  $R$ , a velocidade máxima  $V_{max}$  e a aceleração máxima  $a$ , conforme mostra a tabela 3. Estes valores foram definidos em função das limitações dos motores de passo utilizados.

Tabela 3 - Parâmetros de entrada de cada eixo do Tartilope V2F

| Tartilope V2F | Relação Transmissão (pulsos/mm) | Velocidade Máxima (mm/s) | Aceleração (mm/s <sup>2</sup> ) |
|---------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|
| X             | 49                              | 166                      | 4000                            |
| Y             | 29                              | 200                      | 5000                            |

Definido estes parâmetros é possível descobrir os tempos de aceleração  $ta$  e desaceleração  $td$  de cada eixo, conforme a equação abaixo:

$$ta = td = V_{max}/a \quad (3.7)$$

A partir da equação 3.7 foi possível obter os tempos de aceleração/desaceleração para os eixos.

- $ta_x = 41 \text{ ms}$ ;
- $ta_y = 40 \text{ ms}$ ;

A partir da expressão 3.8 é possível determinar o número de pulsos  $N_{pulsos}$  necessários para acelerar até a velocidade máxima definida.

$$d = d_0 + v_0 \cdot ta + \frac{a \cdot t^2}{2} = \frac{NPulsos}{R} \quad (3.8)$$

Onde:

$$N_{Pulsos} = R \cdot \frac{a \cdot t^2}{2} \quad (3.9)$$

Utilizando desta equação e dos parâmetros que a compõem, obteve-se que para o eixo X são precisos 169 passos de aceleração e para o eixo Y são precisos 114 passos.

Tendo descoberto o número de passos  $N_{Pulsos}$ , a próxima etapa é a obtenção dos instantes de cada passo. Estes instantes são obtidos isolando a variável tempo na equação 3.9:

$$t(np) = \sqrt{\frac{2 \cdot np}{R \cdot a}}, \text{ com } np = 1, 2, \dots, N_{Pulsos} \quad (3.10)$$

Com esta equação é possível determinar com precisão o instante de cada passo, tendo que se atentar que é fornecido o instante de cada passo no tempo, logo para se obter o tempo de contagem correto é necessário realizar a seguinte operação:

$$t_{p(np)} = t(np) - t(np - 1), \text{ com } np = 1, 2, \dots, N_{Pulsos} \quad (3.11)$$

Esta operação resulta o tempo entre os pulsos de comando  $tp(np)$  para execução de cada passo do motor. Por fim este tempo de contagem é relacionado com a frequência de *clock* da interrupção de *timer* para o acionamento dos motores de passo, sendo esta de 100 KHz. Com isto é obtido a equação abaixo:

$$t_{c(np)} = t_{p(np)} \cdot Freq_{Clock}, \text{ com } np = 1, 2, \dots, N_{Pulsos} \quad (3.12)$$

De modo a não onerar tanto o processamento do LPC2148, a rampa foi toda calculada externamente e definida no *software*, logo quando é preciso atingir certa velocidade de regime, a rampa é executada até a velocidade de regime programada, garantindo assim o aumento linear da velocidade e a retirada do manipulador da inércia.

### 3.2.5 Protocolo de Comunicação USB

A transferência de dados entre a interface do usuário e o gerador de comandos de movimento é realizada por meio da USB, que é um padrão de comunicação serial universal. A comunicação entre ambos os módulos é dada pela transferência interrupta com a utilização da classe HID, que dá suporte de comunicação a dispositivos de baixa complexidade com características de baixo volume de transmissão e frequência reduzida. Desta maneira foi programado o microcontrolador LPC2148 como um dispositivo USB-HID. Para isto foi criada a classe USB e esta possui várias funções responsáveis por sua configuração.

Configurada e estabilizada a comunicação, definiu-se o protocolo de comunicação e as variáveis a serem enviadas. Na figura 34 tem-se um trecho simplificado do protocolo e os dados a serem transmitidos. O protocolo foi baseado em duas *unions*, uma para tratamento dos dados de entrada e outra para os dados de saída.

Para facilitar e organizar melhor os pacotes de dados de entrada foram criadas várias *structs* organizadas em protocolos específicos como: dados de configuração, movimento manual, trechos processados e correção. Sendo que as variáveis destacadas no quadrado vermelho são as utilizadas nestas *structs* que tem a função de fornecer as informações essenciais para a geração dos comandos de acionamento dos motores de passo para a realização das trajetórias de soldagem.

Na *union* de saída são enviados dados do LPC2148 para a interface do usuário, fornecendo informações de *status* como: evolução da trajetória de soldagem, trecho ativo, posição dos eixos e código de erro se houver algum problema na execução do movimento de soldagem.

```

union Uentrada {
    struct Estc{
        unsigned char alinhador_de_bytes;
        BYTE OutReport[19];
    }tst;
    struct Econfiguracao {
        OutReport[12];
    }configuracao;
    struct Emanual {
        OutReport[6];
    }manual;
    struct Etrecho_processado {
        OutReport[12];
    }trecho_processado;
    struct Ecorrecao {
        OutReport[4];
    }correcao;
}

union Usaída {
    struct Estc2{
        unsigned char alinhador_de_bytes;
        BYTE InReport[15];
    }tst2;

    struct Esaída {
        unsigned char alinhador_de_bytes;
        char execucao;
        char usb_livre;
        char trecho_ativo;
        int ultimo_erro;
        int posicao_M1;
        int posicao_M2;
    }saída;
}

```

A

```

unsigned char alinhador_de_bytes;
unsigned char protocolo;
unsigned char tartilope;
unsigned char numero_trechos;
unsigned char confis;
unsigned char direcao_tecimento;
short M1_config_passo_tempo_ativo_us;
short M2_config_passo_tempo_ativo_us;
unsigned char trecho;
unsigned char movimento;
short distancia_M1;
unsigned short velocidade_M1;
short distancia_M2;
unsigned short velocidade_M2;
short amplitude;
short deltax;
unsigned short tempo_parada1;
unsigned short tempo_parada2;
unsigned char sent_x_y;
unsigned char multiplicador;

```

B

Figura 34 - Protocolo de Comunicação IHM-ARM, em A a estrutura do protocolo e em B os dados utilizados na comunicação

### 3.3 INTERFACE COM O USUÁRIO

A interface com o usuário foi projetada para ser de fácil utilização de operação, em função disto foi decidido que a programação das trajetórias seria em uma tela sensível ao toque. Sua programação foi desenvolvida em linguagem C++ orientada a objeto numa IDE gráfica.

A partir das necessidades deste projeto e de suas expansões futuras foi elaborada uma lista de requisitos para o desenvolvimento do *software* da interface do usuário, são eles:

- Enviar e receber dados via porta serial com o sistema de suporte a soldagem e pela USB com o módulo de geração dos comandos de movimento;
- ter uma interface gráfica intuitiva, eficaz e eficiente;
- ser capaz de gerar trajetórias de soldagem com e sem tecimento;
- possibilitar a alteração de parâmetros configurados inicialmente durante o processo de soldagem;

- salvar, carregar e editar arquivos com os parâmetros programados;
- permitir programar trajetórias com diversos passes de solda;
- permitir programar passes com vários trechos;

### 3.3.1 Estrutura do *software*

Com os requisitos definidos, a próxima etapa consistiu no planejamento da programação das trajetórias. A figura 35 mostra o fluxograma proposto para a interface com todos os níveis de configuração.

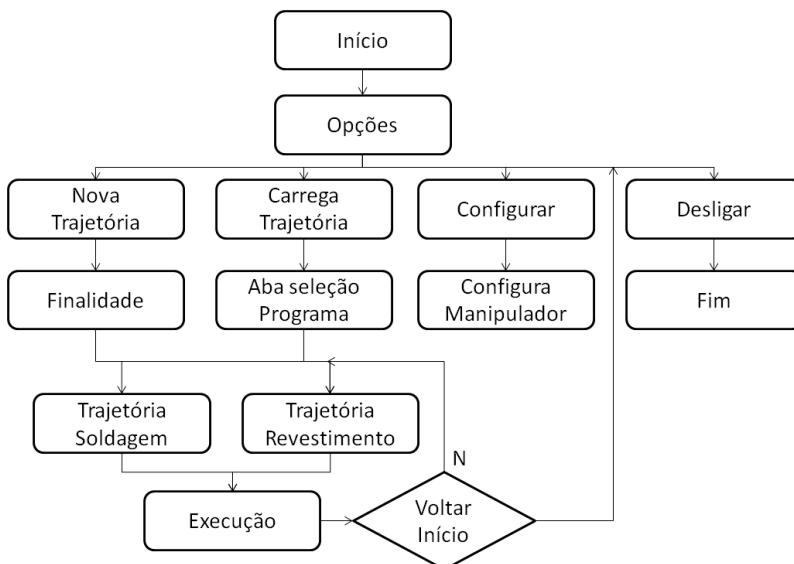


Figura 35 - Fluxograma da interface do usuário

Basicamente cada bloco do fluxograma representa uma tela da interface do usuário. Na tela de opções pode-se escolher entre uma nova trajetória, carregar uma trajetória salva, configurar o sistema e desligar o equipamento. Quando o usuário selecionar uma nova trajetória abrirá uma tela de finalidade, onde se poderá escolher entre a configuração de uma trajetória de soldagem ou de revestimento. Na tela de trajetória de soldagem, é possível determinar a quantidade de passes e trechos e as configurações de movimento. Por fim finalizada a programação vai-se

para a tela de execução onde é possível escolher os passes para execução e corrigi-los durante a soldagem.

Visando atender os requisitos e o fluxograma proposto e além de uma organização de *software*, foi estruturado um diagrama de classes para a interface do usuário, figura 36. É possível perceber que foi definido classes para as principais funcionalidades, como: a de interface, a da trajetória e a de trecho que abrange as telas e a programação dos passes e trechos de soldagem. Há também duas classes dedicadas à comunicação USB e serial e por fim uma de manipulação de arquivos que possibilita o salvamento e carregamento de uma trajetória de soldagem.

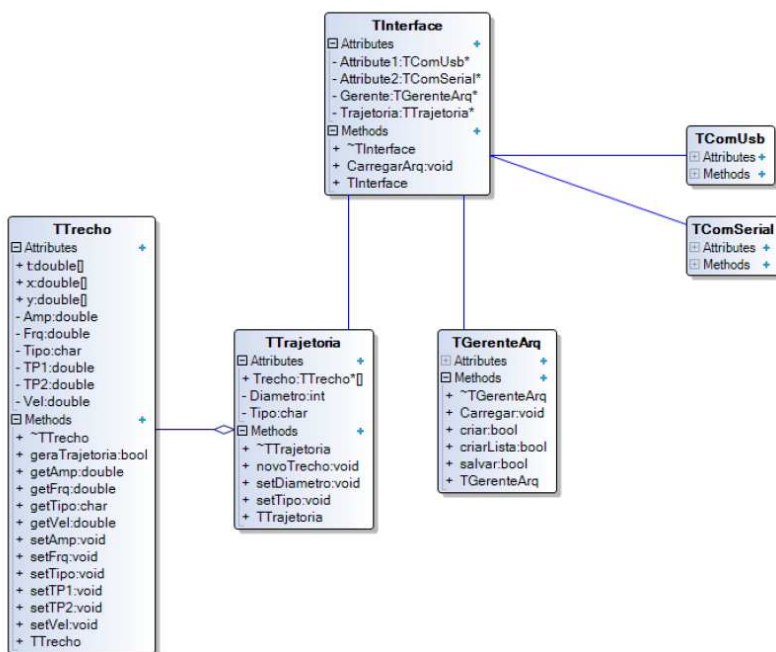


Figura 36 - Diagrama de classes da interface do usuário

### 3.3.2 Telas

As telas são a interface do usuário em si. Cada tela se comunica com a instância de *TInterface*, atualizando indiretamente valores nas instâncias de *TTrajetoria* e *TTrecho*. É importante salientar que a interface gráfica ainda sofrerá ajustes de design por um

profissional do ramo. Ela será utilizada através de uma tela sensível ao toque, portanto deve ter acessibilidade para tal, seus botões devem ser grandes o suficiente para serem acionados facilmente.

Todas telas são criadas juntamente com o início do programa. Apenas com a primeira tela visível. As outras telas ficam invisíveis até serem acionadas. Muitos objetos vistos nas telas são criados em tempo de execução, como os textos, gráficos e abas. Isto foi uma opção para que a memória utilizada pelo *software* seja utilizada de maneira inteligente e não haja um excesso de processamento no decorrer do uso do sistema.

Na tela inicial, figura 37, é possível iniciar a programação de uma nova trajetória, carregar uma trajetória previamente salva, configurar o sistema ou desligar o equipamento. Ao selecionar carregar trajetória, a tradicional janela de carregamento de arquivos do *Windows* aparece e basta o usuário carregar o arquivo correspondente à trajetória desejada.

Ao selecionar configurar, abre uma tela onde é possível configurar o sentido de deslocamento dos eixos e configurar se haverá disparo da fonte ou do equipamento. O primeiro disparo é responsável por acionar uma saída e ligar a fonte de soldagem e o segundo por disparar o movimento do Tartilope V2F através de um periférico externo.

O usuário ao selecionar uma nova trajetória abrirá uma tela de finalidade, onde conforme o fluxograma apresentado na figura 35 permitirá escolher configurar uma trajetória de soldagem ou de revestimento.

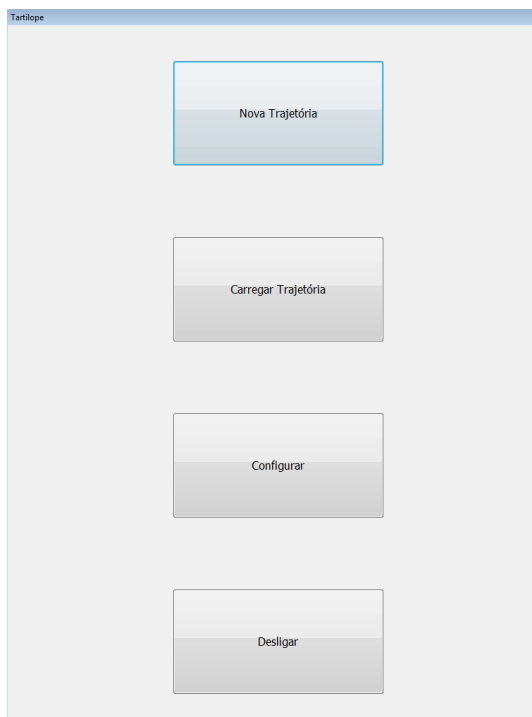


Figura 37 - Tela inicial

Com o usuário escolhendo uma trajetória de soldagem abrirá a tela exposta na figura 38, nesta será possível configurar os passes e trechos separadamente. Cada passe e/ou trecho poderá ser configurado com três tipos de movimentos diferentes: linear, triangular ou trapezoidal.

No detalhe da figura 38 pode-se perceber uma trajetória configurada para um segundo passe do trecho 1. Quando for selecionado um dos parâmetros para configuração da trajetória, aparecerá um teclado alfanumérico com o objetivo de facilitar as operações do equipamento em campo. E os botões Y- e X+ permitem configurar a sentido do movimento, sendo possível este ser no sentido positivo ou negativo.

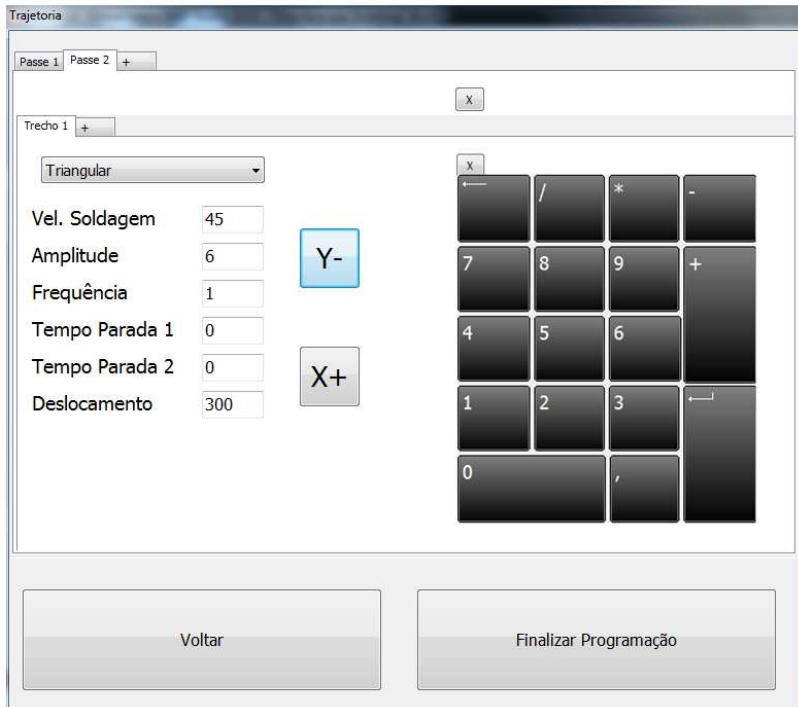


Figura 38 - Tela de configuração das trajetórias

Os procedimentos navais geralmente são realizados com mais de um passe, por isto uma das principais funcionalidades requisitas para esta interface é a possibilidade de incluir vários passes e trechos. Essa característica traz uma grande agilidade, visto que o operador poderá configurar os vários passes, posicionar o Tartilope V2F sobre a junta a ser soldada, e selecionar o passe a ser realizado e executar a soldagem. Estando todos estes passes facilmente acessíveis para serem selecionados.

A tela de execução, figura 39, é de grande importância por ser responsável pela execução do movimento programado e interação com o ambiente de soldagem. Esta tela é constituída por cinco itens. Em 1 tem-se o movimento manualmente do Tartilope V2F, permitindo atuar nos dois eixos e nos quatro sentidos possíveis de deslocamento. Há também um multiplicador, que permite dar um ganho na velocidade proporcionando maior agilidade no posicionamento do equipamento sobre a junta a ser soldada. O botão 0 deste item permite definir a

posição inicial de referência, permitindo depois de finalizada a trajetória de soldagem voltar automaticamente a esta posição.

Em 2 é possível salvar e carregar alguma trajetória que fora configurada e salva. Em 3 é onde são apresentados as abas contendo os passes e trechos configurados, permitindo o usuário selecioná-los para execução. Definido o passe e o posicionado na junta a ser soldada, são utilizados os botões em 4 para iniciar, pausar e parar o movimento.

As trajetórias programadas, muitas vezes precisam de pequenos ajustes, devido as imperfeições da junta ou mesmo para adequar o movimento aos parâmetros de soldagem. Assim, esses pequenos ajustes nos parâmetros de movimento poderão ser modificados em 6 na própria interface ou através do módulo de suporte a soldagem. Concluído essa etapa basta pressionar o botão de atualiza movimento para que seja alterada a trajetória do manipulador conforme os novos parâmetros de movimento.

Por fim em 5, o botão de modificar permite voltar à tela de configuração de trajetória para reconfigurar os parâmetros do movimento e o botão volta ao início à tela inicial.

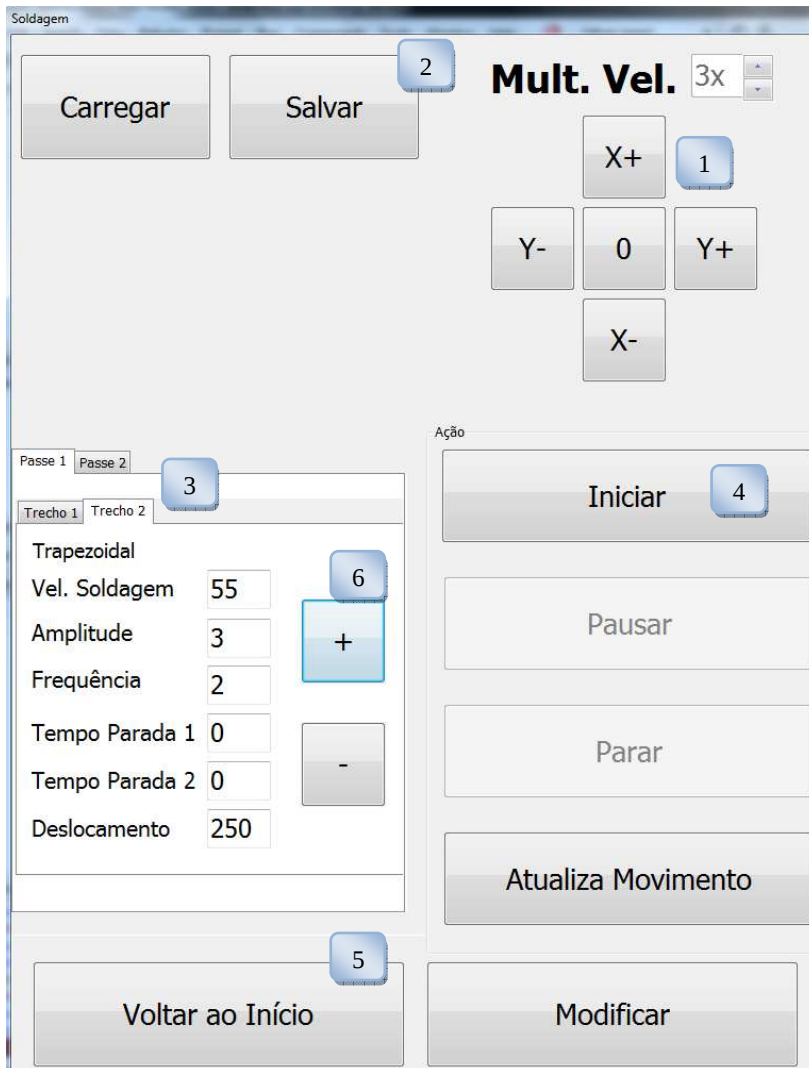


Figura 39 - Tela executar trajetória

### 3.3.3 Hardware Interface

O *hardware* da interface foi fundamentado em três componentes, uma placa mãe modelo PCM-9562 com um monitor sensível ao toque modelo XENARC 700TSV e para controle disto foi utilizado o sistema operacional Windows Embedded Standard 7.

A placa mãe é a base que permite a conexão do conjunto dos elementos essenciais do computador, através de um grande circuito impresso, que possui conectores para cartões de expansão, módulos de memória, processador e tantos outros elementos essenciais. A PCM-9562, figura 40, trabalha com um processador *dual core* Atom D510 com uma classificação *Thermal Power Design* de apenas 15 W, sendo ótimo para sistemas embarcados. Essa placa fornece uma solução otimizada *on-board* para processamento gráfico, contribuindo muito para o desenvolvimento da interface gráfica de configuração das trajetórias de soldagem [28].



Figura 40 - Placa mãe modelo PCM-9562 [29]

O design da PCM-9562 é baseado no fator de forma EBX e fornece suporte a expansão via PC/104, *slot* PCI e *PCI Express Mini*. Oferece todas as funções de um computador tipo industrial, mas ainda se encaixando no espaço de uma unidade de CD-ROM [29].

Esta placa inclui as seguintes características: seis portas seriais, oito portas USB, três portas Gig Ethernet, uma porta de áudio e um PS / 2 interface de teclado / *mouse*. A *built-in* de alta velocidade controlador de *driver* SATA suporta uma taxa de transferência máxima de 300MB por segundo. Suporta memória DDR2 tendo uma velocidade de processamento de 667 MHz [29].

O grande diferencial da escolha desta placa é o fato dela possuir um soquete embutido para leitura de cartão de memória do tipo *CompactFlash*, que traz a grande vantagem de poder substituir um disco

rígido, que trabalha com um disco em movimento com uma agulha que se desloca entre as trilhas lendo e escrevendo informações, mas em ambiente industrial que apresenta vibrações, este tipo de sistema de armazenamento de informações não é aconselhado. Já a *CompactFlash* a tecnologia de gravação e leitura é toda eletrônica, não tendo componentes mecânicos que sofrem com vibrações, tornando o sistema mais robusto e menos suscetível a erros e além de ser mais compacta.

O *Windows Embedded Standard 7* é um sistema operacional *multithread*, multitarefa e preemptivo. É um sistema altamente modular, na sua instalação é gerada uma imagem que é composta por uma coleção de componentes, que incluem o sistema operacional, bibliotecas de programação, interface de *hardware* e *drivers* de dispositivos [30].

Para a instalação deste sistema operacional foi utilizada uma ferramenta de montagem que permitiu criar e configurar uma estrutura customizada que inclui apenas os componentes necessários para rodar a interface do usuário para o sistema de geração de trajetórias para o Tartilope V2F. Permitindo utilizar um sistema operacional compacto que requer pouca memória, espaço de armazenamento e recursos de processamento para rodar [30].

Este sistema operacional possui suporte a várias características essenciais a interface desenvolvida e o *hardware* utilizado, como o suporte a processadores *multicore*, suporte a IDE C++ de programação com suporte *Silverlight* para suporte gráfico, comunicação USB melhorada e um dos principais componentes desejados que é o suporte a telas sensíveis ao toque [30].

Isto permitiu utilizar o monitor XENARC LCD 700-TSV, que possui uma tela de 177,8 mm de medida na diagonal, sensível ao toque com tecnologia *5-wire* resistivo e resolução de até 2400 x 480 sub-pixels. É uma tela compacta medindo apenas 198,4 mm x 121,6 mm x 35,3 mm, figura 41. Este conjunto de *hardware* utilizado para a interface de programação das trajetórias de soldagem trouxe muitas facilidades, principalmente pela não necessidade de utilizar um mouse e teclado para inserir os dados de programação das trajetórias de soldagem [31].



Figura 41 - Monitor sensível ao toque modelo XENARC 700TSV [31]

### 3.4 SISTEMA DE SUPORTE A SOLDAGEM

A interface do usuário apesar de ser bastante intuitiva e de fácil programação não é robusta suficiente para o ambiente de soldagem. Neste sentido foi desenvolvido um módulo portátil, resistente a salpicos e respingos destinado principalmente a substituir a interface do usuário nas tarefas de correção da trajetória durante a execução da soldagem. Suas características funcionais são:

- carregar trajetórias;
- movimentar manualmente os eixos;
- iniciar, corrigir e parar o movimento de soldagem;
- alterar parâmetros do movimento de soldagem;
- corrigir manualmente a trajetória de soldagem.

A meta foi o desenvolvimento de um controle portátil pequeno, robusto e resistente aos respingos de solda. Permitindo que o operador possa acompanhar a soldagem de perto, visualizando o deslocamento da tocha sobre a junta de soldagem e possibilitando que ao menor desvio da trajetória, possa corrigir manualmente a posição da tocha sobre a junta, de modo que a soldagem saia correta.

#### 3.4.1 *Hardware* sistema suporte a soldagem

Visando trabalhos futuros foi desenvolvido o *hardware* do módulo de suporte a soldagem com capacidade de operar manipuladores de até quatro eixos ao invés de apenas dois eixos. A primeira etapa para o desenvolvimento do *hardware* deste módulo foi à definição da melhor

localização das entradas e saídas de informações do ponto de vista do operador, figura 42.

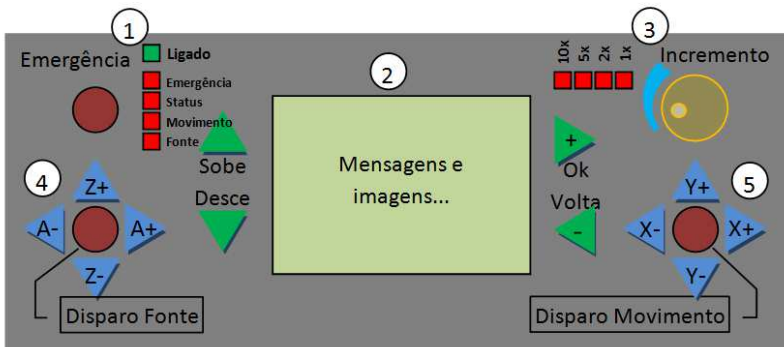


Figura 42 - Design sistema de suporte a soldagem

No módulo de suporte a soldagem, figura 42, há cinco regiões de interação com o operador. São elas:

1. Sinalização do estado do módulo, como ligado, emergência, *status*, movimento ativado e fonte de soldagem acionada, além de um botão de emergência, que quando pressionado desativa o movimento do manipulador e a fonte de soldagem;
2. LCD gráfico e seus quatro botões de navegação usados para programação e visualização de mensagens;
3. Botão de incremento ou decremento rápido com fator de multiplicação indicado por leds para ajustar de forma rápida o valor da variável selecionada no *display LCD*;
4. Botões para movimentação dos eixos Z e A e disparo da fonte de soldagem no modo manual;
5. Botões para movimentação dos eixos X e Y e comando de início ou parada do movimento no manipulador.

Como as exigências temporais e de processamento não são elevadas o respectivo controlador deste módulo de suporte a soldagem pode ser simples. Logo foi o Atmel AT89C55WD, figura 43, de arquitetura 8051 de 8 bits com 40 pinos, sendo 32 vias de I/O, 20 Kbytes de *flash* para memória de programa, 256 bytes de RAM, dois *timers*/contador, porta serial e duas interrupções externas. Para melhorar o desempenho do microcontrolador foi utilizado um cristal de 22,1184 MHz para se obter maior capacidade de processamento e

compatibilidade com a taxa de transmissão utilizada no padrão RS232 para comunicação com o PC do sistema de controle do manipulador.

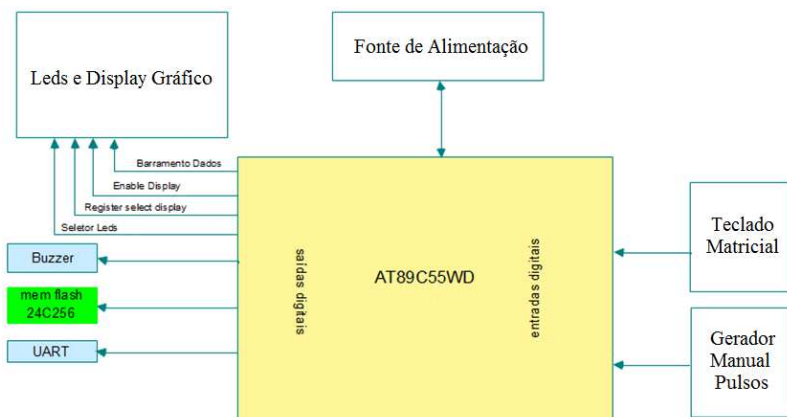


Figura 43 - Diagrama de blocos hardware sistema de suporte a soldagem

A partir destas definições de *hardware* pode-se partir para o desenvolvimento dos circuitos eletrônicos e da respectiva placa de circuito impresso, figura 44, para depois elaborar e validar o *software* do módulo sistema de suporte a soldagem.

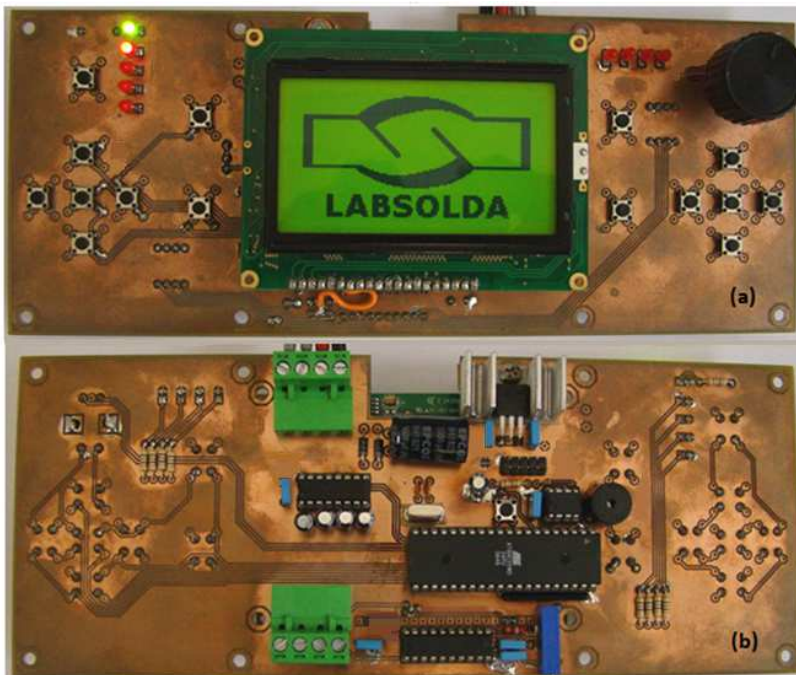


Figura 44 - Placa eletrônica do módulo de suporte a soldagem. Em (a) a frente e em (b) o verso

### 3.4.2 *Software* controle sistema suporte a soldagem

O *software* do sistema de suporte a soldagem, figura 45, foi programada em linguagem C e é composto por três módulos: comunicação, temporização e gerenciamento das telas.

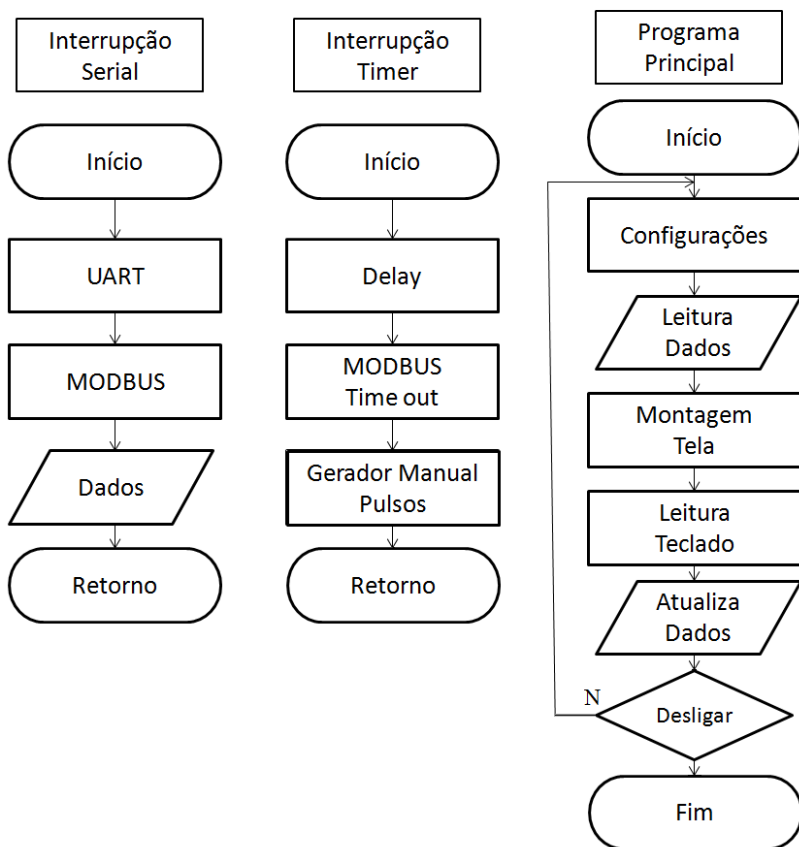


Figura 45 - Diagrama de Blocos Suporte a Soldagem

Por meio de uma interrupção do timer de 1 ms são realizadas as tarefas de atraso, leitura do gerador manual de pulsos e o controle do time out da comunicação Modbus. No gerador manual de pulsos é verificado o seu estado e comparado com o anterior, então o valor da posição é atualizado e consequentemente a variável selecionada. Quando na comunicação ocorre o time out é realizada a verificação dos dados recebidos para identificar um comando válido do protocolo Modbus e, caso seja, é emitida uma resposta e os buffers de entrada são esvaziados e os dados guardados para uma nova leitura de dados do canal serial com a interface do usuário.

A leitura do teclado no programa principal é estruturada de forma a permitir que seja efetuada a leitura de várias teclas

simultaneamente, mesmo se tratando de um teclado matricial. Isso é para possibilitar a movimentação manual em mais de um eixo ao mesmo tempo. Essa flexibilidade auxilia o operador para que o posicionamento possa ser efetuado de forma mais rápida.

O gerenciamento das telas foi realizado com uma máquina de estados, fazendo a navegação para a seleção das opções, alterações de configurações, além de exibir e alterar os parâmetros enviados pela interface do usuário que controla a configuração do movimento no Tartilope V2F. Os dados alterados nas telas são guardados num *buffer* e enviados serialmente para a interface do usuário para atualização do movimento do Tartilope V2F.

### 3.5 ACIONAMENTO DE MOTORES

Com o objetivo de ampliar a faixa de velocidade da tocha de soldagem foi necessário, além de estabelecer rampas de velocidade para o acionamento dos motores de passo, substituir os conjuntos, motor e *driver*, de ambos os eixos do manipulador Tartilope V2F. Inicialmente foram substituídos os antigos e comuns motores de passo do manipulador, por motores de mesmas dimensões, porém de alto torque, modelo HT23-401 do fabricante *Applied Motion*. O ganho de torque e, conseqüentemente aumento do valor de corrente elétrica, com esta substituição foi de 50 %.

Esse incremento de corrente em ambos os motores forçou a substituição dos antigos drivers do manipulador, figura 46(A), por outro com capacidade maior de corrente. Entre vários *drivers* existentes no mercado com capacidade de corrente suficiente para o acionamento dos motores HT23-401 foi selecionado o *driver* STR8, figura 46(B), também do fabricante *Applied Motion*.



Figura 46 - Drivers motor de passo; em A o Antigo driver Tartilope V2F [10] e em B o driver STR8 [32]

O principal motivo que levou a esta escolha foi que o *driver* STR8 otimiza, via uma chave de seleção conectada ao seu DSP, o acionamento de doze modelos de motor de passo onde, o modelo HT23-401 é um deles. A possibilidade de operar com tensão alta de barramento, até 75 V, é outra importante característica deste *driver* que melhora a qualidade da curva torque versus velocidade do motor de passo como pode ser observado na figura 47. Nesta figura, se verifica um incremento de 100% do torque do motor de passo modelo HT23-401 na velocidade de 15 rps quando a tensão de alimentação do *driver* é substituída de 24 V para 48 V.

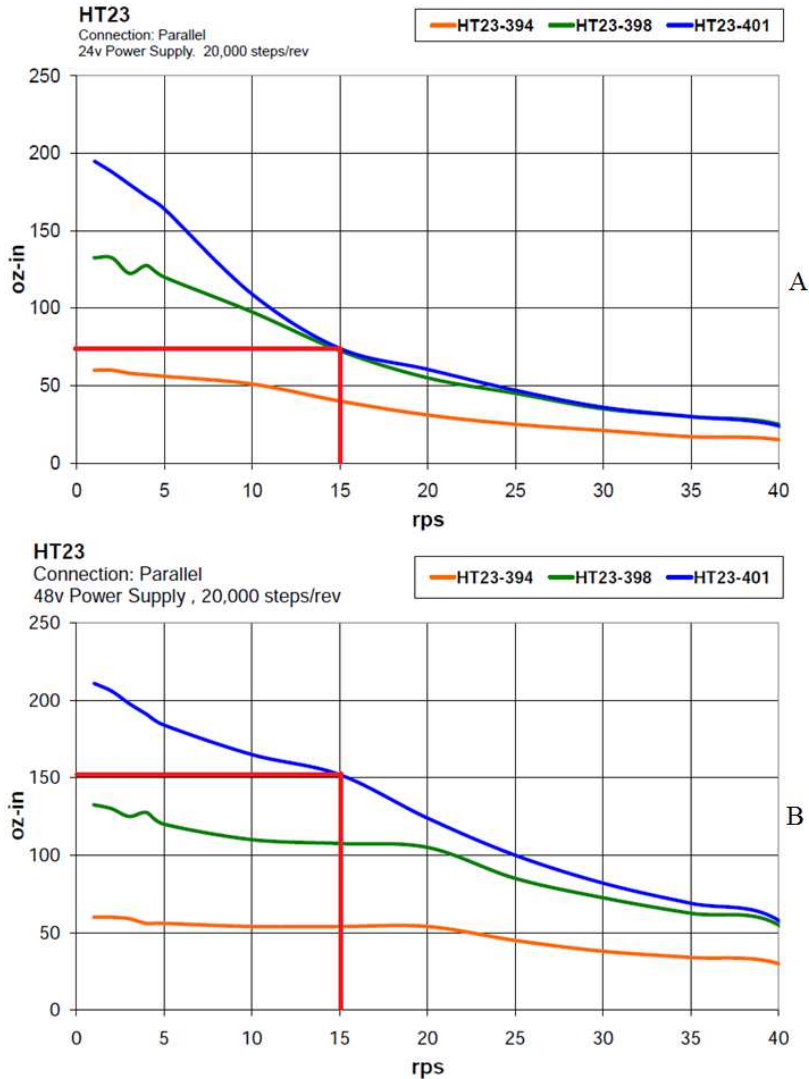


Figura 47 - Curva torque x velocidade do motor HT23. Em A com tensão de 24 V e em B com 48 V [32]

Com a escolha do *driver* STR8 fez-se necessário o desenvolvimento de uma fonte de alimentação dos motores e o circuito elétrico de intertravamento para proteção. A fonte de alimentação de corrente contínua dos *drivers* STR8, 70 V/8 A, é obtida a partir da rede

elétrica monofásica de 220 V/ 60 Hz por meio de um transformador abaixador seguido de um retificador a diodos e filtro capacitivo, figura 48(A). Entretanto, para alimentar os *drivers* é necessário que o contato RFM do relé esteja fechado, ou seja, a bobina deste relé deverá estar energizada no circuito lógico de intertravamento, figura 48(B).

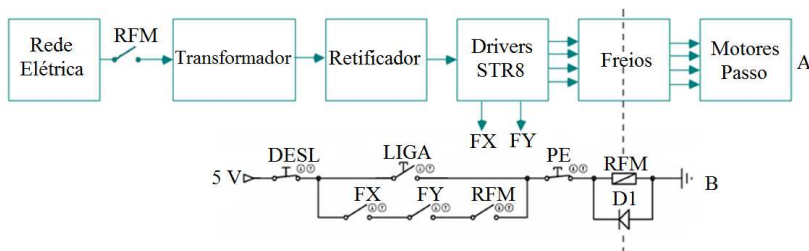


Figura 48 – Circuitos elétricos. Em A o de alimentação e em B o de intertravamento

O circuito de lógica intertravamento foi desenvolvido com o objetivo de evitar danos nas peças a serem soldadas e/ou na tocha por meio da interrupção do fornecimento de energia aos motores do manipulador nas seguintes situações: defeito elétrico em um *driver* ou motor (Fx e Fy) ou no acionamento manual do botão parada de emergência (PE).

A frenagem dos motores de passo é comandada também pelo circuito de intertravamento. O desenvolvimento do respectivo circuito de frenagem foi necessário nas situações em que o manipulador é desligado. Nessa condição cada motor depende apenas da sua inércia para manter o respectivo eixo imóvel. Para solucionar este problema utilizou-se de uma característica do próprio motor de passo. Quando suas bobinas são curto-circuitadas, o motor de passo adquire uma força contrária ao movimento que impede o eixo de se movimentar mesmo em condições desfavoráveis em relação à ação da força da gravidade.

### 3.6 UNIDADE DE CONTROLE DO MANIPULADOR

A primeira unidade de controle do manipulador, conforme mostra a figura 49, foi desenvolvida com o kit MCB2140 da keil em 1 e com a placa mãe PCM-9562 em 2 utilizando o monitor *touch* para seleção e configuração da trajetória de soldagem. Esta unidade foi de fundamental importância para o desenvolvimento das trajetórias de

soldagem, assim como o teste e calibração das velocidades dos eixos e dos movimentos programados.

Para os ensaios iniciais de acionamento dos motores do Tartilope V2F foram configurados e instalados os *drivers* STR8 em 3, e a placa da fonte dos *drivers* em 4. Uma fonte chaveada e um transformador em 5 foram utilizados para alimentar respectivamente a placa mãe PCM-9562 e os *drivers* dos motores via a placa da fonte.



Figura 49 - Primeira unidade de controle do manipulador

A segunda unidade de controle desenvolvida pode ser visualizada na figura 50. Esta já consta com a placa de *hardware* desenvolvida em 1, placa mãe em 2 e um adaptador de *compact flash* no em 3. Neste protótipo optou-se por um modelo de placa mãe mais simples em função dos custos de importação do modelo PCM-9562. Em 4 encontra-se os transformadores de alimentação, tanto de potência para os *drivers* de motor de passo quanto os de sinal para alimentação do *hardware* marcada em 1 e em 5 encontra-se o painel frontal deste protótipo, onde tem-se os botões para ligar o sistema e acionar a potência, além dos conectores para acionamento da fonte de soldagem e para conexão dos sinais de tensão e corrente da fonte de soldagem. E por fim o conector de alimentação dos motores de passo do Tartilope

V2F.

Na figura 51 é apresentado o lado esquerdo do painel eletroeletrônico de controle e acionamento do Tartílope V2F, em 1 encontra-se os *drivers* para acionamento dos motores de passo e em 2 a placa eletrônica desenvolvida do circuito de alimentação e de freio dos motores de passo. E em 3 encontra-se a fonte chaveada que alimenta a placa-mãe utilizada no protótipo.

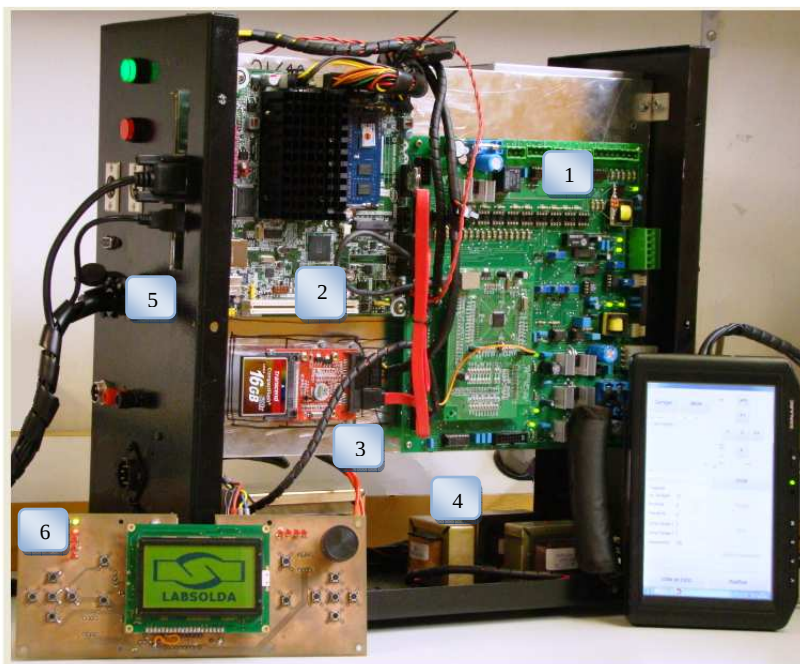


Figura 50 - Lado direito do painel eletroeletrônico de controle e acionamento do Tartílope V2F



Figura 51 – Lado esquerdo do painel eletroeletrônico de controle e acionamento do Tartilope V2F

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

No presente capítulo são descritos os principais equipamentos utilizados e as características de cada ensaio para avaliar experimentalmente o novo sistema de controle do Tartílope V2F. O referido desenvolvimento exposto no capítulo anterior é aqui avaliado em uma situação real de soldagem. Por fim, são apresentados resultados práticos de soldagem em laboratório simulando situações típicas encontradas na soldagem naval.

### 4.1 DESCRIÇÃO DA BANCADA

Uma bancada de ensaios de soldagem MIG/MAG na posição vertical, figura 52, foi montada com o objetivo de validar a geração e também a correção de trajetórias. Em 1 tem-se o gabinete eletroeletrônico do Tartílope V2F juntamente com a interface do usuário destinada a programação e correção de trajetórias de soldagem. O manipulador Tartílope V2F é representado em 3 enquanto que a fonte de soldagem multiprocesso MTE Digitec 600 é identificada em 2. Em 4 tem-se o corpo de prova a ser soldado com seu mecanismo de fixação.



Figura 52 - Equipamentos da bancada de simulação da soldagem naval

Os corpos de prova utilizados são chapas de aço carbono (SAE1020) com 200 mm de comprimento, 75 mm de largura e 16 mm de espessura. Estes corpos de prova foram soldados pelo Tartílope V2F com o processo MIG/MAG convencional na posição vertical ascendente e também descendente. Como material de adição foi usado o arame maciço ER70S-6 de 1,2 mm de diâmetro. O gás empregado foi uma mistura, 75% argônio e 25% de dióxido de carbono, com vazão de 12 l/min.

## 4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS

Inicialmente foi realizado um ensaio com o objetivo de se determinar as máximas velocidades dos eixos do manipulador de soldagem. Para isso foi fixado no flange do manipulador uma tocha de solda refrigerada padrão, figura 52. Cada eixo foi acionado na condição mais desfavorável, ou seja, na situação em que o sentido de seu movimento é contrário à ação da força da gravidade. Foram obtidos, sem perda de passo nos motores, 6,6 m/min e 7 m/min como velocidades máximas dos eixos X e Y respectivamente.

### 4.2.1 Soldagem com alta velocidade de tecimento

Uma das metas deste trabalho de dissertação foi o de ampliar as velocidades dos eixos do manipulador de soldagem. Incrementando a velocidade do eixo X torna o manipulador mais rápido para o posicionamento no início dos cordões de solda enquanto que aumentando a velocidade do eixo Y proporciona um movimento de tecimento da tocha com maior amplitude. Dessa forma, consegue-se realizar cordões de solda mais largos e de menor altura que são ideais para as tarefas de revestimento de superfícies e de passes finais em juntas do tipo V.

Buscando explorar esta característica foi realizado o cordão de solda da figura 53 no sentido vertical descendente com os seguintes parâmetros de movimento: 100 mm de comprimento de cordão de solda com 180 mm/min de velocidade (eixo X), 13 mm de amplitude e 4,5 Hz de frequência de tecimento do tipo trapezoidal com tempo de parada nas extremidades de 0,01 s. Com esses parâmetros de tecimento se obtém uma velocidade do eixo Y de aproximadamente 7 m/min que é inferior ao limite de 12 m/min.



Figura 53 - Cordão de solda realizado com alta velocidade de tecimento

Os parâmetros de soldagem usados neste ensaio foram: 20,3 V de tensão de arco e 3 m/min de velocidade de alimentação do arame. Estes parâmetros não sofreram alterações nos próximos ensaios realizados. Com ambos conjuntos de parâmetros, movimento e soldagem, obteve-se um cordão de solda, figura 53, sem descontinuidades e com a seguinte geometria: 15,2 mm de largura média e 1,8 mm de altura máxima.

#### 4.2.2 Soldagem por trecho e capacidade de correção

Os próximos ensaios focaram a característica de programação por trechos de cordão de solda no Tartilope V2F. Essa necessidade de programação é decorrente dos casos em que há alteração da geometria da junta ou da posição de soldagem.

Nesse sentido foi realizado o cordão de solda da figura 54 com 100 mm de comprimento e velocidade de 180 mm/s na posição vertical descendente. Este cordão é formado por dois trechos de mesmo comprimento com distintos parâmetros de movimento. No trecho A, a amplitude do tecimento triangular de 4,5 Hz do eixo Y é de 13,0 mm enquanto que no trecho B é de 9,0 mm.

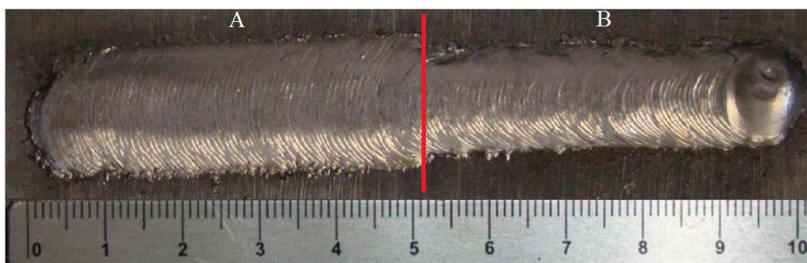


Figura 54 - Programação por trechos, em A 13,0 mm de amplitude e em B 9,0 mm

Com ambos valores de amplitude de tecimento do eixo Y, obteve-se um cordão de solda, figura 54, sem discontinuidades e com boa geometria. No trecho A apresentou um cordão de solda de 14,8 mm de largura média por 2,0 mm de altura máxima enquanto que no trecho B essas dimensões foram respectivamente 11,9 mm e 2,5 mm.

Em outro teste de programação por trecho foi realizado o cordão de solda da figura 55 com 100 mm de comprimento e velocidade de 180 mm/s na posição vertical descendente. Este cordão de solda é formado por dois trechos de mesmo comprimento com distintos parâmetros de movimento. No trecho A, a frequência de tecimento triangular de 13,0 mm de amplitude do eixo Y é de 4,5 Hz enquanto que no trecho B é de 1,0 Hz.

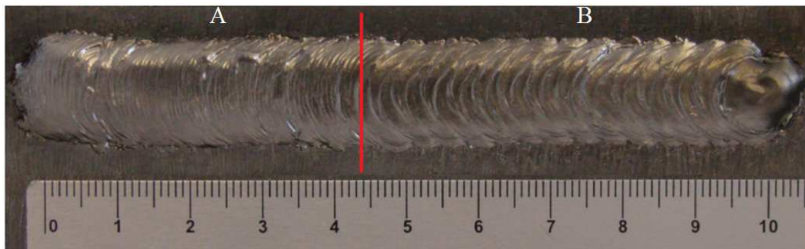


Figura 55 - Programação por trechos, em A 4,5 Hz de frequência e em B 1 Hz

Com ambos valores de frequência de tecimento do eixo Y, obteve-se um cordão de solda, figura 55, sem discontinuidades e com boa geometria. No trecho A o cordão de solda tem 15,4 mm de largura média por 2,3 mm de altura máxima enquanto que no trecho B essas dimensões são respectivamente 14,6 mm e 2,5 mm.

Assim como a possibilidade de programar trechos, outra característica fundamental durante a soldagem é a correção dos parâmetros de movimento da tocha. Explorando essa característica foi realizado o cordão de solda da figura 56 no sentido vertical descendente com os seguintes parâmetros de movimento: 180 mm/min de velocidade de soldagem (eixo X), 13 mm de amplitude e 4,5 Hz de frequência de tecimento do tipo trapezoidal com tempo de parada nas extremidades de 0,01 s.

Durante a execução deste cordão de solda foram realizadas duas correções do eixo de simetria do tecimento. Na primeira correção o eixo de simetria foi deslocado de 9,0 mm de forma suave no sentido Y positivo e a seguir foi de 4,0 mm no sentido Y negativo na segunda

correção. Esta forma de correção é fundamental para a soldagem naval, em vista dos desvios geométricos das juntas, possibilitando o operador corrigir a posição da tocha no chanfro.



Figura 56 - Correção da linha de simetria do tecimento

Explorando a correção dos parâmetros de movimento fez-se o cordão da figura 57 que tem 13,0 mm de amplitude e 4,5 Hz de frequência de tecimento trapezoidal e com correção na velocidade de soldagem. O lado indicado com a letra A foi executado com uma velocidade de soldagem de 280 mm/min. No centro do cordão de solda houve uma correção suave de velocidade para 180 mm/min.

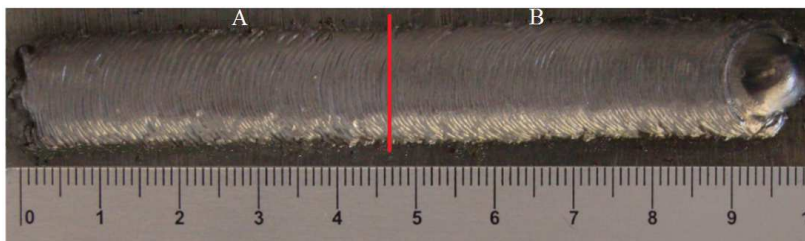


Figura 57 - Correção na velocidade de soldagem

A mudança aparente foi bem pouca, mas do lado A percebe-se que o perfil de solidificação está mais afastado que em B. No trecho A o cordão de solda tem 14,7 mm de largura média por 2,0 mm de altura máxima enquanto que no trecho B essas dimensões são respectivamente 15,0 mm e 2,2 mm.

### 4.2.3 Soldagem por passes

O ensaio final para validação do gerador de trajetórias desenvolvido foi a soldagem de uma junta típica, figura 58, encontrada na indústria naval. Para isto foi obtido de forma experimental na posição vertical ascendente, figura 59, o conjunto correto de parâmetros de movimento, tabela 4.

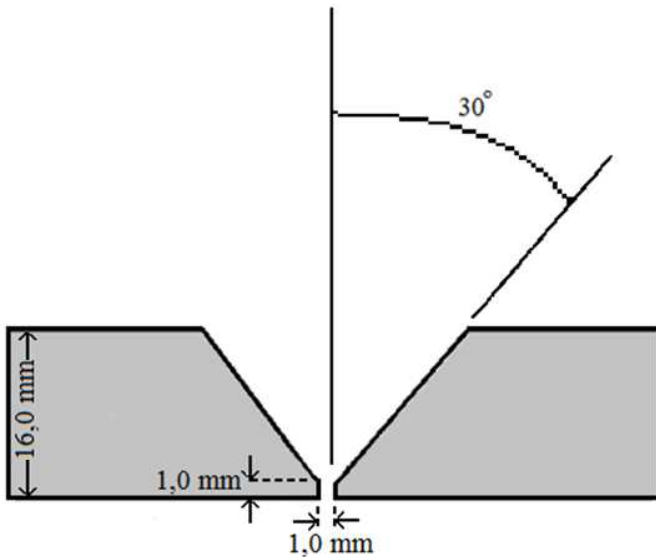


Figura 58 - Geometria da junta em V.



Figura 59 - Soldagem da junta da figura 58 com o Tartílope V2F

Tabela 4 - Parâmetros de movimento para soldagem da junta da figura 58

| Parâmetros          | Unidade | Passe<br>1 | Passe<br>2 | Passe<br>3 | Passe<br>4 |
|---------------------|---------|------------|------------|------------|------------|
| Velocidade soldagem | mm/min  | -          | 120        | 90         | 60         |
| Amplitude           | mm      | -          | 6,0        | 9,5        | 14,0       |
| Frequência          | Hz      | -          | 0,8        | 0,6        | 0,5        |
| Tempos de parada    | s       | -          | 0,4/0,4    | 0,45/0,45  | 0,45/0,45  |

Neste ensaio o passe 1, conhecido como passe de raiz, foi executado de forma manual enquanto que os passes 2, 3 e 4 de preenchimento da junta foram realizados com o Tartílope V2F. Os

parâmetros de soldagem usados em todos os passes deste ensaio foram: 18,0 V de tensão de arco e 3,2 m/min de velocidade de alimentação do arame.

A foto da figura 60 mostra os três passes de preenchimento realizados pelo Tartilope V2F referente a soldagem da junta da figura 58. O excelente resultado obtido é devido ao correto conjunto de parâmetros de movimento e de soldagem e principalmente da possibilidade do operador realizar pequenas correções na trajetória durante a soldagem.



Figura 60 - Resultado da soldagem de passes da junta da figura 58

## 5 CONCLUSÕES

Este trabalho é o resultado dos conhecimentos aplicados de várias áreas do conhecimento em engenharia. Por ter como objetivo principal a solução de um problema complexo no setor de soldagem naval, o trabalho requereu, inclusive, a aquisição de sensibilidade na determinação do conjunto de parâmetros de soldagem e de movimento.

O novo sistema de controle do Tartílope V2F desenvolvido nesta dissertação proporcionou várias melhorias em relação ao antigo. A principal delas foi o aumento de 412% na velocidade do eixo X e 186% na velocidade do eixo Y do manipulador sem alteração da relação de transmissão de movimento dos respectivos eixos. Estes incrementos permitiram maior rapidez no posicionamento do manipulador e possibilidade de utilizar alta velocidade de tecimento e consequentemente tempos de parada maiores nas extremidades laterais da trajetória do cordão de solda.

Outro avanço foi na interface com o usuário sensível ao toque que permitiu criar telas ricas em detalhes e informações, facilitando desta forma a seleção e a configuração da trajetória desejada. O grande diferencial em relação à antiga interface do usuário e até modelos comerciais é a possibilidade de programar as trajetórias de soldagem por trechos e/ou por passes.

A metodologia de correção de trajetórias foi testada tanto pela interface com o usuário quanto pelo dispositivo de suporte a soldagem. Em ambos os casos foi possível o operador executar com sucesso correções em todos os parâmetros da trajetória: velocidade de soldagem, posição da linha de simetria do tecimento, amplitude e frequência do tecimento transversal.

Ótimos resultados foram obtidos nos ensaios de soldagem MIG/MAG em laboratório, principalmente no preenchimento por três passes de uma junta do tipo V, típica da indústria naval. O sucesso destas soldagens realizadas se deve à correta implantação das funcionalidades desenvolvidas de programação e de correção de trajetória.

Adicionalmente, este trabalho servirá como base para futuras pesquisas no que tange à área de automação da soldagem, permitindo facilmente expandir o número de eixos controlados e a possibilidade de implantar novos tipos de tecimentos e funcionalidades ao sistema de controle de manipuladores do tipo cartesiano. Além disto, o projeto gerou ao longo de três anos aperfeiçoamento dos recursos humanos e

tecnológicos, que produziu subsídios para a continuidade desta linha de pesquisa promissora no LABSOLDA.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho gerou a possibilidade de expansão dos diversos módulos do sistema de controle do manipulador Tartilope V2F criando vertentes para futuros desenvolvimentos, a saber:

- implantar a programação referente ao tecimento longitudinal e a lógica de sincronismo com a fonte de soldagem para alteração do processo de soldagem e/ou parâmetros durante a execução da trajetória;
- desenvolver a correção automática da trajetória, via a leitura das variáveis do arco e outros princípios;
- expandir o sistema de controle desenvolvido para aplicação em manipuladores do tipo cartesiano com quatro e cinco graus de liberdade.



## REFERÊNCIAS

- [1] Transportes. **História da indústria naval** [Online] [citado em 23 de julho de 2011.] <http://www2.transportes.gov.br/bit/estudos/Eng-naval/historia.htm>
- [2] EconomiaBr. **Indústria Naval** [Online] [ citado em 23 de julho de 2011.] [http://www.economiabr.com.br/Ind/Ind\\_producao.htm#Naval](http://www.economiabr.com.br/Ind/Ind_producao.htm#Naval)
- [3] JESUS, C. G. GITAHY, L. M. C. **Transformações na Indústria de Construção Naval Brasileira e seus Impactos no Mercado de Trabalho (1997-2007)**. 1º Congresso de Desenvolvimento Regional de Cabo Verde. 2008
- [4]Shipweld. **Automatic Welding Process for the Shipbuilding Industry** [Online] [citado 23 de julho de 2011]. <http://www.shipweld.org/>
- [5] Transportes. **História Naval Global** [Online] [citado em 23 de julho de 2011.] <http://www2.transportes.gov.br/bit/estudos/constr-naval/industria-global.pdf>
- [6] Diário do Pré Sal. **Lançado ao mar o navio petroleiro “Sergio Buarque de Holanda” no RJ** [Online] [citado em 24 de julho de 2011.] <http://diariodopresal.wordpress.com/2010/11/19/lancado-ao-mar-o-navio-petroleiro-sergio-buarque-de-holanda-no-rio-de-janeiro/>
- [7]AMANTE, D. A. M. **Imperfeições de Fabricação na Construção Naval e Offshore**. Rio de Janeiro: Projeto de Fim de Curso, Dept. Engenharia Naval,UFRJ, Fev. 2006
- [8]PINTO; M. M. O. STUPELLO; B. CARDOSO; J. S. L. ANDERSON; V. L. **Desenvolvimento e Aplicação de Métodos para Definição da Estrutura de Produto de um Navio Tanque (SUEZMAX) com aplicação de Planejamento, Programação e Controle da Produção num Estaleiro**. São Paulo: Relatório Final, Dept. Engenharia Naval e Oceânica, USP, Nov 2007.
- [9]FEDELE, R. A. **Soldagem na Indústria Naval Moderna: Materiais e Processos**. Revista Soldagem e Inspeção. Ano 6. Nº 9 – Suplemento Técnico BR, 2000.
- [10]BROERING, C. E. **Desenvolvimento de sistemas para a Automação da Soldagem e do Corte Térmico**. Florianópolis:

Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 2005.

[11]CARVALHO, R. S. **Tartilope V4: Robô CNC para a Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade**. Florianópolis: Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, Fev 2009.

[12]PUHL, E. B. **Desenvolvimento de Tecnologias no Processo MIG/MAG para Aumento de Produtividade e Melhoria da Qualidade mediante o uso da Polaridade**. Florianópolis: Dissertação de Mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 2011.

[13]PIRES; J. N. LOUREIRO; A. BÖLMSJO; G. **Welding Robots – technology, System Issues and Applications**. London: Springer, 2006

[14]CARVALHO, R. S. **Desenvolvimento de Sistema Robótico Integrado para Automatização da Soldagem na Indústria Naval**. Florianópolis: Relatório Técnico Parcial, Dept. Engenharia Mecânica, UFSC, Jan 2010.

[15]SPS. **Manual Tartilope V2- Sistema de deslocamento automático que permite a realização de soldas e cortes em qualquer posição, com deslocamento automático em dois eixos**. Florianópolis: SPS, 2009.

[16]INROTECH. **Innovative Robotic Technologies** [Online] [citado 12 de agosto de 2011]. <http://www.inrotech.com/>

[17]ESAB. **Railtrac 1000-A – unique, flexible, multi-purpose system for welding and cutting. Operating Manual**. [Online] [citado 12 de agosto de 2011]. [http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/automatizacao/upload/Catalogo\\_Railtrac\\_FW1000.pdf](http://www.esab.com.br/br/por/Produtos/automatizacao/upload/Catalogo_Railtrac_FW1000.pdf)

[18]BUG-O SYSTEMS. **Six Ways – Automating your Welding and Cutting can Save your money!** [Online] [citado 12 de agosto de 2011]. <http://www.bugo.com/pdf/Six%20Way%20Bro.pdf>

[19]SICILIANO, B. KHATIB, O. **Handbook of Robotics**. London: Springer, 2008.

- [20]SICILIANO; B. SCIAVICCO; L. VILLANI; L. ORIOLO; G. **Robotics – Modelling, Planning and Control**. London: Springer, 2009.
- [21]SANTOS, V. M. F. **Robótica Industrial – Apontamentos Teóricos**. Portugal: Universidade de Aveiro, 2004.
- [22]LAGES, W. F. **Geração de Trajetórias**. Brasil: Universidade Federal do rio Grande do Sul, 2005.
- [23] COSTA, H. C. **Aplicação de Técnicas de Modelagem e Controle em Sistemas Tipo Ponte Rolante**. Rio de Janeiro: Dissertação de Mestrado, Dept. Ciência em Engenharia Elétrica, IME, 2010.
- [24] AVOLIO, E. **Uma Contribuição ao Estudo e Desenvolvimento de Sistemas de Movimento Utilizando Motores de Passo**. Bauru: Tese de Livre-Docente, Programa de pós-graduação em Engenharia Elétrica, UNESP, 2004.
- [25]KEIL TOOLS BY ARM. **MCB2140 Evaluation Board**. [Online] [citado 8 de setembro de 2011]. <http://www.keil.com/mcb2140/>
- [26]AXELSON, J. L. **USB Complete: Everything you need to develop USB**. New York: Lakeview Research, 2001.
- [27]DEITEL, H. M. DEITEL, P. J. **C++ como programar: apresentando projeto orientado a objeto com UML**. Porto Alegre: Bookman, 2002.
- [28]ADVANTECH EMB'CORE. **Three Advantech Embedded Boards 2011 Taiwan Excellence Award**. [Online] [citado 12 de setembro de 2011].[http://www.advantech.com.br/embcore/News.aspx?doc\\_id=%7B6192457A-8B30-4B6C-BA73-C0559899423](http://www.advantech.com.br/embcore/News.aspx?doc_id=%7B6192457A-8B30-4B6C-BA73-C0559899423).
- [29]ADVANTECH EMB'CORE. **PCM-9562**. [Online] [citado 12 de setembro de 2011].[http://origindownload.advantech.com/ProductFile/PIS/PCM-9562/Product%20-%20Datasheet/PCM-9562\\_DS20110517141537.pdf](http://origindownload.advantech.com/ProductFile/PIS/PCM-9562/Product%20-%20Datasheet/PCM-9562_DS20110517141537.pdf)
- [30]PHUNG, D. JONES, D. JOUBERT, T. **Professional Windows Embedded Compact 7**. Indianapolis: John Wiley, 2011.
- [31]XENARC TECHNOLOGIES. **Xenarc 700 YH**. [Online] [citado 18 de setembro de 2011]. <http://www.xenarc.com/product/700yh.html>.

- [32]APPLIED MOTION. **Hardware Manual STR4 & STR8 Step Motor Drives**. [Online] [citado 25 de setembro de 2011]. [http://www.applied-motion.com/sites/default/files/hardware-manuals/STR\\_Hardware\\_Manual.pdf](http://www.applied-motion.com/sites/default/files/hardware-manuals/STR_Hardware_Manual.pdf)
- [33]SOUZA, D. R. **Microcontrolador ARM7 – Philips – Família LPC213X o Poder dos 32 bits**. São Paulo: Ed. Érica, 2010.
- [34]OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno 5ª Edição**. São Paulo: Pearson Education, 2011.

## APÊNDICE A – Histórico do Manipulador Tartilope V2F

Devido à importância tecnológica, o LABSOLDA vêm realizando pesquisas na área de manipuladores de soldagem. Ao longo do tempo foram desenvolvidos quatro modelos, que buscam trazer tecnologia de ponta nacional para o ambiente de soldagem.

Um destes manipuladores desenvolvido foi chamado de Tartilope V1 que é um sistema de deslocamento automático de tocha. Este equipamento permite a realizar soldas e cortes em qualquer posição. A faixa de velocidade de deslocamento varia de 5 a 160 cm/min, com resolução de 0,2 cm/min. Este manipulador de um grau de liberdade pode ser utilizado nos processos de soldagem MIG, TIG, Plasma, oxicorte e corte por plasma.

Outro manipulador desenvolvido, com dois graus de liberdade para as aplicações em processos de soldagem e de corte de chapas metálicas, foi chamado de Tartilope V2, figura 61. O objetivo deste manipulador é a realização de cordões de solda utilizando o movimento de tecimento com correção de trajetória via joystick pelo operador ou de forma automático com o sistema de seguimento de junta. Uma das grandes vantagens que o Tartilope V2 proporciona é a repetibilidade de trajetórias de soldagem.



Figura 61 - Tartilope V2

O sistema é composto basicamente de três módulos: teclado, módulo eletrônico e dispositivo mecânico.

- O teclado possui a função de interface com o usuário. É composto por doze teclas e um display de cristal líquido, onde são apresentadas as informações de forma simplificada e clara para proporcionar facilidade e agilidade no manuseio do sistema;
- módulo eletrônico que processa e gera a trajetória de soldagem. Possui dois *drivers* de acionamento que aplicam os sinais necessários para o correto acionamento dos motores de passo;
- o dispositivo mecânico é composto de um carro móvel, o qual se desloca sobre um trilho rígido com 1,18 m de comprimento. Os trilhos podem ser encadeados de forma a permitir soldagens ou cortes de grande extensão;

O Tartílope V2 permite apenas aplicação em superfícies planas, por isto foi desenvolvido um manipulador que pudesse ser aplicado em superfícies curvas, o qual foi denominado Tartílope V2F. Este manipulador possui dois graus de liberdade, eixos de orientação X e Y, capaz de mover uma tocha de soldagem rente a uma superfície curva sem variar a DBCP.

Analisando em detalhes, percebe-se que o Tartílope V2F é um equipamento bem complexo e o seu sistema de geração de trajetórias segue a lógica detalhada na figura 62. A CPU é um PC104, que é um computador compacto dedicado a aplicações industriais, permitindo implementações robustas e confiáveis. Conforme pode-se reparar o sistema do equipamento é centralizado no PC104, sendo este responsável pela interface com o usuário e a geração das trajetórias de soldagem e comando para os *drivers* de acionamento dos motores.

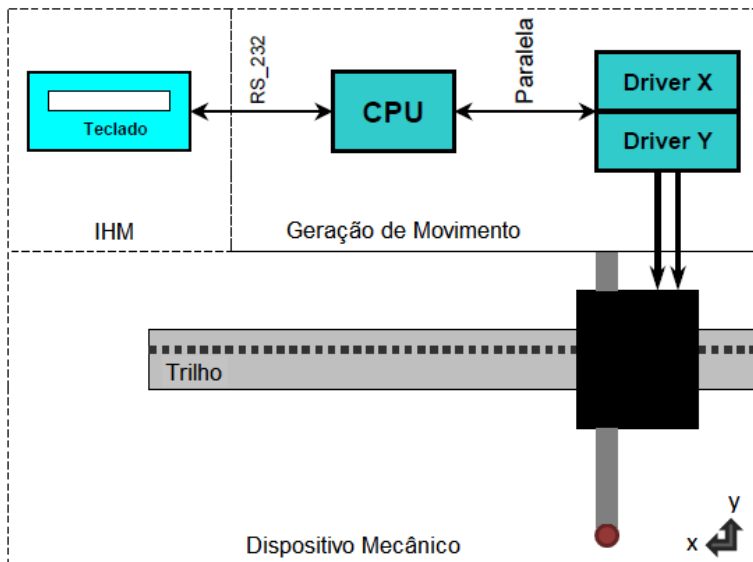


Figura 62 - Diagrama de Blocos Tartilope V2F

O PC104 controla o manipulador através de canais de interrupção, sendo estas geradas via *hardware*. Das várias interrupções que o PC104 possui apenas três estão disponíveis para uso, sendo que duas foram usadas para o comando dos motores do eixo X e do eixo Y e a outra para o sistema de correção de trajetória e seguimento de junta.

Tendo em vista que o novo sistema de controle desenvolvido para a família de manipuladores do LABSOLDA controla até 6 eixos, esta limitação de número de interrupções é um agravante.

A CPU envia o tempo de contagem ao timer, que quando atinge o tempo de contagem correto gera uma interrupção externa ao PC104, onde o *software* de controle trata esta interrupção e gera o comando no motor de passo. Isto é uma das grandes limitações da estrutura de PC104 utilizada neste projeto, pela inviabilidade de expansão do número dos eixos, outra limitação é a placa de controle, figura 63, que foi desenvolvida a pelo menos uns dez anos e muitos dos componentes eletrônicos ali presentes já se encontram obsoletos e de difícil aquisição.

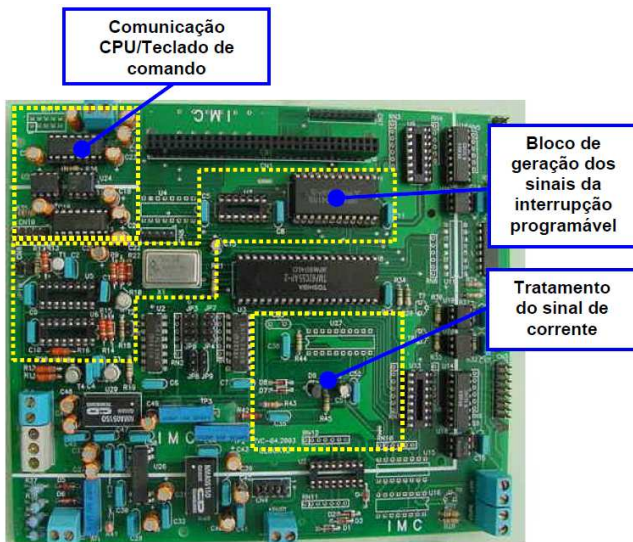


Figura 63 - Placa de Controle PC104

O *software* de controle foi feito todo em linguagem C, mas devido à complexidade das funcionalidades do equipamento a sua programação ficou extensa e de difícil compreensão. Com o tempo viu-se a necessidade de novas aplicações e funcionalidades para tornar o Tartilope V2F apto para os procedimentos de soldagem naval. Havia a necessidade de varias melhorias, como o desenvolvimento de uma IHM mais intuitiva que permita trabalhar com passes e trechos de soldagem e o aumento de velocidade dos eixos, mas com todas as limitações de *hardware* e *software* esta tarefa se tornaria muito exaustiva e a qualidade do desenvolvimento seria limitada.

Tendo em vista estas problemáticas e as futuras aplicações do sistema de controle a outros manipuladores do LABSOLDA com mais graus de liberdade, teve-se a necessidade do desenvolvimento de um novo sistema de *hardware* e *software* de controle, numa plataforma flexível que permita o controle de até seis graus de liberdade, possibilite a leitura de sinais de tensão e corrente do arco elétrico para correção automática da trajetória de soldagem e a possibilidade de correção via operador de todos os parâmetros da trajetória durante a soldagem.

Com a necessidade do desenvolvimento de um novo *hardware* de controle, viu-se a necessidade da mudança da plataforma de processamento. Poderia ser mantida a plataforma PC104, mas com um modelo mais atual, entretanto foi descartado, em função das

dificuldades de trabalhar com uma estrutura PC não dedicada ao controle de periféricos, com isto levando ao estudo de microcontroladores.