

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

**ROBÔ CNC PARA A AUTOMAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG EM POSIÇÕES E
SITUAÇÕES DE EXTREMA DIFICULDADE**

**Dissertação submetida à
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
para obtenção do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

RENON STEINBACH CARVALHO

Florianópolis, Fevereiro de 2009

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

**ROBÔ CNC PARA A AUTOMAÇÃO DA SOLDAGEM MIG/MAG EM POSIÇÕES E
SITUAÇÕES DE EXTREMA DIFICULDADE**

RENON STEINBACH CARVALHO

Esta dissertação foi julgada e adequada para obtenção do título de
MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA

Sendo aprovada em sua forma final

Prof. Jair Carlos Dutra, Dr.Eng. – Orientador

Prof. Nelso Gauze Bonacorso, Dr.Eng. – Co-orientador

Prof. Eduardo Alberto Fancello, D.Sc. – Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA

Prof. Carlos Alberto Martin, Dr.Ing.

Prof. Edson Roberto De Pieri, Dr.

Prof. Américo Scotti, Ph.D.

Raul Gohr Júnior, Dr. Eng.

Aos meus pais, Renato e Marivone,
À minha namorada, Flávia.

AGRADECIMENTOS

Ao meu mestre e co-orientador, Prof. Nelso Gauze Bonacorso, pelos conhecimentos transmitidos desde minha graduação, pelas oportunidades oferecidas e por despertar o entusiasmo para a pesquisa. Sem dúvida o principal responsável pela decisão de realizar o mestrado;

Ao Prof. Jair Carlos Dutra, pela orientação, pelo exemplo de dedicação e pela oportunidade de compor a equipe do LABSOLDA;

Aos eng^{os}. Raul Gohr Júnior, Régis Henrique Gonçalves e Silva, Guilherme Locatelli, Luciano Cirino, ao tecg^o Eduardo Bidese Puhl, ao físico Tiago Vieira da Cunha e ao designer Marcelo P. Okuyama, pela colaboração em diversos aspectos deste trabalho;

Aos técnicos Cristian Alex Vieira e Ricardo Campagnin (Índio velho), aos bolsistas Henrique L. Azambuja e Ivan Olszanski Pigozzo, que atuaram diretamente no projeto;

A toda equipe do LABSOLDA, em especial à Márcia Paula Thiel, Jader G. da Silveira, Felipe Valente Nicolau, Evandro Luiz Martins, Kleber Silva, Ezequiel Ezequiel Gonçalves;

Ao Prof. Américo Scotti e ao LAPROSOLDA pela co-participação no projeto;

Aos professores Clóvis Raimundo Maliska e Axel Dihlmann e também à ANP (Agencia Nacional de Petróleo), pelo financiamento de parte do trabalho por intermédio da bolsa de pesquisa e compra de materiais;

À Universidade Federal de Santa Catarina e ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, por proporcionar as condições necessárias para realização deste trabalho;

A TRACTEBEL Energia, em especial ao Eng. Luiz Felipe, Franco Wronski Comeli e a equipe de P&D, pela viabilização da pesquisa e testes em campo.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	DESCRIÇÃO DOS PROBLEMAS	1
1.2	SOLUÇÕES EXISTENTES	5
1.3	OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	8
1.4	ESTRUTURA DO TEXTO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA AUTOMAÇÃO DA SOLDAGEM	12
2.1	O PROCESSO MIG/MAG PARA A UNIÃO DE DUTOS	13
2.2	REVESTIMENTO DE TUBOS DE PAREDES DE CALDEIRAS DE USINAS TERMELÉTRICAS	17
2.2.1	O PROCESSO MIG/MAG PULSADO COM PULSAÇÃO TÉRMICA	17
2.2.2	O PROCESSO PTAP	19
2.3	MANIPULADORES PARA SOLDAGEM	20
2.4	TECNOLOGIAS DE ACIONAMENTOS	23
2.5	CONTROLADORES DE MOVIMENTO	27
2.6	SÍNTESE DESTE CAPÍTULO	32
3	DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO	33
3.1	DETALHAMENTO FUNCIONAL GLOBAL	34
3.2	CONCEPÇÃO MECÂNICA	35
3.2.1	MANIPULADOR COM RODAS MAGNÉTICAS	35
3.2.2	TARTÍLOPE V4-F: MANIPULADOR PARA A SOLDAGEM DE SUPERFÍCIES LIVRES	38
3.2.3	TARTÍLOPE V4: MANIPULADOR PARA SOLDAGEM ORBITAL	40
3.2.4	A FLEXIBILIDADE DO TARTÍLOPE V4	43
3.2.5	TARTÍLOPE V4 – SEGUNDA GERAÇÃO	44
3.3	DESENVOLVIMENTO ELETRO-ELETRÔNICO	51
3.3.1	LÓGICA DE ACIONAMENTO	52
3.3.2	SERVO ACIONAMENTO EMPREGADO	55
3.3.3	PLACAS ELETRÔNICAS AUXILIARES	61
3.4	CONTROLADORES E PROGRAMAÇÃO	66
3.4.1	CONTROLADOR DESKCNC	66
3.4.2	CONTROLADOR CNC MACH3	69

3.4.3	PROGRAMAÇÃO DEDICADA	75
3.4.4	DESENVOLVIMENTO DA IHM	77
3.5	UNIDADE DE CONTROLE	85
3.6	SÍNTESE DESTE CAPÍTULO	88
4	<u>AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL</u>	90
4.1	DESCRIÇÃO DAS BANCADAS	90
4.2	RESULTADOS OBTIDOS EM LABORATÓRIO	92
4.2.1	SOLDAGEM DE DUTOS	92
4.2.2	REVESTIMENTO DE TUBOS DE CALDEIRAS DE USINAS TERMELÉTRICAS	94
4.3	RESULTADOS OBTIDOS EM CAMPO	96
4.4	DISCUSSÃO DE RESULTADOS	97
5	<u>CONCLUSÕES</u>	100
6	<u>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</u>	102
7	<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u>	103
8	<u>ANEXO A – PARAMETRIZAÇÃO DOS SERVO DRIVERS DA FAMÍLIA R20X0</u>	110
9	<u>ANEXO B – PRINCIPAIS FUNÇÕES DO CÓDIGO G USADAS NA SOLDAGEM</u>	117

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1 – Soldagem de linhas dutoviárias (2)	2
Figura 1-2 – Região afetada por erosão e corrosão (4).....	3
Figura 1-3 – Soprador de vapor (4).....	3
Figura 1-4 – Em (a) corte em parede de termelétrica e em (b) e (c) detalhe da soldagem de união de tubos (4).....	4
Figura 1-5 – Robô antropomórfico de 6 graus de liberdade (6).....	5
Figura 1-6 – Sistemas para a soldagem orbital. Em (a) manipulador da DYNATORQUE e em (b) da POLYSOUDE	7
Figura 1-7 – Sistema para a automatização do revestimento das paredes de caldeiras (9).....	7
Figura 2-1 – Automação da soldagem e suas principais áreas de conhecimento	12
Figura 2-2 – Sistemas para alinhamento de dutos e instalação de <i>backing</i> . Em (a) equipamento da empresa italiana OPUS e em (b) construção de linha dutoviária	14
Figura 2-3 – Oscilograma esquemático do CCC (15)	16
Figura 2-4 – Oscilograma esquemático do STT (15)	17
Figura 2-5 – Caracterização da forma de onda da corrente no processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica (23)	18
Figura 2-6 – GO-FER III: Manipulador para soldagem da empresa BUG-O com um grau de liberdade (32).....	21
Figura 2-7 – TARTÍLOPE V2 (35)	22
Figura 2-8 – Manipulador para soldagem MIG orbital.....	23
Figura 2-9 – Método de acionamento em malha aberta	24
Figura 2-10 – Método de acionamento em malha fechada. Em (a) empregando um controlador e em (b) com a utilização de um servo <i>driver</i>	25
Figura 2-11 – <i>Hardware</i> DeskCNC com dimensões: 50 mm x 62 mm.....	29
Figura 2-12 – Tela de comando do programa DeskCNC	30
Figura 2-13 – Tela genérica do controlador CNC Mach3	31
Figura 3-1 – Juntas do manipulador robótico.....	33
Figura 3-2 – Diagrama geral de funcionamento.....	35
Figura 3-3 – Tartaruga magnética para corte de dutos (46)	36

Figura 3-4 – Primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4. Em (a) concepção para soldagem de dutos e em (b) para soldagem de tubos de parede de caldeira ...	37
Figura 3-5 – Rodas adaptadas para os tubos de caldeira	37
Figura 3-6 – TARTÍLOPE V4-F	39
Figura 3-7 – Fixador magnético em destaque	40
Figura 3-8 – Cinta orbital dinâmica com rolete de nylon. Em (a) projeto CAD e em (b) testes de deslocamento orbital	41
Figura 3-9 – Roda com anéis de borracha.....	41
Figura 3-10 – Cinta orbital rígida.....	42
Figura 3-11 – Mecanismo de fixação do TARTÍLOPE V4 à cinta orbital rígida.....	43
Figura 3-12 – TARTÍLOPE V4: em (a) deslocamento orbital, em (b) vertical em superfície plana e em (c) horizontal em superfície curva	44
Figura 3-13 – Efeitos causados pelo incorreto posicionamento da junta prismática Y. Em (a) desalinhamento da junta Z em relação ao centro do duto e em (b) e (c) centro de gravidade na parte frontal esquerda.....	45
Figura 3-14 – Estrutura do TARTÍLOPE V4 segunda geração.....	46
Figura 3-15 – Interior do TARTÍLOPE V4	47
Figura 3-16 – Rodas de poliuretano.....	48
Figura 3-17 – Centro de massa da segunda versão do TARTÍLOPE V4. Em (a) vista lateral e em (b) vista frontal.....	48
Figura 3-18 – Mecanismo de fixação. Em (a) aberto e em (b) fechado	49
Figura 3-19 – Teste com relógio comparador para verificação de folgas no mecanismo	50
Figura 3-20 – Em (a) montagem para soldagem orbital e em (b) para a soldagem de superfícies curvas	51
Figura 3-21 – Diagrama de blocos do primeiro protótipo.....	52
Figura 3-22 – Diagrama de blocos do segundo protótipo.....	53
Figura 3-23 – Circuito elétrico lógico.....	55
Figura 3-24 – Servo motores empregados. Em (a) da junta prismática X e em (b) das demais juntas	57
Figura 3-25 – Curvas características ilustrativas. Em (a) do servo motor da junta prismática X e em (b) dos servo motores das demais juntas.....	58
Figura 3-26 – Em (a) servo <i>driver</i> RUTEX R2010 e em (b) diagrama das ligações .	58

Figura 3-27 – Em (a) diagrama de blocos da placa de isolamento de sinais e em (b) o resultado final da placa	62
Figura 3-28 – Em (a) diagrama de blocos da placa de isolamento de STEP e DIR, em (b) placa de isolamento e em (c) conjunto da placa e os servo <i>drivers</i>	64
Figura 3-29 – TARTÍLOPE V4 com eletrônica no manipulador	65
Figura 3-30 – Placa de adequação dos sinais do <i>encoder</i> . Em (a) circuito elétrico e em (b) placa eletrônica com dimensões de 15 mm x 11 mm	65
Figura 3-31 – Em (a) tela de programação das velocidades do equipamento e em (b) parametrização dos eixos de deslocamento.....	68
Figura 3-32 – Em (a) tela de configuração do espaço de trabalho e em (b) configuração das juntas	69
Figura 3-33 – Configuração de comunicação do Mach3	70
Figura 3-34 – Configuração dos sinais de comando dos servo <i>drivers</i>	71
Figura 3-35 – Configuração dos sinais de entrada	72
Figura 3-36 – Configuração dos sinais de saída.....	73
Figura 3-37 – Programação da rampa de aceleração	74
Figura 3-38 – Em (a) controle usado para movimentação do manipulador e em (b) tela de configuração do KeyGrabber	74
Figura 3-39 – Fluxograma da programação do TARTÍLOPE V4.....	76
Figura 3-40 – Screen4: ambiente de desenvolvimento de IHM em linguagem <i>Visual Basic</i>	78
Figura 3-41 – Primeira IHM em ambiente Flash. Em (a) tela para seleção da forma de tecimento e em (b) captura de pontos	80
Figura 3-42 – Primeira IHM em ambiente Flash. Em (a) programação dos parâmetros de soldagem e em (b) tela de operação final.....	81
Figura 3-43 – Em (a) tela inicial de programação do manipulador e em (b) tela de seleção da forma de trajetória.....	83
Figura 3-44 – Em (a) tela para a marcação de pontos e em (b) tela para determinação dos parâmetros de deslocamento.....	84
Figura 3-45 – Tela final para acompanhamento da soldagem	85
Figura 3-46 – Painel elétrico de comando. Em (a) parte interna e em (b) parte externa do primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4.....	86
Figura 3-47 – Painel elétrico de comando do segundo protótipo do TARTÍLOPE V4. Em (a) a parte interna e em (b) a externa.....	88

Figura 3-48 – Sistema completo: unidade de controle, monitor sensível ao toque, cinta orbital e mecanismo.....	89
Figura 4-1 – Bancada para soldagem orbital.....	91
Figura 4-2 – Bancada para revestimento de tubos de caldeira.....	92
Figura 4-3 – Testes iniciais de soldagem orbital MIG. Em (a) o robô em operação e em (b) resultados preliminares.....	93
Figura 4-4 – Revestimento de tubos de caldeira com o processo MIG/MAG e aço inox 309L na posição plana.....	95
Figura 4-5 – Corpo de prova com deformação, soldado na posição plana.....	95
Figura 4-6 – Tubo revestido com o processo PTAP e INCONEL 625 na posição plana.....	96
Figura 4-7 – Em (a) manipulador em operação no interior da caldeira 4 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, em (b), (c) e (d) seqüência do revestimento.....	96
Figura A.8-1 – Tela principal de programação do compensador PID.....	110
Figura A.8-2 – Ajuste do ganho proporcional K_p	113
Figura A.8-3 – Resposta ao degrau com compensador do tipo proporcional.....	113
Figura A.8-4 – Ajuste do ganho derivativo K_d e K_d index.....	114
Figura A.8-5 – Resposta ao degrau com do tipo proporcional derivativo.....	114
Figura A.8-6 – Ajuste do ganho integral K_i	115
Figura A.8-7 – Resposta ao degrau com compensador do tipo PID.....	116
Figura B.9-1 – Exemplo de código G.....	119
Figura B.9-2 – Posicionamento da tocha.....	120
Figura B.9-3 – Soldagem no trecho 1.....	120
Figura B.9-4 – Soldagem no trecho 2.....	120
Figura B.9-5 – Soldagem no trecho 3.....	121
Figura B.9-6 – Reposicionamento para próximo cordão.....	121

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Vantagens x desvantagens do acionamento com motores de passo ..	26
Tabela 2.2 – Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua com escovas	26
Tabela 2.3 – Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua sem escovas	27
Tabela 2.4 – Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente alternada síncronos	27
Tabela 3.1 – Erro médio de posicionamento das juntas do TARTÍLOPE V4	50

SIMBOLOGIA

AVC: *Arc Voltage Control*

CC: Corrente contínua

CCC: Curto circuito controlado

CCD: *Coupled Charge Device*

CG: Chave geral

CI: Circuito integrado

CLP: Controlador Lógico Programável

CNC: Comando Numérico Computadorizado

CT1: contatos do contactor

DA: Servo *driver* da junta rotacional A

DBCP: Distância bico de contato-peça

DESL: Botão desliga

DOF: *Degrees of Freedom*

DX: Servo *driver* da junta prismática X

DXF: *Drawing interXange Format*

DY: Servo *driver* da junta prismática Y

DZ: Servo *driver* da junta prismática Z

ER: Eletrodo Revestido

HA: Chave de *home* da junta rotacional A

HD: *Hard Disk*

HX: Chave de *home* da junta prismática X

HY: Chave de *home* da junta prismática Y

HZ: Chave de *home* da junta prismática Z

IHM: Interface Homem-Máquina

Im_base: corrente média na base térmica

Im_pulso: corrente média no pulso térmico

Kd: Ganho derivativo

Ki: Ganho integral

Kp: Ganho proporcional

LABSOLDA: Laboratório de soldagem da UFSC

LIGA: Botão de liga

MAG: *Metal Active Gas*

MDI: *Manual Data Input*
MIG: *Metal Inert Gas*
MIT: *Massachusetts Institute of Technology*
NC: *Numerical Control*
OR: botão de *Override*
PE: botão de parada de emergência
PID: Proporcional, integral e derivativo
PTA: *Plasma Transferred Arc*
PTAP: *Plasma Transferred Arc Powder*
PWM: *Pulse Width Modulation*
rpm: Rotações por minuto
SA0: Sensor de limite mínimo de curso da junta rotacional A
SA1: Sensor de limite máximo de curso da junta rotacional A
SAC: Sistema de avanço de controle
SDP: Sistema de deslocamento e posicionamento
STL: *Standard Template Library*
STT: *Surface Tension Transfer*
SY0: Sensor de limite mínimo de curso da junta prismática Y
SY1: Sensor de limite máximo de curso da junta prismática Y
SZ0: Sensor de limite mínimo de curso da junta prismática Z
SZ1: Sensor de limite máximo de curso da junta prismática Z
TIG: *Tungsten Inert Gas*
TTL: *Transistor Transistor Logic*
USB: *Universal Serial Bus*
VT: botão de verificar trajetória

RESUMO

O mercado brasileiro, no que tange a equipamentos que agregam tecnologias inovadoras aplicadas aos processos de fabricação, é fundamentalmente um consumidor de tecnologias estrangeiras. Isto eleva consideravelmente o custo de aquisição e de manutenção de equipamentos capazes de agilizar a indústria e a pesquisa. Além disto, iniciativas nacionais para o desenvolvimento de sistemas que apresentem baixo custo e aperfeiçoem os processos de fabricação e/ou manutenção, recebem pouca atenção dos profissionais da área. Neste contexto, o referido trabalho apresenta o desenvolvimento e a construção de um robô com comando numérico computadorizado versátil com quatro graus de liberdade, três prismáticos e um rotacional, que é facilmente adaptável à execução de soldagem em dutos e em paredes planas ou curvas. Esta flexibilidade de operação é decorrente de um projeto mecânico modular, o qual torna factíveis alterações em sua montagem. Como parte integrante do desenvolvimento, construiu-se uma Interface Homem-Máquina intuitiva, a qual proporciona facilidade de operação e, conseqüentemente, redução no tempo para a qualificação de mão de obra. É fundamental destacar que o projeto é um robô flexível e não um equipamento de automação dedicada. Logo, seu emprego não fica restrito às tarefas apresentadas, podendo ser utilizado para distintos fins industriais e acadêmicos. Entretanto, apenas a construção de um robô para a soldagem não garante melhorias para as aplicações supracitadas. Assim, foram realizados estudos com diferentes processos de soldagem, principalmente as variantes do processo MIG e no Plasma com adição de pó. O foco inicial de aplicação é o setor energético. Numa de suas configurações é destinado à automatização da união de dutos. Adaptando-se um trilho com base magnética, pode ser utilizado para a soldagem de paredes curvas, como, por exemplo, na recuperação de tubos de paredes de caldeiras de usinas termelétricas. O projeto vem então atuar em conjunto com as pesquisas realizadas sobre processos de soldagem, a fim de criar subsídios que viabilizem o aprimoramento da tecnologia nacional relacionada com novos métodos de fabricação e de manutenção.

Palavras chave: automação da soldagem, MIG/MAG, PTAP, recuperação de superfícies, robô CNC, soldagem orbital.

ABSTRACT

The Brazilian market, in terms of equipment that add innovative techniques applied to manufacturing processes, is basically a consumer of foreign technologies. That raises the acquisition and maintenance cost of equipment able to boost the industry and research. Additionally, national initiatives for the development of systems that represent low cost and improve the manufacturing / maintenance process receive little attention from professionals of the area. In this context, this work presents the development and construction of a robot with versatile computerized numerical control with four degrees of freedom, three prismatic and one rotational, which is easily adaptable to the application of welding on pipelines and on flat or curved walls. This flexibility of operation is due to a modular mechanical design which makes changes in their assembly feasible. As a part of the development, an intuitive a Human Machine Interface was constructed, which provides ease of operation and consequently reduction in time to qualify for labor. It is important to emphasize that the project is a flexible robot and not dedicated automation equipment. Therefore, its job is not restricted to the tasks presented, but it can be used for different industrial and academic purposes. However, only the construction of a robot for welding does not guarantee improvements for the applications mentioned. Thus, studies were performed with different welding processes, especially the variants of MIG process and Plasma with addition of powder. The initial focus is the application in the energy sector. In one of its settings it is destined for the automation of pipes joining. Adapted to a trail with magnetic bases, it can be used for welding on curved walls, like for example, in the recovery of pipes of thermal power plants boiler walls. The project will then work together with the research performed on welding processes, in order to create knowledge subsidies that enable the improvement of national technology related to new methods of manufacture and maintenance.

Keywords: welding automation, MIG/MAG, PTAP, recovery of surfaces, CNC robot, orbital welding.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A análise das principais publicações e relatórios estatísticos do setor de energia das últimas décadas evidencia um aumento significativo do consumo energético no planeta. Desta forma, o aprimoramento tecnológico, tanto dos meios de geração, quanto de transporte de energia, torna-se cada vez mais importante para atender as necessidades do consumo mundial.

Neste contexto, a tecnologia da soldagem desempenha um importante papel, posto que sua evolução contribui diretamente para o aumento da produtividade e do intervalo entre paradas para manutenção. Logo, é factível alcançar-se grandes avanços por intermédio de aperfeiçoamentos em processos de soldagem.

No âmbito da automação da soldagem, o Brasil carece de equipamentos oriundos de tecnologia nacional. Este fato decorre em virtude da falta de investimentos ou de uma política nacional para o desenvolvimento e expansão do setor de soldagem.

Com o estudo da situação atual da matriz energética nacional, fica evidente a importância de desenvolver manipulador para soldagem, que atenda a demanda principalmente na manutenção de usinas termelétricas e em construção de linhas dutoviárias voltadas ao transporte de petróleo e gás natural.

1.1 Descrição dos problemas

No cenário petrolífero nacional, as linhas dutoviárias apresentam um elevado custo, sobretudo pelo alto tempo gasto em sua construção, onde se inclui aluguéis de equipamentos na ordem de dezenas de milhares de dólares por dia. Assim, otimizações nesta operação se tornam deveras atrativas para as empresas contratantes e executoras de serviços.

Atualmente, grande parte das soldas de passe de raiz na união de dutos é realizada com o processo de eletrodo revestido e de forma manual, Figura 1-1. Este fato se explica, sobretudo, pela tradição, desconhecimento da possibilidade de emprego do processo MIG e falta de relação eficiente entre o soldador e o engenheiro que busca introduzir um novo processo (1).



Figura 1-1 – Soldagem de linhas dutoviárias (2)

Desta maneira, a qualidade da soldagem de união de dutos fica diretamente atrelada às tendências de cada soldador. Como resultado, tem-se baixa repetitividade na execução da tarefa, ocasionando aumento de retrabalho e, conseqüentemente, elevação no tempo final de construção de uma linha dutoviária.

A baixa repetitividade, na soldagem manual, pode ser explicada pela dificuldade do soldador posicionar-se para realizar o cordão. Aliado a esta problemática, soma-se o fato da soldagem de união de dutos ser uma soldagem do tipo orbital. Isto significa soldagem em todas as posições (plana, sobrecabeça, vertical descendente e/ou ascendente) durante a execução da união.

Outro problema relacionado com o setor energético diz respeito à manutenção de usinas termelétricas. Estas se tornaram progressivamente importantes no cenário brasileiro de geração de energia elétrica face a dependência dos índices pluviométricos, capacidade dos reservatórios, aumento da demanda e atraso na execução da construção de novas usinas. A vulnerabilidade a períodos de estiagem é sempre um fator preocupante quando não há certa margem de co-geração a partir de outras fontes de energia. Assim, as usinas termelétricas desempenham um papel de agente equalizador, sendo vital mantê-las em elevados patamares de confiabilidade e manutenibilidade para proporcionar excelentes níveis de disponibilidade.

O objeto das manutenções necessárias nestas usinas é para evitar o rompimento dos tubos que constituem suas paredes, devido principalmente à erosão e a corrosão, Figura 1-2, em conseqüência da alta temperatura e impurezas geradas na queima do carvão (3). Outro fator que contribui substancialmente para os danos são

os sopradores de vapor, Figura 1-3. Estes sopradores têm a função de realizar a limpeza das paredes da caldeira. Tal limpeza é fundamental, pois a fuligem gerada na queima do carvão se deposita sobre os tubos, prejudicando drasticamente a troca de calor, fato que diminui a eficiência na produção de energia elétrica.



Figura 1-2 – Região afetada por erosão e corrosão (4)



Figura 1-3 – Soprador de vapor (4)

Entretanto, quando o vapor retira a camada de fuligem é extraída também pequena quantidade de material que constitui o tubo. Assim, com o passar do tempo, a espessura destes tubos chega a níveis preocupantes no que diz respeito a suportar a pressão interna.

Atualmente, a recuperação das zonas danificadas é efetuada por intermédio da substituição integral dos tubos e membranas das referidas áreas. Para tanto, são efetuados cortes nas paredes da caldeira, como pode ser visto por intermédio da Figura 1-4(a). O acoplamento dos novos tubos à parte antiga é realizado por soldagem TIG, Figura 1-4(b), resultando em um trabalho extremamente demorado e crítico. A Figura 1-4(c) mostra em detalhe o resultado final da união entre os tubos da parede. Uma operação de revestimento por soldagem das referidas áreas, com materiais resistentes à erosão e corrosão, evitaria um seccionamento prematuro e a posterior substituição dos tubos.



Figura 1-4 – Em (a) corte em parede de termelétrica e em (b) e (c) detalhe da soldagem de união de tubos (4)

Diante do exposto, fica evidente então que o setor energético brasileiro precisa de tecnologia em equipamentos com o objetivo de automatização dos procedimentos de soldagem.

A robotização da soldagem, além de proporcionar maior repetitividade, qualidade e maior agilidade nos trabalhos, abre caminho para que a indústria utilize processos de soldagem com maior produtividade. Estes processos, em muitos casos, são de difícil implementação, pois os soldadores são resistentes à mudança, preferindo continuar trabalhando com os processos que já estão habituados.

1.2 Soluções existentes

O mercado internacional dispõe de distintas possibilidades de equipamentos para a automatização da soldagem. Evidentemente, cada uma visa atender uma determinada necessidade, ou seja, é possível que um robô extremamente moderno não seja a opção mais adequada para uma determinada tarefa.

Quando analisado somente as questões de liberdade de deslocamento, uma alternativa para a soldagem de dutos e revestimento de tubos de parede de caldeira são os robôs antropomórficos, Figura 1-5, sendo que efetuam movimentos similares ao do braço humano. Com isso há facilidade de posicionamento e orientação da tocha de soldagem no espaço (5).



Figura 1-5 – Robô antropomórfico de 6 graus de liberdade (6)

O problema na utilização destes robôs está interligado ao fato dos mesmos terem dificuldades de operação em ambientes confinados, devido às colisões ocasionadas durante a execução de trajetórias. Outro ponto fundamental é que robôs antropomórficos, de forma geral, são pesados e necessitam de grande rigidez em sua base, o que implica em grande complexidade para o seu transporte e a instalação em campo. Em suma, estes robôs são voltados principalmente para a operação em uma linha de produção.

Para a soldagem em campo, é aconselhável a aplicação de manipuladores com uma concepção mecânica diferenciada. Esta por sua vez, tende a suprir os requisitos de robustez, facilidade de transporte e instalação. Contudo, a maioria dos equipamentos voltados a uma determinada aplicação não apresentam flexibilidade de adaptação a outras tarefas. Além disto, geralmente estes manipuladores são bem simples, apresentando apenas 2 ou 3 graus de liberdade. Com esta restrição de mobilidade, o robô não viabiliza o correto posicionamento da tocha de soldagem em certas situações de operações.

Para a soldagem em campo, por exemplo, na união de dutos, encontram-se soluções dedicadas que atendem às restrições relacionadas com a facilidade de manuseio do equipamento. Entretanto, estes robôs não apresentam flexibilidade de adaptação a outras tarefas. Além disso, tais manipuladores são provenientes de tecnologia estrangeira, o que torna seu custo de aquisição e manutenção elevado.

Como bons exemplos de equipamentos voltados para a automação da soldagem de união de dutos, tem-se os manipuladores da DYNATORQUE (7), Figura 1-6(a), e da POLYSOUDE (8), Figura 1-6(b). Ambos os equipamentos são empregados mundialmente para a soldagem de união de dutos. No âmbito nacional, o manipulador desenvolvido pela DYNATORQUE está atuando na construção de uma linha dutoviária que parte do Espírito Santo com destino ao nordeste.

Um problema encontrado nos dois manipuladores supracitados diz respeito aos graus de liberdade. Eles apresentam apenas 3 graus de liberdade, o que em determinadas situações não viabiliza um ajuste adequado do ângulo entre a tocha de soldagem e a superfície da peça.

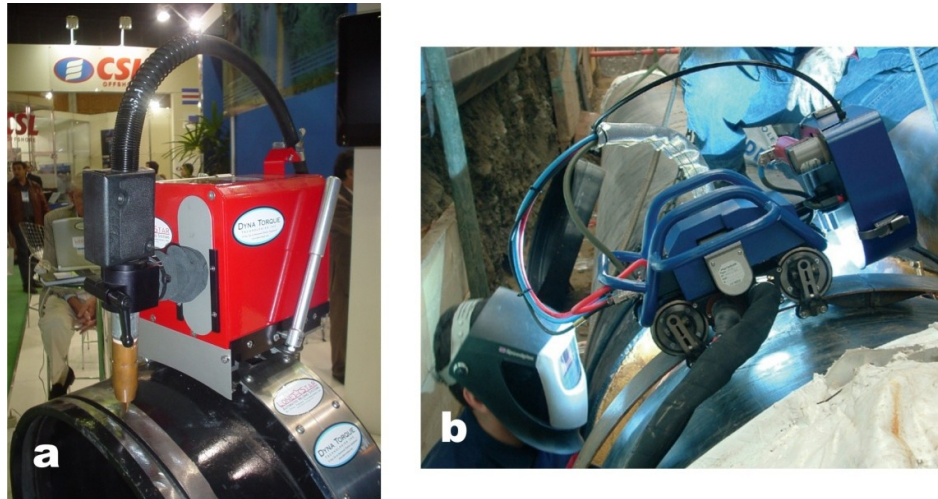


Figura 1-6 – Sistemas para a soldagem orbital. Em (a) manipulador da DYNATORQUE e em (b) da POLYSOUDE

Da mesma forma que acontece com a união de dutos, existem soluções dedicadas para a soldagem de recuperação de tubos de parede de caldeiras. O fabricante norte-americano BUG-O SYSTEMS fornece um manipulador denominado “All Position Overlay System”, Figura 1-7, o qual efetua a recuperação ou o revestimento de tubos de paredes de água.

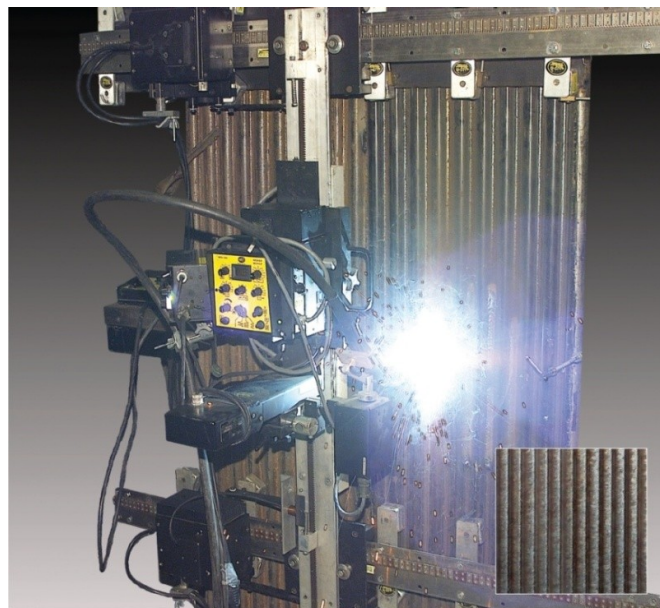


Figura 1-7 – Sistema para a automatização do revestimento das paredes de caldeiras (9)

O referido manipulador é constituído por dois trilhos flexíveis e paralelos de 2,4 m de comprimento, os quais são instalados com bases magnéticas. Um trilho vertical rígido de 3,35 m de comprimento é fixado sobre os trilhos horizontais. Uma tartaruga de soldagem se desloca com velocidade da ordem de 3 m/min sobre o trilho vertical para realizar a tarefa de deposição de material por soldagem.

Quanto ao procedimento de soldagem aplicado ao revestimento dos tubos das paredes, a solução comumente utilizada é o processo MIG pulsado e como material de adição o INCONEL 625 (10).

1.3 Objetivos e contribuições

Para produzir dividendos eficazes para a sociedade no campo de um processo de fabricação, como é a soldagem, em que vários ramos das ciências têm de ser usados simultaneamente, é necessário uma ação estratégica para a qual não há uma devida preocupação de infra-estrutura na universidade brasileira. Entretanto, é para enfrentar este desafio que o Laboratório de Soldagem (LABSOLDA) da UFSC tem baseado a sua existência. Mais do que formar pessoas, o LABSOLDA tem produzido tecnologia, tornando-a aplicável. Muitos dos desenvolvimentos são iniciados sem um financiamento específico e com a mão de obra de somente um bolsista de iniciação científica. Pela persistência, passo a passo os conhecimentos evoluem e atingem os níveis de mestrado e doutorado. Tal política de ação gera uma consolidada continuidade, de tal maneira que não há finalização de linhas de pesquisa e desenvolvimento, mas sempre uma expansão. Deste modo, os temas de trabalhos de pós-graduação seguem um programa natural, concatenados entre o que se entende por ciência e com o desenvolvimento de tecnologia, a qual deve atuar de maneira imediata na melhoria da qualidade de vida da sociedade, propósito inalienável da filosofia de atuação do LABSOLDA.

O objetivo do trabalho que aqui é apresentado na forma de uma dissertação de mestrado representa apenas uma imagem de toda uma política própria de ação, na qual está inserido o pensamento de que qualquer pesquisa sobre processos de soldagem realizada em equipamentos completamente estanques, no sentido de suas funções, estaria ultrapassada já desde o seu início. Além disto, tais pesquisas ajudam muito mais o fabricante do equipamento e ao país de origem, do que ao país do realizador da pesquisa.

O equipamento a que se refere esta dissertação não representa uma inventiva completamente inédita, assim como não são no seu todo absoluto as fontes de energia desenvolvidas também no LABSOLDA. O que tem de especial nestes equipamentos aqui produzidos é primordialmente a possibilidade de não se ficar limitado às características técnicas dos equipamentos comerciais. É possível a ousadia de desafiar alguns paradigmas de processos, mas também é fundamental a questão de que existe um envolvimento global de aprendizado acadêmico. Nesta maneira de atuar, os conhecimentos de soldagem são simbioticamente articulados com conhecimentos de projeto mecânico, de eletrônica, de computação e de metrologia.

Assim, dentro desta dissertação, um pouco de cada uma destas áreas está abordado. O equipamento que surge pode ser considerado dentro de um determinado ponto de vista como específico a poucas aplicações. Ele pode ser caracterizado de fato como um robô, mas não com as características antropomórficas, típicas dos robôs universais. Entretanto, buscou-se dentro deste desenvolvimento atender a áreas diversificadas, o que garante ao equipamento produzido certo grau de ineditismo e proporciona uma redução do valor do preço por equipamento em razão da chance de se ter uma maior produção.

Assim, embora o equipamento pretendido tenha um visual característico de sistemas de soldagem orbital em dutos de paredes espessas, a sua concepção visou atender a situações genéricas, como a soldagem de superfícies de trocadores de calor de usinas termelétricas. Para tanto, basta que seja trocado os trilhos nos quais um carro trator se desloca. Se no exterior, não se tem conhecimento da existência de tais sistemas mais genéricos, no Brasil a situação pode ser imaginada como pior. Seria plenamente possível a importação de um sistema específico e fazer a adaptação para uma maior generalização de utilização. Entretanto, estes equipamentos são extremamente caros e difíceis de serem adquiridos separadamente das fontes de energia de soldagem. Normalmente o fabricante vende conjuntos fechados, mas sem fazer muito esforço para a respectiva venda, pois o maior interesse está na locação de tais equipamentos. Além de tudo, os equipamentos são de arquitetura fechada e conhecida apenas pelo fabricante.

O equipamento aqui apresentado é então um manipulador CNC versátil com quatro graus de liberdade, três prismáticos e um rotacional, que é facilmente adaptável a soldas em dutos e em paredes planas ou curvas. Deseja-se então que

com pequenas mudanças mecânicas seja possível a realização de diferentes tarefas de soldagem.

Foi objetivo do projeto que a interface fosse intuitiva e que proporcionasse uma operação simples para o usuário. O desenvolvimento foi integrado com as tecnologias de soldagem, a fim de alcançar toda a potencialidade do robô e as vantagens que distintos processos de soldagem apresentam para cada aplicação. Dentre os principais processos, focados pelo estudo, destacam-se o MIG pulsado com pulsação térmica e versões de MIG com curto-circuito (1), estas desenvolvidas no próprio LABSOLDA, bem como o PTAP (11; 12).

O foco inicial de aplicação do equipamento é o setor energético no qual se encontram diversos fatores que definem o desenvolvimento de um robô manipulador para a soldagem. Nesta configuração, a instalação pode ser realizada sobre um trilho com fixação por meio de bases magnéticas, podendo ser utilizado para a soldagem de paredes retas ou curvas. Neste setor a aplicação imediata, conforme já foi mencionado, será a recuperação de tubos de paredes de caldeiras de usinas termelétricas.

Em outra de suas configurações, o projeto é destinado à automatização da união de dutos para a construção de linhas dutoviárias. Com o aumento pretendido da eficiência na soldagem de dutos, o tempo de construção de uma linha dutoviária será reduzido drasticamente. Isto proporcionará grande redução nos custos relacionados, principalmente com o aluguel de equipamentos e mão de obra. Haverá também uma melhoria nas condições de trabalho dos soldadores, dado que os ambientes em questão geralmente são insalubres. As vantagens no que diz respeito aos gastos, tempo de execução e condições de trabalho do operador também são válidas para a manutenção de usinas termelétricas.

Outro ponto importante é o fato do equipamento proposto ser um manipulador CNC flexível e não um projeto de automação dedicada. Logo, seu emprego não fica restrito às tarefas apresentadas, podendo ser utilizado para distintos fins industriais e em pesquisas de instituições de ensino. O referido projeto vem então atuar em conjunto com as pesquisas realizadas sobre processos de soldagem, a fim de viabilizar novos métodos de fabricação e manutenção.

Enfim, este projeto cria subsídios científicos e tecnológicos para novas pesquisas, além de suplantiar uma deficiência existente no país que consiste na falta de equipamentos para a automação da soldagem.

1.4 Estrutura do texto

A fim de contemplar os objetivos apresentados, a estrutura do presente trabalho está subdividida em seis capítulos, sendo a introdução o primeiro.

O segundo capítulo apresenta a fundamentação teórica das tecnologias utilizadas no projeto. É destacado o processo MIG para a união de dutos e os processos MIG e PTAP para o revestimento de tubos de parede de caldeira. Já no contexto de métodos para a automação da soldagem é dada ênfase a tecnologias de servoacionamento e controladores CNC.

No terceiro capítulo é mostrado o desenvolvimento do projeto como um todo, desde as concepções mecânicas até as metodologias de acionamento e controle do manipulador robótico.

A seguir, o quarto capítulo, descreve os testes experimentais de avaliação do equipamento, tanto para a soldagem orbital de dutos, quanto para o revestimento de tubos de parede de caldeira. Sendo que inicialmente são abordados os testes em laboratório e em seguida em campo.

Por fim, o quinto capítulo traz as conclusões sobre o desenvolvimento e o sexto capítulo as sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DA AUTOMAÇÃO DA SOLDAGEM

Nas últimas décadas, as técnicas de automatização dos processos de fabricação apresentam um crescimento considerável. Em consonância com este fato, a automação da soldagem está cada vez mais presente na indústria mundial, a fim de prover maior agilidade à fabricação ou manutenção de produtos. Na essência, as principais áreas de conhecimento que constituem a automação da soldagem são: controle de movimento, processos de soldagem e sistemas de visão, Figura 2-1.

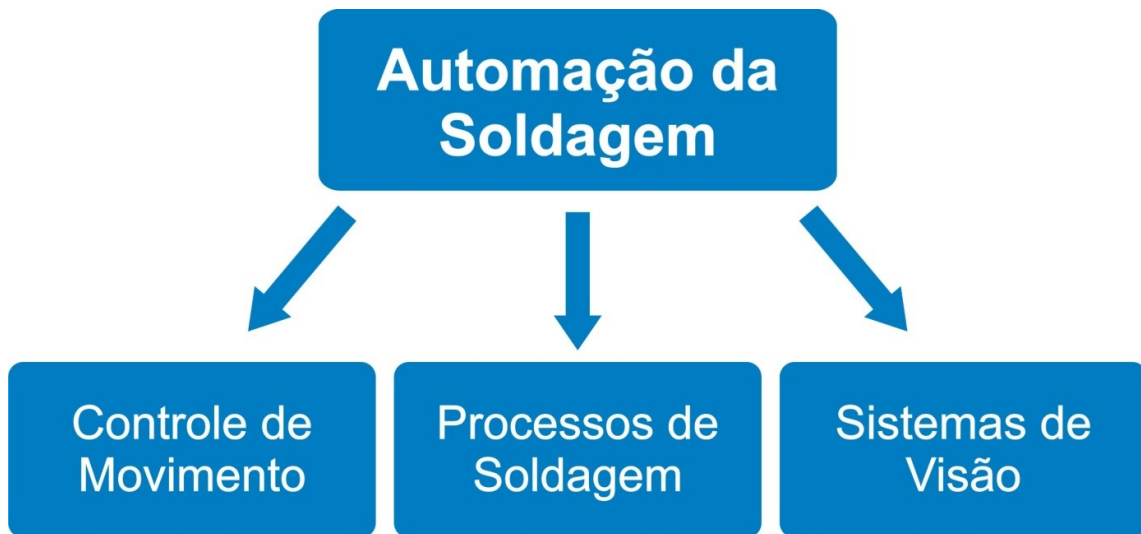


Figura 2-1 – Automação da soldagem e suas principais áreas de conhecimento

Dentro de cada uma destas áreas existem subdivisões diversificadas que operam em conjunto, com o intuito de alcançar o fim almejado da automação da soldagem. Desta forma, a área de controle de movimento é constituída de maneira básica por três itens. O primeiro deles é o manipulador, o qual diz respeito a desenvolvimentos de estruturas mecânicas para os equipamentos destinados ao deslocamento da tocha de soldagem. O segundo é o controlador, este são sistemas para o controle de movimento na execução de trajetórias de soldagem. Por fim, têm-se os acionamentos, que promovem tecnologias de motores e *drivers* para o deslocamento das juntas de um determinado manipulador.

A área de processos de soldagem engloba os processos como um todo, dando-se destaque para o MIG/MAG, PTAP e TIG para as aplicações, além das tecnologias de fonte de soldagem.

Por fim, a área de sistemas de visão emprega técnicas ópticas para a captura de pontos, sendo que o princípio da triangulação por meio da leitura em uma câmera CCD é um dos mais utilizados. Tal sistema de visão pode ser aplicado para o seguimento do chanfro de uma determinada junta a ser soldada ou para qualificação geométrica de soldagens.

2.1 O processo MIG/MAG para a união de dutos

No cenário petrolífero nacional, grande parte das linhas dutoviárias ainda são construídas de forma manual e com soldagem por intermédio de ER (Eletrodo Revestido). Tal fato eleva consideravelmente o tempo e os gastos envolvidos na construção de tais linhas. Isto é facilmente compreensível, uma vez que a soldagem manual com ER exige mão de obra altamente capacitada, caso contrário, tem-se baixa repetitividade e conseqüentemente elevado nível de retrabalho.

Neste contexto, a introdução do processo MIG/MAG para união de dutos tende a proporcionar maior produtividade e repetitividade na execução da tarefa. Outro fator vantajoso é a possibilidade de introdução de sistemas automatizados na realização da soldagem.

A principal problemática para a soldagem automatizada com o processo MIG/MAG diz respeito a realização do passe de raiz, o qual é o primeiro de uma série de cordões destinados à união de dutos. Basicamente existem duas metodologias para a solução do referido problema. A primeira utiliza o MIG/MAG convencional e um sistema de *backing* de cobre, enquanto que a segunda faz uso de variantes do processo MIG/MAG que monitoram o processo de soldagem e atuam quando há detecção de curto-circuito, com o objetivo de controlar a gota metálica. Mesmo com este controle, o curto-circuito é parte primordial da soldagem MIG/MAG convencional.

Na soldagem orbital com o auxílio de *backing*, o anteparo de cobre promove a sustentação da poça metálica. Desta forma, é factível o uso do processo MIG/MAG convencional chegando-se a correntes na faixa de 200 A, velocidade de arame de

10 m/mim e velocidade de soldagem de 90 cm/min, dados estes evidenciados em observações de campo.

Em construções de linhas dutoviárias, existem sistemas que percorrerem o interior dos dutos, com a função de instalar o *backing* e de alinhá-los para a união. A Figura 2-2(a) apresenta um exemplo destes sistemas, os quais são denominados de acopladeiras (13). Já a Figura 2-2(b) mostra o referido sistema operando na construção de uma linha em Porto Seguro.

Embora muito empregados na construção de linhas de transporte de petróleo e gás, estes equipamentos apresentam dificuldade de operação em dutos de menores diâmetros. Nestes casos, são utilizadas as variantes do processo MIG/MAG sem a necessidade de *backing* (14).



Figura 2-2 – Sistemas para alinhamento de dutos e instalação de *backing*. Em (a) equipamento da empresa italiana OPUS e em (b) construção de linha dutoviária

Os fabricantes conclamam que com o emprego de tais variantes são obtidas melhores condições para a execução automatizada do passe de raiz sem *backing*. Como exemplo destas variantes tem-se o CCC (1; 15) e o STT (16; 17). A melhoria das condições para a realização do passe de raiz provém do fato que estas variantes proporcionam maior controlabilidade da poça metálica.

As duas variantes do MIG/MAG, CCC (Curto Circuito Controlado) e STT (*Surface Tension Transfer*), apresentam fundamentalmente a mesma idéia para o controle da corrente de soldagem. Nestes sistemas, a corrente de soldagem torna-se uma variável regulada e parcialmente controlada em tempo real durante o processo. Historicamente, o objetivo destas variantes era elevar a qualidade da soldagem com

o CO₂, já que este gás em muitos países tem um custo bem reduzido em relação às misturas com argônio. O sistema era normalmente apresentado, focando a sua propaganda na redução de salpicagem. Atualmente, ele começa a ganhar espaço no campo das soldas de raiz, em função da possibilidade de uma maior repetitividade de resultados. Isto é consequência do fato de que a corrente de soldagem está muito mais definida, não se permitindo variar como acontece no MIG/MAG convencional (15).

No CCC e no STT busca-se o equilíbrio entre os dois principais efeitos atuantes na transferência metálica por curto-circuito: a força devido à tensão superficial e as forças eletromagnéticas. Quando se trata do MIG/MAG convencional, assim que a gota toca na poça metálica, a corrente sobe imediatamente. Em muitos momentos a transferência metálica não é favorecida, em decorrência da resultante das forças, de origem da tensão superficial e de origem eletromagnética. Outro fator a ser destacado é que como a região de contato é muito pequena para uma corrente elevada, tem início uma forte vaporização metálica. Tais fatos provocam uma tendência de eliminação do contato da gota com a peça, produzindo uma intermitência na transferência. Como a gota não se separa no momento adequado, ela cresce de forma excessiva e em um novo contato as forças atuantes podem produzir a separação da gota do eletrodo, mas na forma de salpicos grosseiros. Um dos objetivos primordiais dos sistemas com controle de corrente está na eliminação desta problemática, bem como proporcionar maior regularidade na transferência metálica. Isto é realizado por intermédio de uma redução da corrente no momento do contato físico, em total dissonância com o sistema tradicional (18).

Nos oscilogramas a seguir, Figura 2-3 e Figura 2-4, referentes respectivamente ao CCC e ao STT, o instante T1 corresponde ao momento em que há a redução da corrente. Isto proporciona melhores condições para que a gota metálica assentar devido à força relativa à tensão superficial. Em termos gerais, o sistema permanece nesta etapa até que a região de contato alcance a mesma dimensão do diâmetro do eletrodo, o que leva aproximadamente 0,7 ms e é representado pelo intervalo de T2 a T3.

Em seguida, é aplicado um pulso de corrente, que corresponde ao intervalo T3 a T4, a fim de atuar a força Pinch para o estrangulamento da gota. O tempo deste pulso é uma variável controlada pelas condições da ponte metálica, tentando-se detectar a iminência do destacamento. Quando este é detectado, a corrente é

reduzida a valores baixos, cerca de 30 A, com o intuito de eliminar uma reabertura do arco de maneira muito brusca, intervalo T4 a T5, reduzindo-se drasticamente os salpicos finos. Para proporcionar a reabertura do arco em baixa corrente, o tempo de permanência no referido valor de corrente é da ordem de 1,0 ms. Nos gráficos, o instante de reabertura do arco é realçado pela defasagem da tensão em relação à corrente. Na seqüência, tem-se um novo pulso de corrente para a formação de uma nova gota. Este é o intervalo T5 a T1. Sua amplitude e tempo estão relacionados com a manutenção de um diâmetro de gota constante ao longo da solda. Deste modo, podem ocorrer variações na DBCP que o cordão tende a permanecer constante. Este controle é efetuado por intermédio da leitura em tempo real de variáveis do arco elétrico. No caso do CCC é analisada uma relação entre tensão e corrente e no STT apenas o valor da corrente.

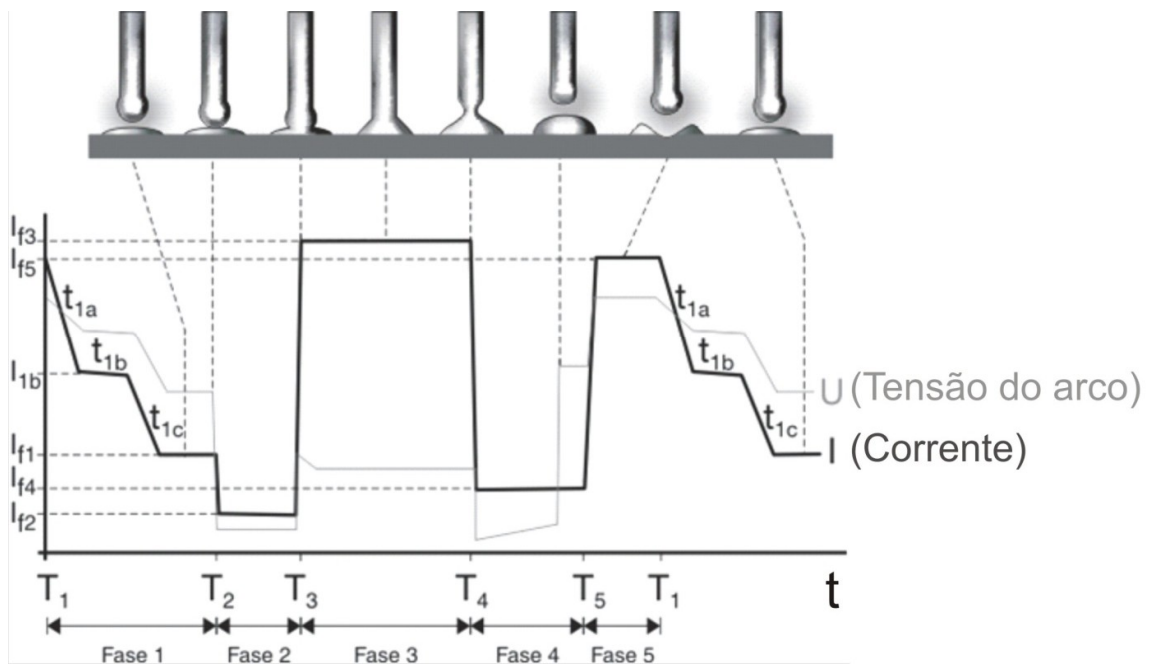


Figura 2-3 – Oscilograma esquemático do CCC (15)

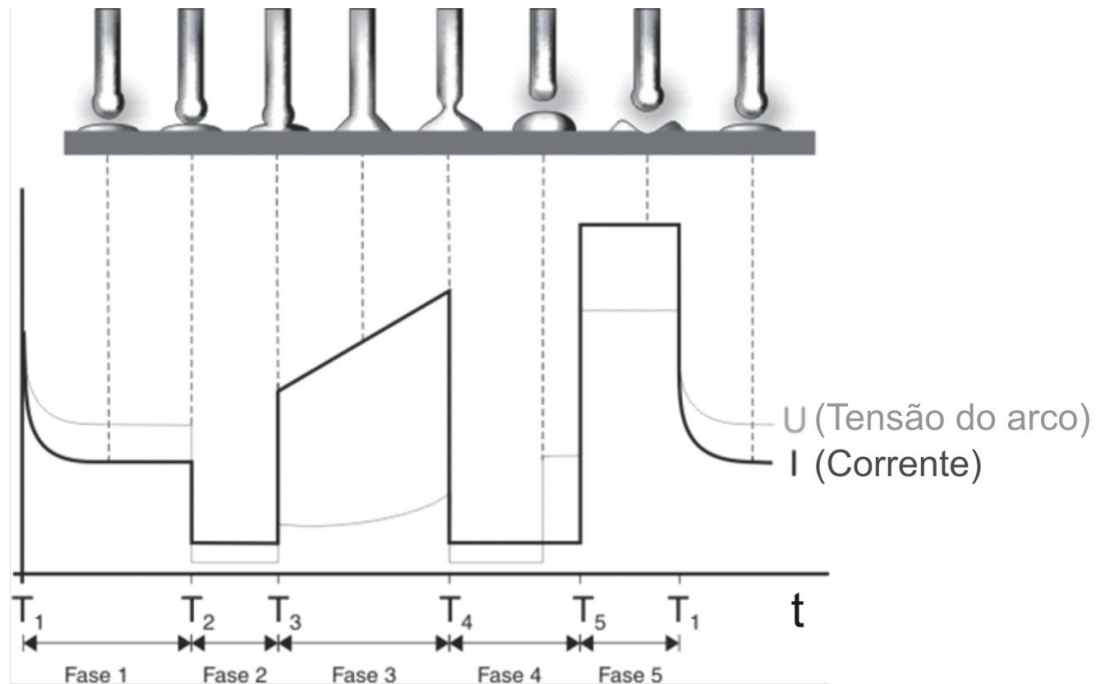


Figura 2-4 – Oscilograma esquemático do STT (15)

2.2 Revestimento de tubos de paredes de caldeiras de usinas termelétricas

A soldagem, quando aplicada como processo de recuperação de partes que sofreram perda de material, apresenta uma gama muito variada de possibilidades e normalmente a variante que é utilizada na indústria não está otimizada. Visando o aprimoramento do processo de soldagem utilizado pela indústria, o LABSOLDA desenvolve há algum tempo metodologias de soldagem que ousam ir além do convencional. Para esta aplicação nos tubos de caldeiras, utilizam-se procedimentos de soldagem que tratam primordialmente do emprego de materiais nobres, como o aço inox 316 L, o 309 e as ligas de INCONEL, entre elas, a mais conhecida, 625. O uso de tais ligas proporciona um considerável aumento na vida útil dos tubos, passando-se de 3 para até 20 anos entre paradas para a manutenção (19).

2.2.1 O processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica

O LABSOLDA possui diversas tecnologias geradas a partir de sua linha de pesquisa, a qual busca sempre a inovação no âmbito da soldagem. Um bom exemplo desta linha de pesquisa foi o desenvolvimento de um processo de

recuperação para as hidrelétricas da TRACTEBEL Energia (20). Neste trabalho foi empregado o processo MIG/MAG, entretanto muito distinto do que convencionalmente é conhecido. Esta variante do processo MIG/MAG foi denominada de MIG/MAG pulsado com pulsação térmica ou duplamente pulsado (21). A Figura 2-5 ilustra a forma de onda da corrente obtida com este processo. A introdução de uma pulsação térmica promove um efeito de adequação e sustentação da poça metálica com uma conseqüente melhoria na qualidade do depósito. Como outras vantagens da utilização do MIG/MAG pulsado com pulsação térmica podem-se citar (22):

- Controle sobre o tamanho da poça de fusão, melhoria nas condições de viscosidade e de tensão superficial e no aspecto do perfil do cordão de solda;
- Redução no nível de defeitos como porosidades e mordeduras.

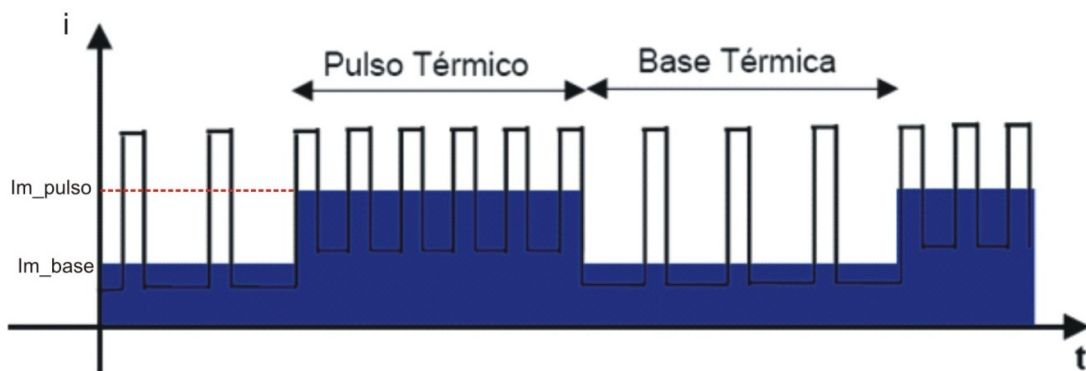


Figura 2-5 – Caracterização da forma de onda da corrente no processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica (23)

A tecnologia tem como base a associação das vantagens da pulsação, tanto do processo MIG/MAG, como do processo TIG. A pulsação da corrente em frequência compatível com a formação de gotículas na ponta do arame-eletrodo, a partir de 30 Hz, tem o objetivo de controlar a transferência metálica, o que proporciona um arco estável. Fazendo-se com que a corrente média desta pulsação MIG varie de forma a produzir ciclos térmicos, conforme ocorre no processo TIG pulsado, na faixa de 0,5 a 2 Hz, produz-se um efeito de adequação e sustentação da poça metálica e conseqüentemente melhoria na qualidade do depósito. Tal melhoria não é somente

do ponto de vista de acabamento, mas também relativa às suas características intrínsecas.

Por causa da ação dos ciclos térmicos, produz-se uma agitação na poça metálica, o qual expulsa os gases dissolvidos, eliminando as porosidades. Os ciclos de alta energia atuam no sentido de eliminar a falta de fusão, enquanto que os ciclos de baixa energia são os responsáveis pela adequada sustentação do banho metálico nas posições vertical e sobrecabeça. Em termos visuais, considerando molhabilidade e altura do cordão, o depósito se apresenta superior a um depósito realizado com o MIG convencional (21; 22).

2.2.2 O processo PTAP

Como segunda alternativa, aparece uma opção promissora para o revestimento com camada nobre de proteção dos tubos de caldeiras, o processo PTA (*Plasma Transferred Arc*). Este processo é similar a uma aspensão com pó, entretanto se diferencia principalmente pelo fato da fonte calorífica ser um arco voltaico estabelecido entre o eletrodo e a peça, uma vez que na aspensão convencional por arco, este é interno à tocha. No LABSOLDA, o PTA alimentado com pó passou a ser chamado de PTAP.

É por se tratar de materiais nobres e já disponíveis na forma de pó metálico, que o LABSOLDA está desenvolvendo tecnologias para aprimorar o processo PTA, tendo em vista a aplicação em posições de soldagem muito mais complicadas que a plana (24; 25).

No processo PTAP utilizam-se três sistemas de gás. O primeiro é denominado de gás de plasma e quase sempre é argônio. O segundo é chamado de gás de proteção e o terceiro de gás de arraste do pó, sendo que este último é empregado para carregar o material consumível durante a aplicação do revestimento. Este processo de soldagem é promissor, posto que permite a mistura de ligas, aumentando seu espectro de aplicação. Esta tecnologia foi desenvolvida inicialmente como método alternativo de fabricação para revestimentos de alta qualidade sobre componentes utilizados na indústria nuclear. Várias são as vantagens atribuídas ao processo, as quais compreendem (12):

- O processo PTAP pode produzir uma diluição da ordem de 5%, muito inferior aos valores de 20-25% obtidos com o processo MIG/MAG. Para avaliar a qualidade de um determinado revestimento, um requisito importante é a diluição que quantifica o grau de mistura entre o metal de base, o qual apresenta baixa resistência, e o metal de adição, este com alta resistência. Assim, quanto menor a diluição, maior será a eficiência do revestimento aplicado na proteção a erosão, corrosão ou desgaste;

- Maior facilidade para a fabricação de materiais de enchimento para diferentes finalidades experimentais, posto que é factível a mistura de distintos pós para a obtenção de características desejáveis.

2.3 Manipuladores para soldagem

Na industrial mundial, a soldagem aparece como o processo de fabricação que mais emprega robôs (26). Na Alemanha, por exemplo, no final de 2003 cerca que 30% dos 34.700 robôs em operação na indústria eram voltados para soldagem. Este número salta para aproximadamente 55% quando analisado isoladamente a fabricação de motores para o setor automobilístico (27). No Brasil, há na faixa de 8.000 robôs instalados na indústria e, assim como na Alemanha, a maioria é aplicada no setor automotivo (28; 29).

Neste contexto, fica claro que o emprego de robôs vem se mostrando cada vez mais importante para a obtenção de trabalhos com melhor repetitividade e realizados em menor tempo. Isto gera significativa diminuição no custo final de produção ou de reparo de peças (30).

No que tange a soldagem, é interessante a implementação de sistemas robotizados principalmente por:

- Robôs podem realizar soldagem por longos períodos, bem como proporcionar maior produtividade, repetitividade, qualidade e eliminar as condições desfavoráveis ao soldador, uma vez que este passa a não mais atuar em um ambiente altamente insalubre (31);

- Sendo o robô um equipamento flexível, é factível e rápida a alteração no *software* para a execução de tarefas distintas. Logo, além de ter maior produtividade comparada ao processo manual, atua em diferentes tarefas, seja no processo de

fabricação de peças ou na manutenção, fato que não ocorre na automação dedicada (5).

Todavia, a implantação da automatização nunca pode ser encarada simplesmente sob um aspecto pontual, mas sim sob um cenário global, onde nem sempre a produtividade deve ser analisada pela simples medição de quantidades produzidas em um determinado instante. Muitas vezes esta quantidade pode ser menor do que a obtida em um processo produtivo já estabelecido, porque o que importa muitas vezes é o que ocorre após a produção em termos de qualidade do produto final.

Quando se fala a respeito de sistemas para o deslocamento da tocha de soldagem, geralmente o foco são os robôs antropomórficos industriais, Figura 1-5. Contudo, um amplo campo para a automatização da soldagem é vinculado com equipamentos voltados para a operação em campo.

No referido campo de trabalho, é encontrada mundialmente pequena variedade de fabricantes de equipamentos robustos e compactos destinados a soldagem em campo. Dentre os principais fabricantes merece destaque a empresa americana BUG-O SYSTEMS, a qual possui soluções para diversas aplicações. Um de seus equipamentos mais simples e prático é o manipulador GO-FER III, Figura 2-6. Este apresenta apenas um grau de liberdade e é destinado ao corte térmico e a soldagem em linha reta.

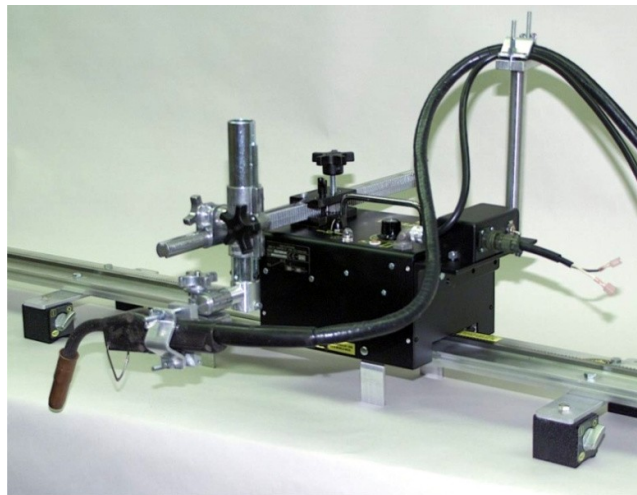


Figura 2-6 – GO-FER III: Manipulador para soldagem da empresa BUG-O com um grau de liberdade (32)

Nesta área de atuação, o LABSOLDA realiza há anos pesquisas que buscam fornecer ao mercado produtos de qualidade e com tecnologia nacional.

O primeiro dispositivo desenvolvido possuía, assim como o equipamento supracitado, um grau de liberdade e a finalidade de controlar a velocidade de deslocamento durante a trajetória de soldagem. Tal equipamento foi denominado de SDP. Entretanto, apresentava muitas limitações, em geral, relacionadas com a estrutura mecânica.

Visando solucionar os problemas do SDP, foi desenvolvido um novo equipamento, TARTÍLOPE V1, com uma concepção mecânica completamente nova, mas manteve-se basicamente a mesma unidade de controle (33; 34).

Com os conhecimentos adquiridos, tanto no SDP, quanto no TARTÍLOPE V1, o LABSOLDA iniciou a pesquisa de um sistema de deslocamento com dois graus de liberdade, TARTÍLOPE V2, Figura 2-7. O objetivo de tal desenvolvimento era a realização de soldas utilizando o movimento de tecimento, aliado a um sistema de seguimento de junta (31; 33).



Figura 2-7 – TARTÍLOPE V2 (35)

No campo da soldagem de dutos, o LABSOLDA já realizou testes com um sistema de soldagem MIG orbital, Figura 2-8. O referido equipamento possui rodas magnéticas para a fixação ao duto, apresenta automatização em dois graus de liberdade e faz uso de um motor CC para o acionamento do eixo X e um motor de

passo para o eixo Y. Tal manipulador apresentou bons resultados em um primeiro momento. Entretanto, o uso de tochas mais pesadas, mostrou-se inviável. Isto porque se gera aumento no momento de inércia, o qual pode desalinhar o manipulador em relação ao cordão de solda a ser realizado.

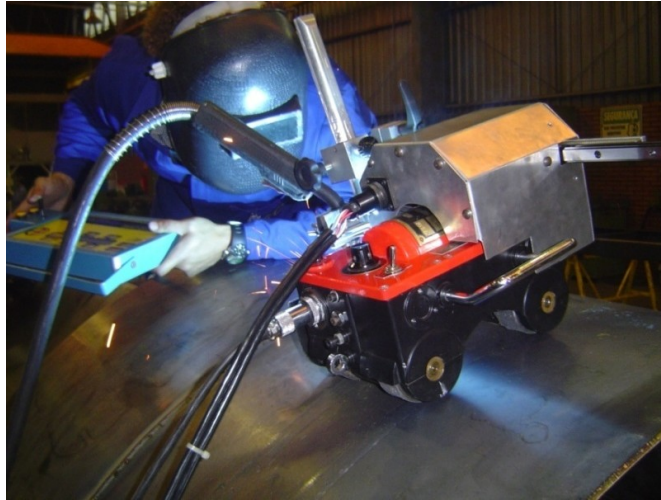


Figura 2-8 – Manipulador para soldagem MIG orbital

2.4 Tecnologias de acionamentos

No desenvolvimento de manipuladores são considerados fatores elementares sobre a dinâmica que o sistema deverá executar. Neste estudo, são definidas as velocidades máximas e as acelerações de cada junta. A partir destes dados criam-se subsídios para a seleção de um atuador, sendo que estes podem ser: pneumáticos, hidráulicos ou elétricos.

No contexto geral, o controle de movimentos na automação da soldagem segue alguns padrões típicos de desempenho esperado por uma determinada tecnologia de acionamentos. Em aplicações convencionais busca-se:

- Baixa inércia;
- Acelerações e desacelerações rápidas;
- Constância de velocidade;
- Resposta com pequeno *overshoot*;
- Baixa incerteza de posicionamento.

Com base nas características citadas, o emprego de atuadores pneumáticos na automação industrial é muito baixo, posto que há dificuldade em controlar o posicionamento devido à compressibilidade do fluido. Assim, é mais comum o uso de atuadores hidráulicos, que proporcionam elevados torques em baixas velocidades, ou motores elétricos, sendo estes voltados para altas velocidades e baixos torques (5).

Mesmo com a viabilidade em efetuar o controle de motores hidráulicos, a indústria utiliza mais os motores elétricos. Isto ocorre devido ao fato que os sistemas hidráulicos apresentam um maior custo, possuem baixa eficiência e poluem o ambiente de trabalho em caso de possível vazamento.

Todas as referidas tecnologias de acionamento apresentam duas formas para o controle de sua trajetória. O primeiro e mais tradicional dos métodos, é o acionamento em malha aberta, Figura 2-9. Em suma, quando é solicitado certo deslocamento da carga a determinada velocidade, não se tem garantia que o comando será executado com sucesso.

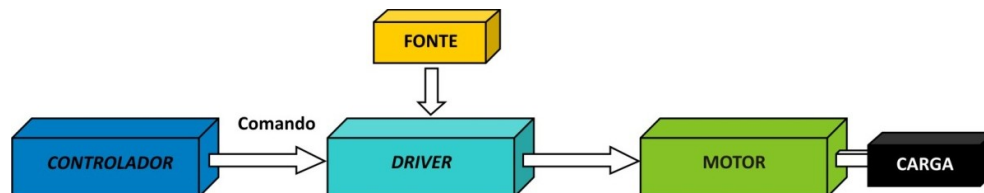


Figura 2-9 – Método de acionamento em malha aberta

O segundo caso, denominado de acionamento em malha fechada, Figura 2-10, utiliza um sistema eletrônico de controle de movimento que dosa a corrente fornecida ao motor, tendendo a manter os parâmetros desejados mesmo que forças externas atuem no sistema. Desta maneira, insucessos no deslocamento são menos prováveis, proporcionando alta confiabilidade na execução da trajetória.

Este sistema de acionamento em malha fechada pode ser encontrado em duas diferentes topologias. Na primeira delas a malha de controle é fechada por intermédio de um controlador, sendo que é utilizado um *driver* para o acionamento do servo motor, Figura 2-10(a). Já a outra metodologia, emprega um servo *driver*, o

qual é responsável pelo acionamento do servo motor em malha fechada de velocidade e posição.

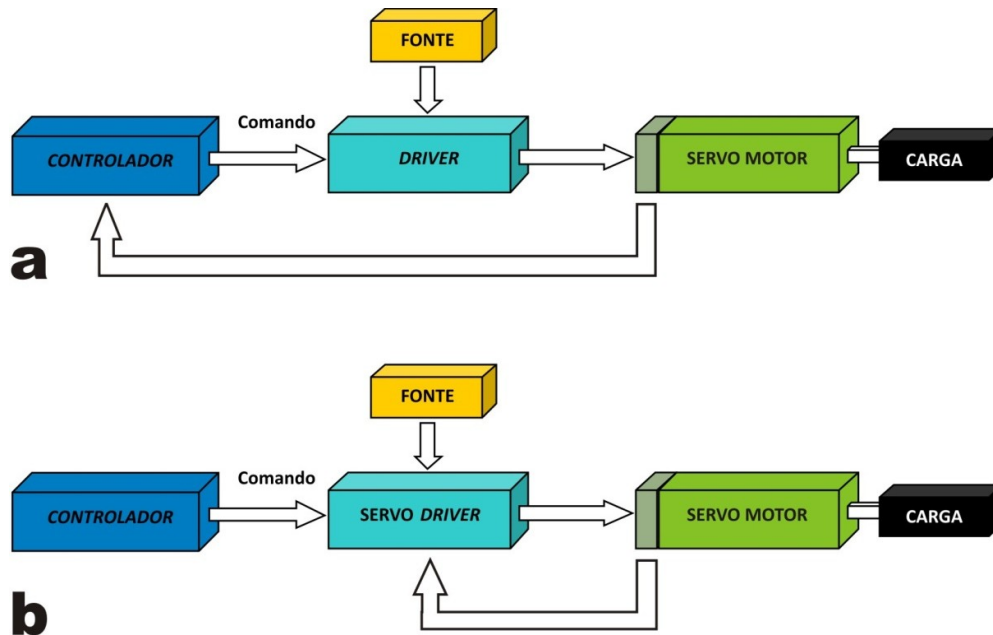


Figura 2-10 – Método de acionamento em malha fechada. Em (a) empregando um controlador e em (b) com a utilização de um servo driver

Uma vez que a tecnologia de acionamento que faz uso de *drivers* e motores elétricos é a mais empregada na automação industrial, cabe ressaltar que dentro dela encontram-se diversas subdivisões. Dentre estas podem ser destacadas (36; 37):

- Acionamentos com motores de passo;
- Acionamentos com servo motores de corrente contínua com escovas;
- Acionamentos com servo motores de corrente contínua sem escovas;
- Acionamentos com servo motores de corrente alternada síncronos.

Evidentemente todas as referidas tecnologias de acionamento elétrico apresentam vantagens e desvantagens. Ou seja, cada aplicação terá uma tecnologia mais indicada. A seguir são apresentadas tabelas que exemplificam as vantagens e desvantagens de cada tipo de tecnologia de acionamento elétrico (5; 26; 37; 38).

Tabela 2.1 – Vantagens x desvantagens do acionamento com motores de passo

Acionamentos com motores de passo	
Vantagens	Desvantagens
Solução de custo mais baixo	Ruído, ressonância e baixa suavidade em pequenas velocidades
Poucas restrições ambientais	Perda de posição não detectada em malha aberta
Baixo índice de defeitos	Consumo de corrente quando parado
	Excessiva perda eletromagnética em altas velocidades

Tabela 2.2 – Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua com escovas

Acionamentos com servo motores de corrente contínua com escovas	
Vantagens	Desvantagens
Baixo custo	Manutenção das escovas
Rotação suave em baixas velocidades	Baixo desempenho térmico
Altas velocidades em regime	Problemas em ambientes de vácuo
Alto pico de torque	
Grande variedade no mercado	
Eletrônica de acionamento de baixo custo	

Tabela 2.3 – Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente contínua sem escovas

Acionamentos com servo motores de corrente contínua sem escovas	
Vantagens	Desvantagens
Praticamente todas as vantagens dos servo motores de corrente contínua com escovas Manutenção reduzida Elevadas velocidades Praticamente não há restrições ambientais Bom desempenho térmico	Motor com custo elevado Eletrônica de acionamento complexa e cara

Tabela 2.4 – Vantagens x desvantagens do acionamento com servo motores de corrente alternada síncronos

Acionamentos com servo motores de corrente alternada síncronos	
Vantagens	Desvantagens
Torque constante em toda a faixa de velocidade Baixa relação peso potência Manutenção reduzida	Motor com custo mais elevado Eletrônica de acionamento mais complexa e cara

2.5 Controladores de Movimento

Na automação da soldagem, é indispensável um excelente controle de movimento, posto que falhas neste sistema interferem diretamente sobre a qualidade do cordão de solda.

No desenvolvimento de controladores de movimento, no contexto geral, pode-se adotar duas linhas de pesquisa. A primeira trata da elaboração de todo o *hardware* e

software de controle. Evidentemente, esta forma de trabalho promove maior flexibilidade ao equipamento, dado que há possibilidade de modificar qualquer parte do sistema, a fim de que mesmo seja adaptado às necessidades impostas na execução da tarefa. Contudo, a construção de *hardware* e *software* próprio acarreta em elevado tempo de desenvolvimento e necessidade de grande número de pessoas envolvidas no projeto. Estes dois aspectos elevam consideravelmente o custo final do projeto, o que geralmente não é interessante.

A segunda forma de efetuar o controle de movimento é por intermédio da aquisição de um sistema de controle comercial. Na maioria das vezes estes sistemas comerciais empregam placas que são utilizadas juntamente com um microcomputador convencional. Alguns exemplos destes sistemas são as placas NI 7344 (39) e DMC-1842 (40), produzidas respectivamente pela NATIONAL INSTRUMENTS e pela GALIL MOTION CONTROL. Ambas as placas tornam factível o controle de movimento para manipuladores com até quatro graus de liberdade, a partir de um microcomputador. Todavia, estas placas possuem elevado custo de aquisição, girando na ordem de US\$ 2000,00 cada. Tal fato torna inviável, em alguns casos, a aplicação destas placas para o controle de movimento de manipuladores que buscam ter baixo custo.

Em face aos elevados custos e com o objetivo de conceber um sistema de controle baseado em microcomputador, partiu-se para o estudo de controladores com tecnologia NC (*Numerical Control*). A referida tecnologia surgiu em meados do século 20, a partir de pesquisas em conjunto da força área norte-americana e do MIT (41). Contudo, passou a ganhar respaldo em 1972 com a introdução de microcomputadores para o controle do deslocamento (42). Deste momento em diante passou a ser tratada como tecnologia CNC (43).

Com a tecnologia CNC iniciou-se o desenvolvimento de *softwares* para edição e controle de trajetórias a serem executadas. Atualmente existe uma extensa variedade de controladores CNC, distinguindo-se entre sistemas de grande complexidade e custo elevado, e outros mais simples e com baixo custo.

Ao se tratar da implementação de controladores CNC em máquinas especiais, na maioria dos casos é vantajoso o emprego dos controladores mais simples e com baixo custo. Isto ocorre fundamentalmente porque sistemas com menor custo possuem flexibilidade para a reprogramação de algumas funções. Fato este que não ocorre com os sistemas mais complexos, posto que em geral são *softwares* de

arquitetura fechada, não possibilitando, desta forma, a configuração de parâmetros fundamentais para o correto funcionamento de um equipamento desenvolvido.

Inicialmente os *softwares* simples e com baixo custo interessavam principalmente a pessoas que fabricavam máquinas CNC apenas por *hobby*. Com o passar do tempo e significativa evolução destes sistemas, os mesmo tornaram-se muito procurados pela indústria. Neste campo da automação para a manufatura, os programas computacionais mais difundidos e com melhores resultados são o DeskCNC (44) e o Mach3 (45).

O DeskCNC é um pacote que engloba um *hardware*, Figura 2-11, que se comunica com o microcomputador por intermédio da porta serial. Operando em conjunto com o referido *hardware*, há um *software*, Figura 2-12, que possibilita utilizar o próprio teclado do computador para deslocar o manipulador, facilitando assim as definições de trajetórias de soldagem. Outro atrativo é o fato de converter arquivos de formatos variados (DXF, STL, Gerber) para código G. Assim, é factível criar trajetórias em diferentes programas, as quais serão transformadas para linguagem G automaticamente.

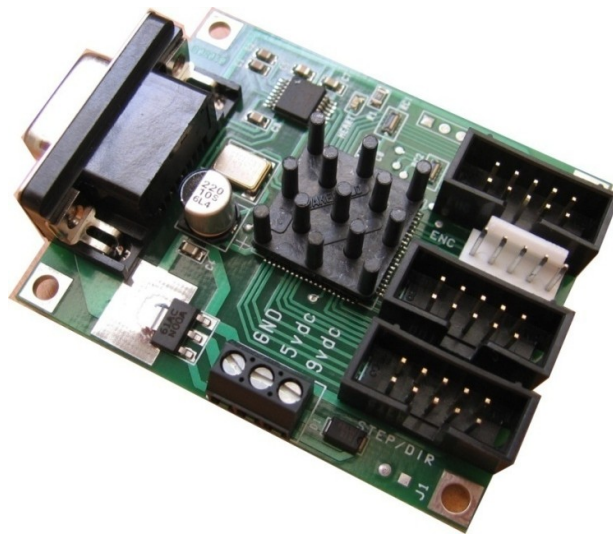


Figura 2-11 – *Hardware* DeskCNC com dimensões: 50 mm x 62 mm

Com a análise da Figura 2-12, tem-se em 1 a barra com as opções de parametrização do *software*, além do campo MDI e acionamento das saídas digitais: *Mist*, *Flood*, *CW*, *CCW*, *AUX1*, *AUX2* e *AUX3*. O número 2 ilustra a trajetória a ser percorrida pelo manipulador. Em 3 é observado o programa em código G, o qual

pode ser editado. Os controles de deslocamento manual dos eixos, bem como a posição atual, botão de pausa e parada de emergência são vistos em 4.

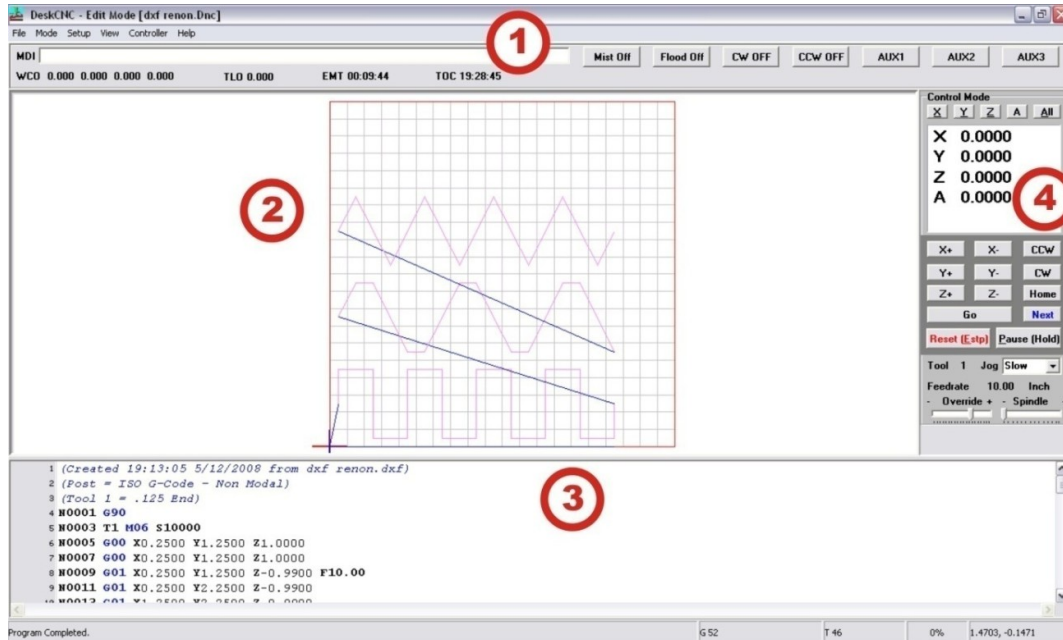


Figura 2-12 – Tela de comando do programa DeskCNC

Mesmo com as vantagens do DeskCNC, cada vez mais a indústria necessita de ferramentas flexíveis, com possibilidade de adaptação a diferentes tarefas. Tal fato é relevante, pois assim se evita gastos com aquisições de novos sistemas, além de redução no treinamento de mão de obra. Neste contexto, o controlador CNC Mach3 desponta como uma excelente opção de controle com baixo custo para fresadoras, tornos e robôs manipuladores cartesianos com até 6 juntas, 3 prismáticas e 3 rotacionais.

O primeiro grande atrativo do Mach3 é o fato de ser um *software* livre para programas com até 500 linhas de código G. Logo, é possível um estudo preliminar de suas funcionalidades sem que haja necessidade de aquisição do programa. O custo da versão completa é de US\$ 159,00, o que o torna bem acessível. Outro ponto de estímulo ao uso do Mach3 é a grande rede de comunicação existente entre os usuários do sistema pelo mundo. Os diversos fóruns e grupos de pesquisa garantem uma excelente base de suporte, o que proporciona maior eficiência e dinamismo para o desenvolvimento de novas aplicações e funcionalidades.

A tela básica de comando do Mach3, Figura 2-13, a qual é destinada a operação de fresamento, apresenta suas funções principais. No item 1 destaca-se a barra com as opções de configuração do *software*. Nesta barra de ferramentas têm-se as opções para criação de arquivos, configurações dos pinos de entrada e saída de sinais, rampa de aceleração dos motores, configurações de *plugins*, seleção de telas e edição das funções pertinentes aos botões da tela. Já em 2, visualiza-se o programa em código G que será executado. Tal visualização do código em execução é fundamental, pois desta maneira é possível que o operador detecte algum erro de programação e cancele a operação. Em 3 encontram-se as posições correntes dos eixos, bem como a opção de referenciá-los. Em 4 tem-se a ilustração das trajetórias a serem realizadas. Tal ilustração ajuda na detecção de erros mais grosseiros de trajetória. Em 5 o controle do processo, com opções de *start*, *stop*, *load G code*, *edit G code*, entre outros. Este item traz as principais ações de comando do Mach3. O item 6 mostra as informações pertinentes à ferramenta utilizada, onde se tem informações como o diâmetro, altura e posição no carrossel de ferramentas. Os dados relativos ao *feed rate* da máquina são vistos no item 7. Aqui é factível a alteração da velocidade de deslocamento no transcórre da execução da trajetória, a fim de corrigir possíveis erros de programação. O campo referente ao item 8 permite a visualização da velocidade em rpm do eixo árvore.

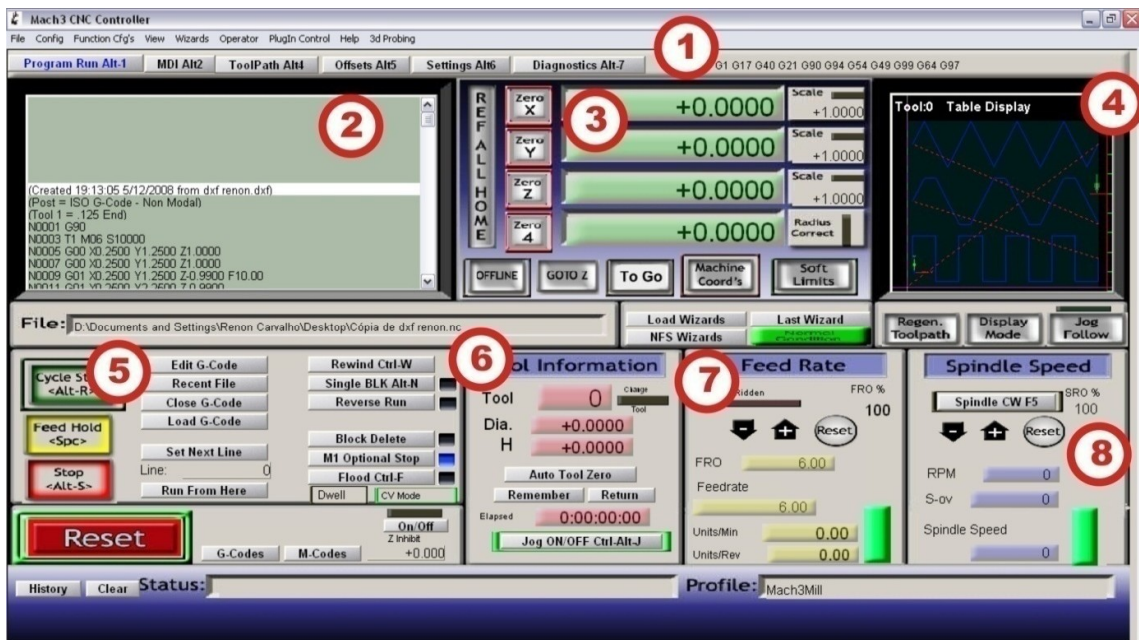


Figura 2-13 – Tela genérica do controlador CNC Mach3

2.6 Síntese deste capítulo

Os desenvolvimentos no campo da automação agregam novas possibilidades para o aprimoramento de técnicas de soldagem, tanto para união de dutos como para revestimento de tubos de caldeiras de termelétricas.

Para a evolução de sistemas robóticos é primordial o conhecimento das tecnologias de acionamento e controle de trajetórias. Dentre as principais tecnologias de acionamento destacam-se motores de passo, servomotores de corrente contínua com escovas, servomotores de corrente contínua sem escovas e servomotores de corrente alternada síncronos. Cada um dos diferentes tipos de motor possuem vantagens e desvantagens a serem consideradas em cada projeto.

No que tange a formas de controle de trajetórias, o controlador CNC Mach3 desponta como uma solução de baixo custo e excelente flexibilidade de programação. Assim, é factível desenvolver um equipamento automatizado que seja facilmente aplicado na soldagem industrial.

Entretanto, juntamente com a implementação de sistemas mecatrônicos é de substancial importância a elaboração de métodos de soldagem que proporcionem trabalhos com maior qualidade. Logo, o foco é o emprego do processo MIG/MAG, bem como suas variantes, para a união de dutos. Já para o revestimento de tubos de caldeiras de termelétricas, o objetivo é diminuir o tempo de manutenção e aumentar o tempo entre paradas por intermédio do desenvolvimento de metodologias de soldagem com materiais nobres.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO EQUIPAMENTO DESENVOLVIDO

A pesquisa relacionada ao desenvolvimento de um robô CNC, com flexibilidade para a soldagem de dutos e paredes curvas, foi iniciada no LABSOLDA há cerca de três anos. Neste período, o projeto, denominado TARTÍLOPE V4, passou por diversas fases e modificações.

O TARTÍLOPE V4 é um manipulador com quatro graus de liberdade, constituído por três juntas prismáticas e uma rotacional, Figura 3-1. Cada uma destas juntas tem função específica no processo de soldagem, a saber:

- Junta prismática X: realiza o deslocamento no sentido da soldagem com a velocidade especificada;
- Junta prismática Y: responsável pelo seguimento e tecimento do cordão de solda;
- Junta prismática Z: ajuste da DBCP;
- Junta rotacional A: deslocamento angular em torno da junta prismática X ou Y, com o objetivo de definir o ângulo entre a tocha de soldagem e a superfície da peça a ser soldada.

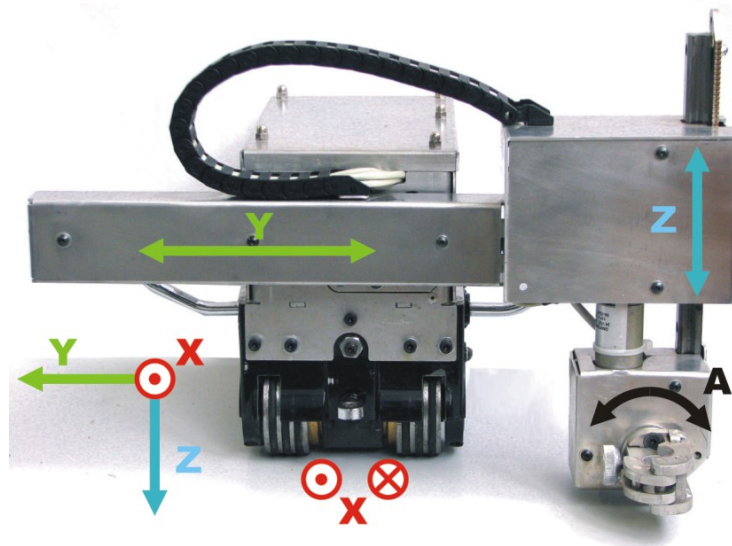


Figura 3-1 – Juntas do manipulador robótico

3.1 Detalhamento funcional global

A concepção adotada no projeto do TARTÍLOPE V4 utiliza como unidade de controle um microcomputador convencional, o qual pertence a uma subdivisão denominada painel elétrico de controle, Figura 3-2. Este é responsável pelo controle de todo o equipamento, desde a IHM para programação por parte do usuário, até a execução da trajetória do robô.

Assim, o computador é parte fundamental do sistema, onde está contido o programa com a trajetória e os parâmetros de soldagem. Dentro do painel elétrico existe ainda as placas de isolamento de sinais de entrada e saída, além dos servo *drivers*, para o acionamento dos servo motores e o circuito lógico de intertravamento.

O funcionamento básico do sistema dá-se de tal forma que ao se ligar o equipamento, o circuito lógico de intertravamento verifica todos os sensores de fim de curso, bem como os servo *drivers*. Caso haja algum problema é enviado ao operador um sinal de parada de emergência. Este sinal também impossibilita o deslocamento do TARTÍLOPE V4 até que o operador resolva o problema, ou seja, o sistema retorna à estabilidade. A partir de tal momento, o TARTÍLOPE V4 está pronto para ser utilizado.

A programação do equipamento é realizada por intermédio de uma IHM em ambiente gráfico. É possível operar o manipulador em modo de captura de pontos ou carregar um arquivo que já tenha sido utilizado. Finalizada a programação, o operador comanda a execução da trajetória. Durante a realização da soldagem o painel elétrico verifica constantemente os sensores contidos no manipulador. Na ocorrência de alguma inconformidade, o deslocamento é paralisado imediatamente e a fonte de soldagem desabilitada. É gerado um sinal de parada de emergência e o sistema aguarda que o problema seja corrigido pelo operador.

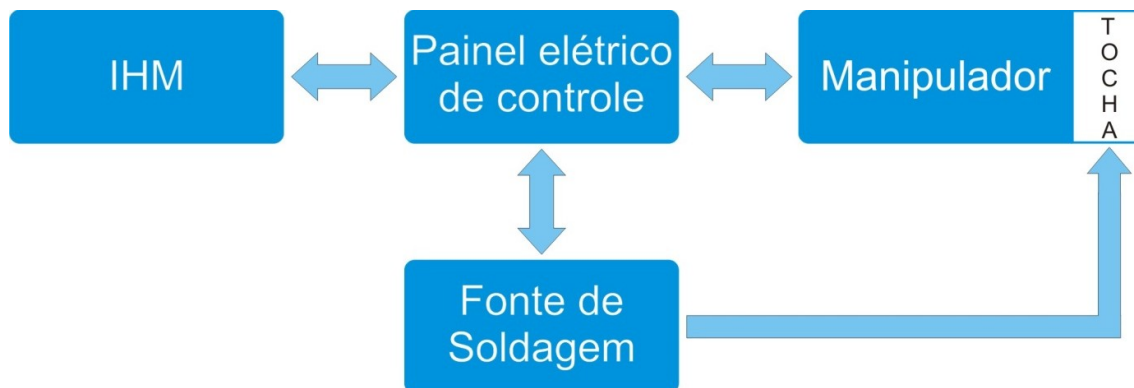


Figura 3-2 – Diagrama geral de funcionamento

3.2 Concepção mecânica

Na concepção mecânica do TARTÍLOPE V4 sempre se buscou a flexibilidade para a operação em diferentes tarefas, bem como suprir questões de caráter adaptativo as situações de trabalho propostas.

Neste contexto, na busca de uma solução genérica o projeto mecânico do manipulador sofreu inúmeras alterações no transcorrer do desenvolvimento. Tais modificações foram embasadas em resultados obtidos em testes experimentais, tanto em laboratório como em campo. A seguir, são apresentadas as principais mudanças na estrutura mecânica durante a evolução do TARTÍLOPE V4.

3.2.1 Manipulador com rodas magnéticas

A base para o projeto mecânico do TARTÍLOPE V4 foi uma tartaruga magnética destinada à condução de uma tocha na tarefa de corte de dutos, Figura 3-3. A adoção da idéia de utilizar uma concepção com magnetismo ocorreu a fim de gerar a flexibilidade desejada ao projeto. Um mecanismo com rodas magnéticas seria facilmente instalado em dutos, bem como em tubos caldeiras de termelétricas.

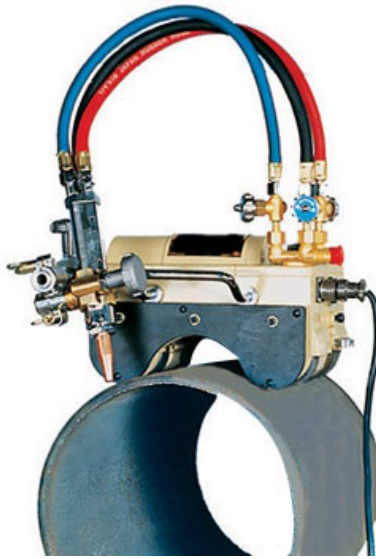


Figura 3-3 – Tartaruga magnética para corte de dutos (46)

Esta mesma concepção já havia sido testada no projeto MIG Orbital, Figura 2-8. No referido projeto, os resultados foram satisfatórios, o que motivou a continuação da pesquisa com rodas magnéticas.

Desta forma, o projeto MIG Orbital sofreu uma reformulação com o intuito de incluir mais dois graus de liberdade e transferir as placas eletrônicas de controle para o interior do manipulador. Assim, projetou-se o modelo em CAD do primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4, Figura 3-4. Este equipamento teria a possibilidade de ser adaptado a diferentes formas de superfície, tornando viável o emprego de um mesmo sistema robótico para a soldagem de dutos e de tubos de parede de caldeira de termelétricas. Em virtude desta flexibilidade desejada e de que as operações de soldagem citadas serem extremamente distintas, a junta rotacional do TARTÍLOPE V4 foi projetada para ser montada de duas maneiras. Na Figura 3-4(a) a referida junta efetua rotação em torno da junta prismática Y, sendo destinada à soldagem de dutos. Já na Figura 3-4(b) a rotação se dá em torno da junta prismática X, tal montagem é aplicada a soldagem de tubos de parede de caldeira.

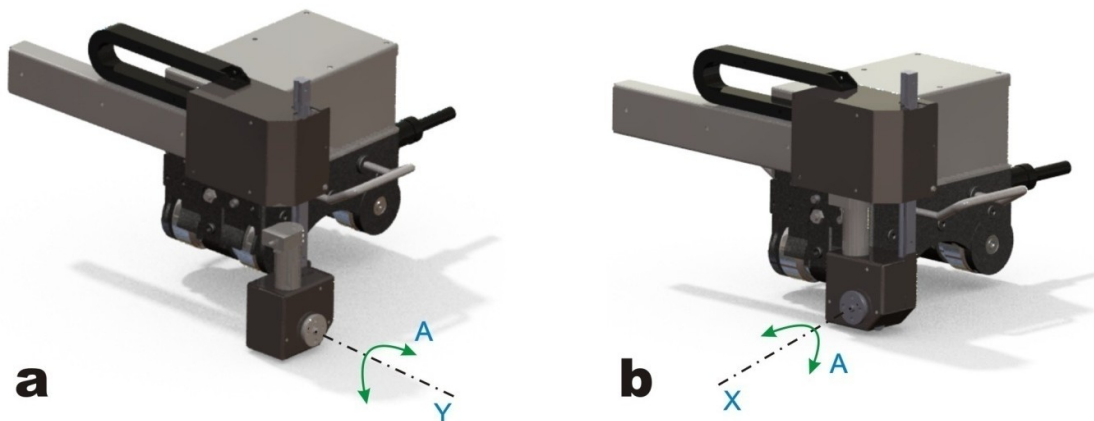


Figura 3-4 – Primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4. Em (a) concepção para soldagem de dutos e em (b) para soldagem de tubos de parede de caldeira

No entanto, os primeiros testes de deslocamento, os quais foram realizados sobre tubos de parede de caldeira, tiveram resultados insatisfatórios. O problema estava relacionado com uma forte tendência de desalinhamento do manipulador em relação ao cordão de solda a ser realizado. Isto ocorria uma vez que as rodas magnéticas apresentavam uma superfície de contato reta, enquanto que os tubos das paredes possuem uma determinada curvatura.

Por este fato, o circuito magnético era fechado apenas em um ponto de contato entre roda e o tubo. O ideal seria que existisse uma área de contato com a maior dimensão possível. Assim, as rodas do manipulador foram re-projetadas com o intuito de se adequarem aos tubos das paredes, Figura 3-5.

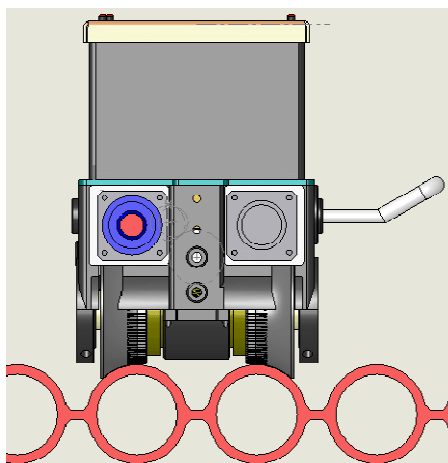


Figura 3-5 – Rodas adaptadas para os tubos de caldeira

Todavia, mesmo com as modificações, os ensaios não proporcionaram repetitividade e confiabilidade ao sistema de deslocamento. Tal resultado pode ser explicado por imperfeições na geometria dos tubos, que em certos instantes faziam com que uma das rodas perdesse contato com a superfície, provocando a abertura do circuito magnético. Como consequência, o manipulador continuou com o problema de desalinhamento.

Na aplicação para soldagem orbital de dutos, os testes tiveram melhores resultados. Entretanto, não foi possível garantir a confiabilidade do movimento orbital, posto que esporadicamente o sistema de deslocamento saía de curso e desprendia-se do duto.

Em consequência dos resultados insatisfatórios alcançados nos experimentos com rodas magnéticas, concluiu-se que tal concepção mecânica era inviável para o TARTÍLOPE V4. Esta conclusão explica-se pelo fato que o momento de inércia gerado com a inclusão de dois graus de liberdade ao sistema de soldagem MIG Orbital, resultou em esforços mecânicos superiores aos suportados pelas rodas magnéticas.

A partir deste momento, o projeto mecânico ganhou duas vertentes. A primeira trabalhou focada em um sistema robótico para a soldagem de superfícies livres, enquanto que a segunda buscou a solução para a soldagem de dutos. Ambas teriam o mesmo sistema de controle e interface gráfica com o usuário, o que proporciona significativa diminuição dos custos de desenvolvimento, relacionados, tanto com mão de obra, como com equipamentos.

3.2.2 TARTÍLOPE V4-F: Manipulador para a soldagem de superfícies livres

Devido às dificuldades apresentadas anteriormente, o projeto mecânico do manipulador para a soldagem de tubos de caldeiras foi completamente modificado, passando a ser denominado de TARTÍLOPE V4-F.

Este equipamento desloca-se sobre um trilho flexível por intermédio de um sistema de engrenamento. Inicialmente foi montado em um trilho de 1,20 m, podendo-se adicionar outros trilhos, a fim de aumentar o espaço de trabalho do equipamento. Quanto à junta angular, continua passível de ser ajustada de acordo com a tarefa para rotacionar em torno da junta prismática X ou Y. Esta facilidade de

adaptação é fruto do caráter modular aplicado na elaboração do protótipo, Figura 3-6.

As vantagens do TARTÍLOPE V4-F estão relacionadas diretamente com a estrutura mecânica, posto que este é um equipamento mais leve, em torno de 13 kg, enquanto que a primeira versão do projeto estava na faixa de 17 kg. Esta redução de peso explicasse pelo fato de o TARTÍLOPE V4-F ser totalmente construído com chapas de alumínio, enquanto a primeira versão possuía parte de ferro fundido. Juntamente a este ponto, foi concebido um novo sistema de transmissão de movimento, proporcionando maiores acelerações e velocidades de deslocamento. Por exemplo, a velocidade de deslocamento da junta prismática X passou de 800 mm/min para 1000 mm/min, já a da junta prismática Y aumentou de 900 mm/min para 1400 mm/min.

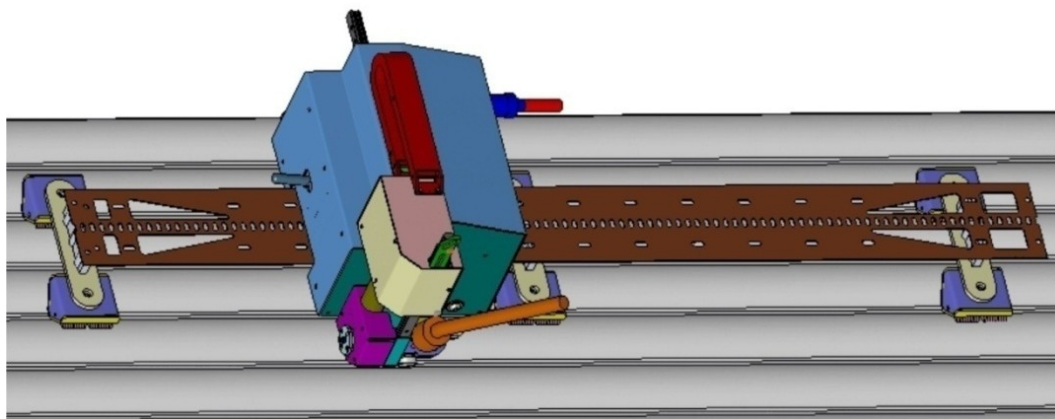


Figura 3-6 – TARTÍLOPE V4-F

Para simplificar a instalação do trilho flexível na parede da caldeira, foram projetados fixadores magnéticos de sustentação, onde estes se encaixam perfeitamente no espaço entre os tubos da caldeira. Foi fundamental a construção de um fixador que pudesse ser alterado de forma simples. Isto porque dentro de uma mesma planta de usina termelétrica existem diferentes diâmetros de tubos de caldeira. A Figura 3-7 apresenta em detalhe o fixador magnético. As partes em azul e amarelo são de alumínio, logo não fazem parte do circuito magnético. Já as quatro peças em roxo são ferromagnéticas e podem ser alteradas de acordo com o diâmetro dos tubos de cada caldeira. No interior do fixador há quatro ímãs de Neodímio-Ferro-Boro, os quais possuem as melhores características magnéticas.

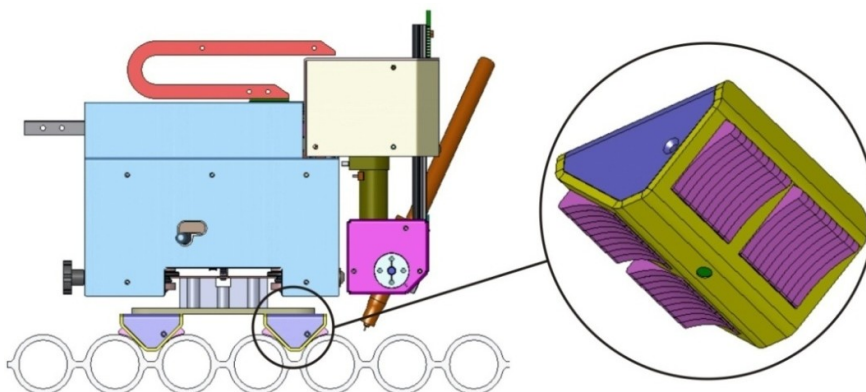


Figura 3-7 – Fixador magnético em destaque

3.2.3 TARTÍLOPE V4: Manipulador para soldagem orbital

Mesmo com as dificuldades encontradas no sistema com rodas magnéticas, o manipulador para a soldagem orbital continuou sendo elaborado em torno deste conceito. Isto ocorreu uma vez que não é factível o uso do TARTÍLOPE V4-F para a soldagem orbital, pois devido à forma de transmissão de movimento, por intermédio de uma engrenagem, existe um raio mínimo para que haja o correto engrenamento. Este raio mínimo, por sua vez, é muito superior aos encontrados nos dutos das linhas de transmissão de petróleo e gás.

O principal problema das rodas magnéticas estava relacionado com a força de aderência ao duto. Assim, o novo projeto buscou formas de elevar tal força. A primeira concepção adotou rodas magnéticas e uma cinta orbital dinâmica com roletes de nylon, Figura 3-8. A referida cinta possui um sistema para o ajuste da pressão exercida pelo manipulador sobre o duto, por intermédio de uma mola. Os resultados desta solução foram insatisfatórios, uma vez que com o aumento da pressão nas rodas do manipulador ocasionou forte tendência a escorregamento durante o deslocamento na vertical.

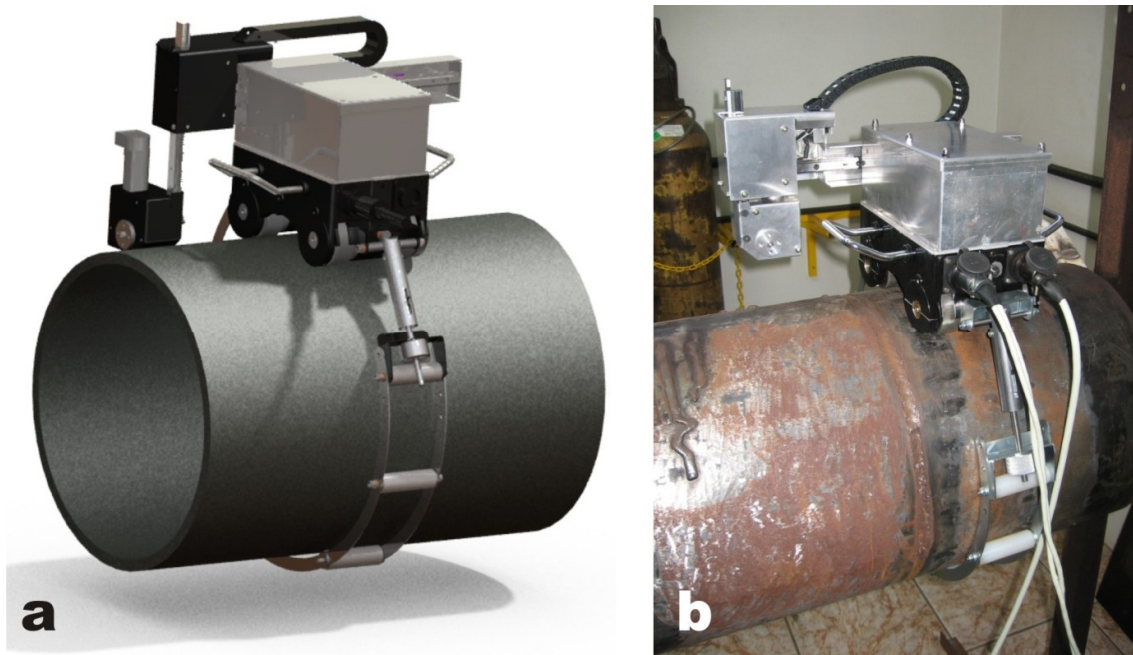


Figura 3-8 – Cinta orbital dinâmica com rolete de nylon. Em (a) projeto CAD e em (b) testes de deslocamento orbital

A partir da análise do problema de escorregamento, concluiu-se que o mesmo era proveniente do fato do movimento ser realizado entre duas superfícies metálicas, o que levou a um re-projeto das rodas. Inicialmente, as mesmas deixaram de ser magnéticas, posto que o atrito entre elas e o duto passou a ser determinado pela força ajustada na cinta com roletes. A segunda alteração foi a inclusão de três anéis de borracha nas rodas, a fim de diminuir o escorregamento, Figura 3-9.

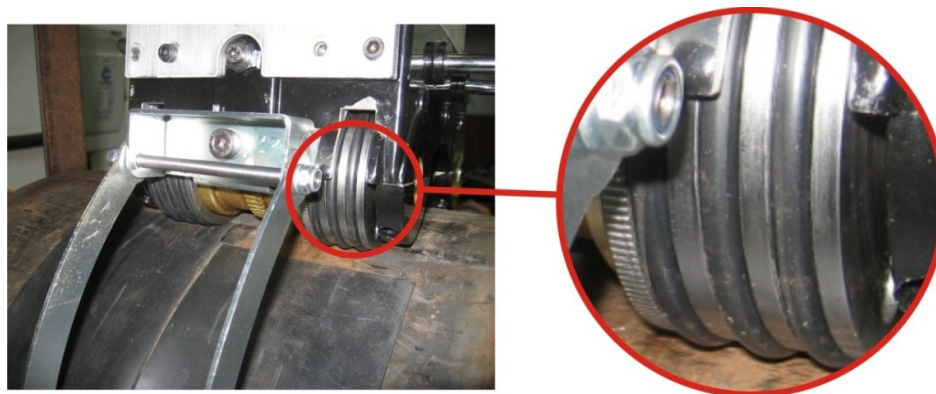


Figura 3-9 – Roda com anéis de borracha

Com estas novas alterações, o robô passou a apresentar repetitividade no deslocamento, fato que demonstra a eliminação dos escorregamentos. Entretanto, o atrito gerado pelos roletes de nylon no duto impossibilitava que o sistema robótico atingisse velocidades de deslocamento superiores a 30 cm/min. Mesmo com a ampla utilização desta ordem de velocidade para a soldagem, não é interessante que o equipamento fique limitado neste valor. Isto porque, o tempo de posicionamento e programação do manipulador seria extremamente elevado, gerando baixa produtividade.

Com a premissa de solucionar o problema do elevado atrito dos roletes de nylon, o projeto foi reformulado. Nesta nova fase, optou-se pela utilização de uma cinta orbital rígida, constituída por duas partes de 180°, Figura 3-10. Desta forma, o TARTÍLOPE V4 passou a se deslocar sobre esta cinta, não existindo mais contato direto com o duto.

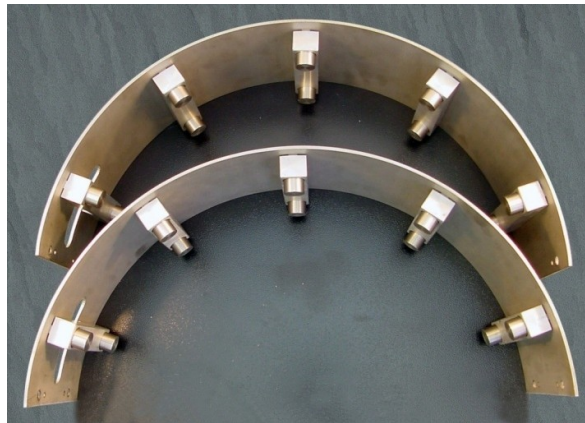


Figura 3-10 – Cinta orbital rígida

Para proporcionar repetitividade e robustez no deslocamento, desenvolveu-se um mecanismo de fixação no qual o operador ajusta a pressão entre as rodas do TARTÍLOPE V4 e a cinta orbital rígida. Além disto, este mecanismo opera como guia lateral, com o intuito de evitar desalinhamentos.

A Figura 3-11 traz em detalhe as partes que constituem o mecanismo de fixação. O número 1 indica o sistema de rolamentos responsáveis pela fixação do TARTÍLOPE V4 à cinta. Com este sistema conseguiu-se resolver a problemática do escorregamento sem que haja elevadas perdas de energia, decorrentes principalmente pelo atrito. Em 2 é caracterizado o elo entre as partes traseira e

dianteira dos fixadores. Estes elos têm por objetivo evitar o desalinhamento dos fixadores entre si. O item 3 ilustra o componente responsável por prender o mecanismo de fixação ao TARTÍLOPE V4. Por fim, em 4 tem-se o ajuste da pressão entre roda e a cinta orbital. Este ajuste é efetuado de forma manual pelo operador, com a rotação da alavanca do manípulo. É fundamental que haja uma atenção ao se ajustar esta pressão, pois, caso seja muito elevada, o manipulador terá dificuldades de deslocamento, podendo ocasionar danos a parte mecânica de acionamento. Por outro lado, se a pressão for pequena haverá deslizamento, com conseqüente interferência na qualidade da soldagem.

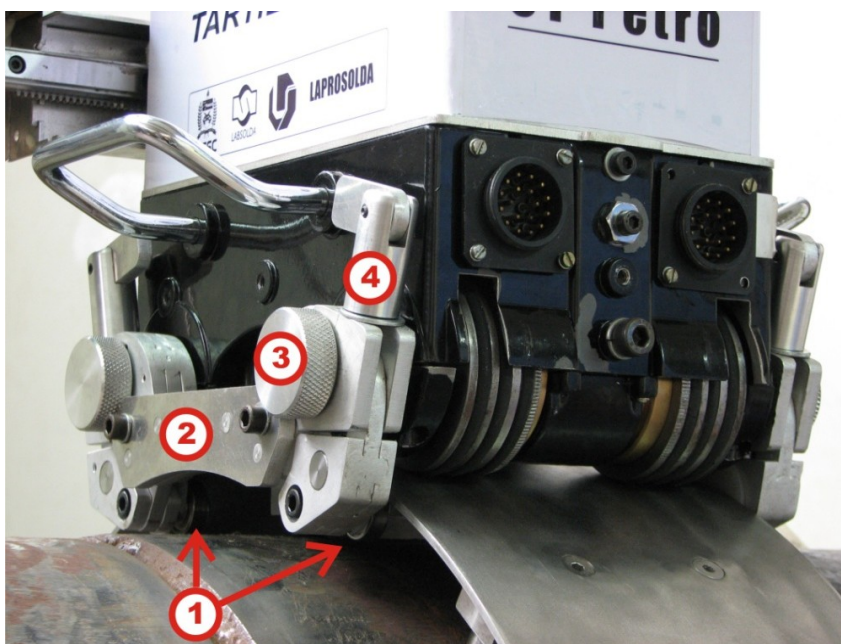


Figura 3-11 – Mecanismo de fixação do TARTÍLOPE V4 à cinta orbital rígida

3.2.4 A flexibilidade do TARTÍLOPE V4

Como já descrito, o projeto ganhou duas vertentes após os insucessos com o sistema de deslocamento com rodas magnéticas. Uma delas voltada para a soldagem de superfícies livres, TARTÍLOPE V4-F, e outra para a soldagem orbital, TARTÍLOPE V4.

Entretanto, no decorrer do desenvolvimento, os avanços alcançados com o TARTÍLOPE V4 superaram as expectativas iniciais. O que seria apenas uma

concepção mecânica voltada para a soldagem orbital, mostrou-se uma boa solução para a soldagem de superfícies livres. Em decorrência disto, o projeto do TARTÍLOPE V4-F foi posto em segundo plano, não sendo efetuados testes de soldagem com o mesmo.

A Figura 3-12 apresenta toda a flexibilidade alcançada pelo TARTÍLOPE V4, uma vez que o mesmo é facilmente adaptado para a soldagem de dutos, Figura 3-12(a), soldagem na posição vertical, Figura 3-12(b), e soldagem na posição horizontal, Figura 3-12(c).

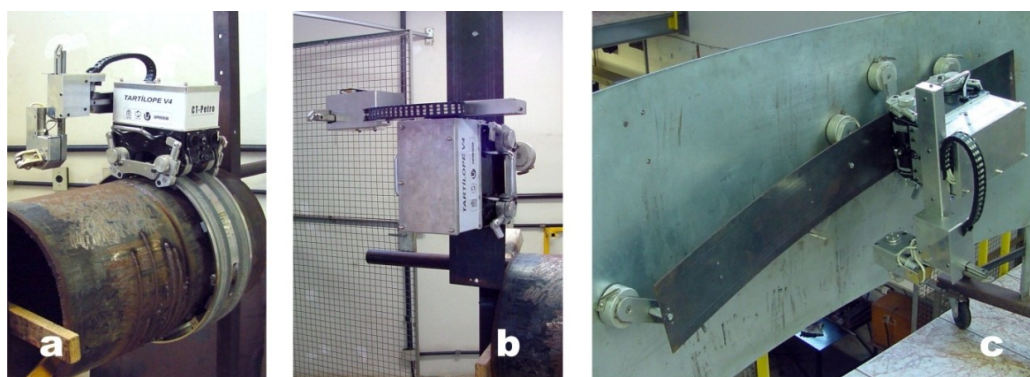


Figura 3-12 – TARTÍLOPE V4: em (a) deslocamento orbital, em (b) vertical em superfície plana e em (c) horizontal em superfície curva

3.2.5 TARTÍLOPE V4 – Segunda geração

O primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4 já se apresentava como um equipamento funcional. Contudo, era clara a necessidade de ser aplicada uma engenharia de produto para melhorar sua transportabilidade e facilidade de instalação, bem como características dinâmicas. Os principais problemas do primeiro protótipo são:

- Velocidades e acelerações baixas na junta prismática Y. Desta forma, é inviável a realização de tecimentos com frequências maiores do que 2 Hz;
- Pequena faixa de deslocamento angular, cerca de 100°, da junta rotacional A, o que dificulta o correto posicionamento da tocha de soldagem em determinadas tarefas. Além disto, a velocidade de deslocamento também é muito baixa, o que gera elevado tempo para ajuste do ângulo de ataque;
- Incorreto posicionamento da junta prismática Y. Como o desenvolvimento do primeiro protótipo foi efetuado a partir de uma tartaruga magnética já existente no

mercado, não foi factível o correto posicionamento da junta prismática Y. Desta forma, a referida junta ficou alocada na parte frontal do equipamento. Isto causa basicamente dois inconvenientes: O primeiro deles diz respeito ao alinhamento da junta Z com o centro do duto. Este é importante para que a tocha mantenha-se perpendicular ao duto sem que seja necessário atuar na junta A, o que tornaria a operação mais complicada. A Figura 3-13(a) ilustra que o eixo da junta Z está totalmente desalinhado em relação ao centro do duto. O segundo problema é causado pela má distribuição de massa. Neste protótipo o centro de gravidade está muito deslocado para a parte frontal esquerda, Figura 3-13(b) e (c), o que causa uma elevada tendência de desalinhamento do manipulador.

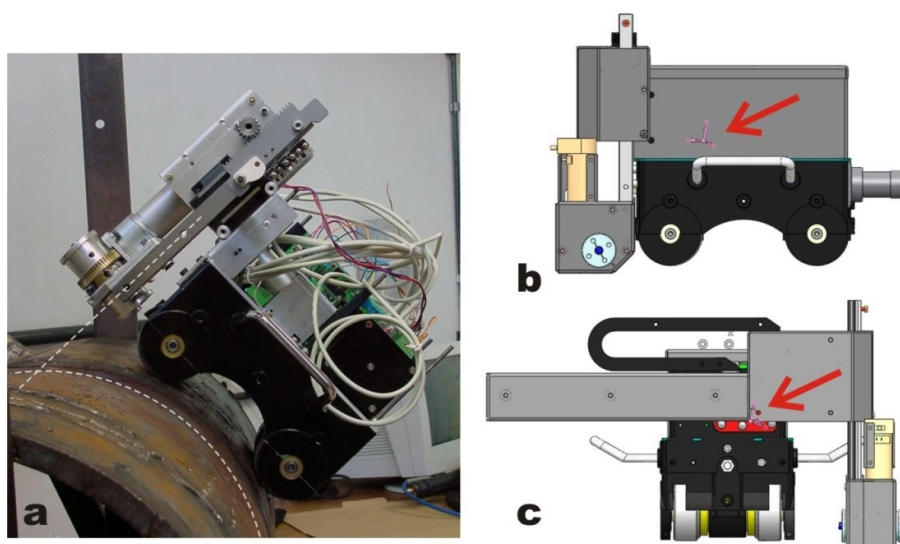


Figura 3-13 – Efeitos causados pelo incorreto posicionamento da junta prismática Y. Em (a) desalinhamento da junta Z em relação ao centro do duto e em (b) e (c) centro de gravidade na parte frontal esquerda

Com o conhecimento das dificuldades encontradas pelo primeiro protótipo, partiu-se para um novo projeto mecânico. Este objetivava solucionar os problemas supracitados, tornar o equipamento mais versátil e eliminar a dependência da base estrutural de uma tartaruga magnética comercial.

Nesta nova etapa, os projetos mecânicos das juntas Z e A praticamente não sofreram alterações. Houve apenas algumas modificações nas capas de proteção, contra respingos de solda, dos motores e das guias lineares. Além disto, a relação

de transmissão da junta A foi redimensionada, proporcionando ganho significativo na velocidade de deslocamento, posto que passou de aproximadamente 120 graus/min para cerca de 300 graus/min. Entretanto, as grandes mudanças ocorreram nas juntas X e Y, as quais foram totalmente reformuladas, e no sistema de fixação do manipulador à cinta orbital rígida ou ao trilho flexível.

A junta prismática X, que corresponde à estrutura-base do manipulador seguiu o sistema de transmissão de movimento por intermédio de rodas, contudo, estas deixaram de ser magnéticas. Nos projetos anteriores, TARTÍLOPE V4 E V4-F, grande parte da eletrônica de acionamento estava embarcada no próprio manipulador. Agora todas as placas foram migradas para um gabinete externo. Deste modo, reduziu-se a altura do equipamento, além de possibilitar as modificações necessárias na junta Y.

Toda a nova estrutura é fabricada com chapas de alumínio cortadas a laser. Posteriormente, as mesmas são montadas tomando um gabarito como referência e soldadas. Esta metodologia de construção proporcionou baixo custo para a fabricação do sistema, bem como grande redução de peso, dado que no primeiro protótipo a estrutura era de ferro fundido. A Figura 3-14 apresenta o segundo protótipo em fase final da montagem de sua base.

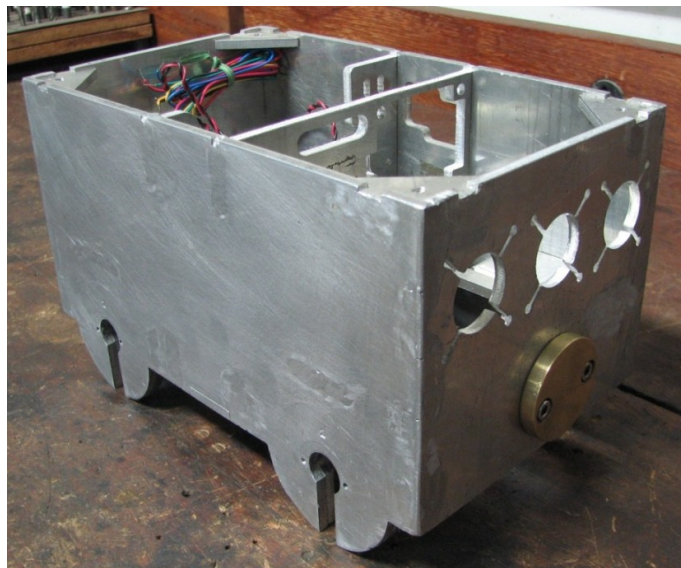


Figura 3-14 – Estrutura do TARTÍLOPE V4 segunda geração

As transmissões de movimento também foram re-projetadas, a fim de elevar a velocidade de deslocamento do manipulador, sem diminuição da confiabilidade, Figura 3-15. Na referida imagem, em 1 tem-se o servo motor empregado para o acionamento da junta prismática X. Em 2 há uma engrenagem na saída do servo motor, sendo que esta transmite o movimento de rotação para outra engrenagem montada no eixo central do robô. Neste eixo central está instalado dois sem-fins, mostrados em 3. Estes têm a função de transmitir o movimento de rotação para os eixos das rodas.

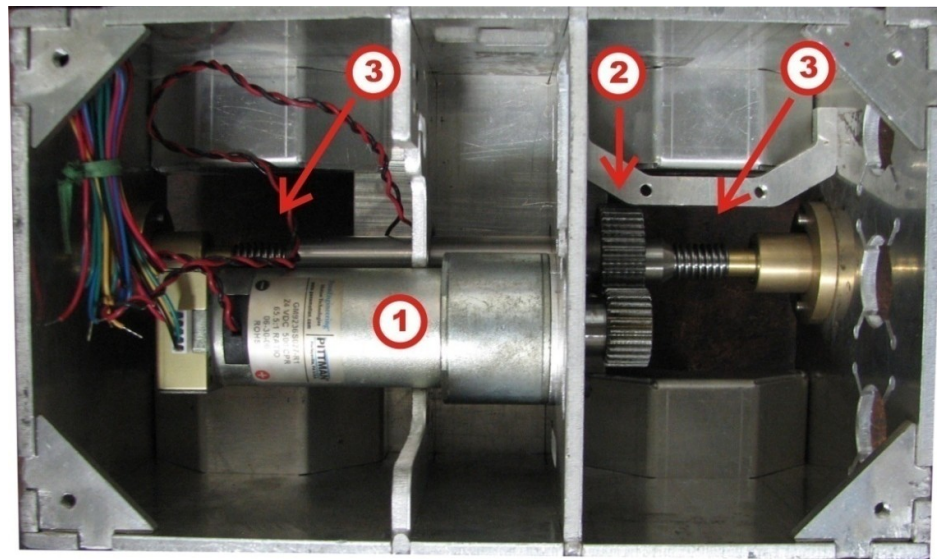


Figura 3-15 – Interior do TARTÍLOPE V4

No centro do eixo das rodas há uma engrenagem, Figura 3-16, que realiza a transmissão da rotação do sem-fim para as rodas. Estas receberam atenção especial neste re-projeto. Em virtude de que os principais problemas do TARTÍLOPE V4 eram relacionados com o atrito entre roda e a cinta orbital, houve um estudo sobre o melhor método para execução desta transmissão. Como resultado, foram projetadas rodas com a parte central de alumínio recobertas com poliuretano, Figura 3-16, as quais proporcionaram o contato desejado. Outro fator preponderante é que dada a rigidez do poliuretano, há garantia de que ao ser colocada pressão sobre as rodas, o diâmetro das mesmas não se altera significativamente. A modificação deste diâmetro influenciar diretamente na relação de transmissão programada (número de

rotações do motor e o deslocamento linear). Em suma, uma possível alteração no diâmetro implicar em diferença entre as velocidades programadas e executadas.

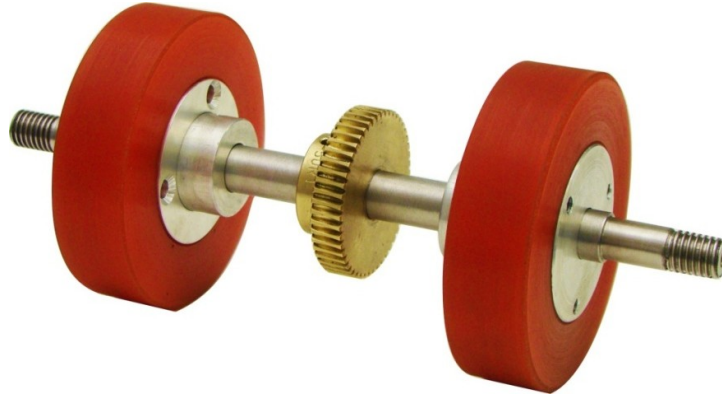


Figura 3-16 – Rodas de poliuretano

Quanto à junta prismática Y, em virtude da modificação de sua relação de transmissão, para uma rotação do pinhão passou-se a ter maior deslocamento linear, ocorreu um significativo aumento na frequência e amplitude máximas de tecimento, sendo que o valor de velocidade máxima ficou na ordem de 1400 mm/min. Entretanto, a alteração fundamental foi no posicionamento desta junta, uma vez que passou da parte frontal para o centro do manipulador, Figura 3-17. Esta modificação reduziu drasticamente a tendência de desalinhamento que o robô apresentava.

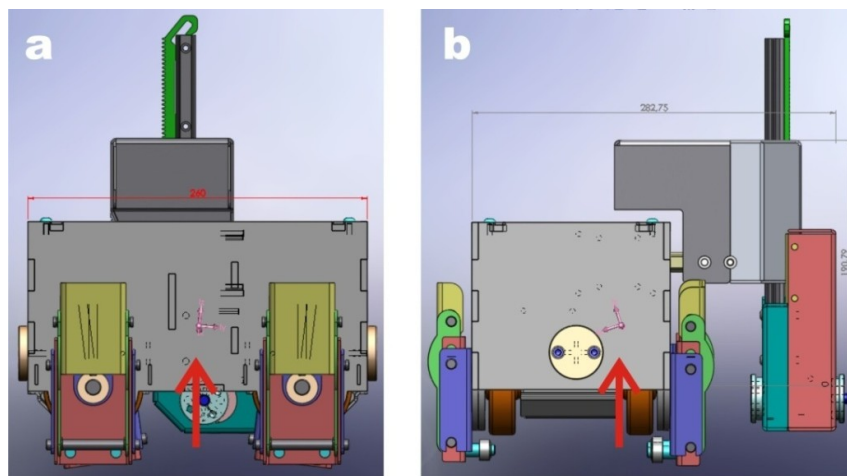


Figura 3-17 – Centro de massa da segunda versão do TARTÍLOPE V4. Em (a) vista lateral e em (b) vista frontal.

A terceira grande modificação no TARTÍLOPE V4 diz respeito ao mecanismo de travas de fixação na cinta orbital rígida ou no trilho flexível. Na versão anterior era necessário apertar oito parafusos todas as vezes que o equipamento fosse montado sobre o trilho. Na nova concepção, o operador tem apenas que abrir/fechar o mecanismo de fixação com um movimento único, sem a necessidade de chaves para montagem/desmontagem. A Figura 3-18 mostra o mecanismo de fixação na posição aberta e em seguida fechada.

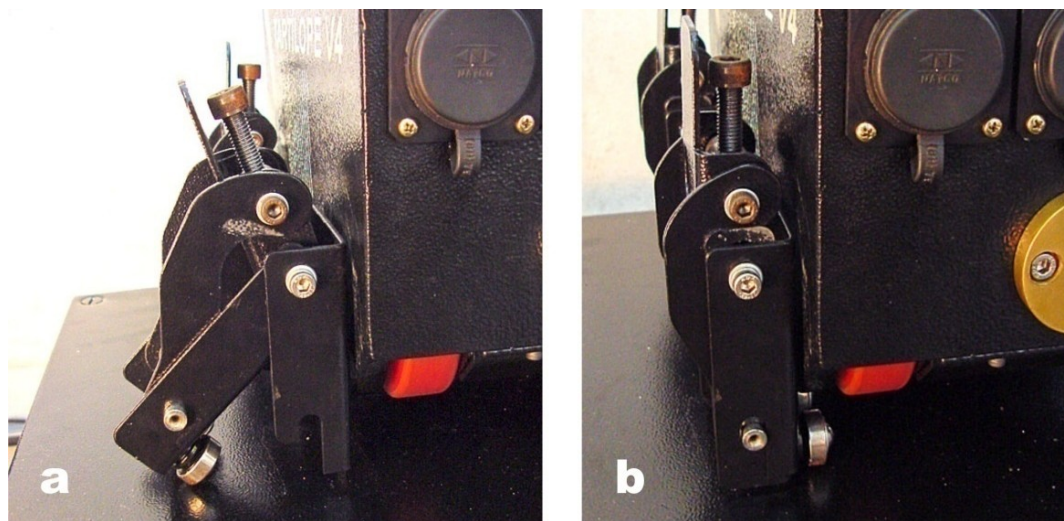


Figura 3-18 – Mecanismo de fixação. Em (a) aberto e em (b) fechado

Outra grande vantagem deste mecanismo é o fato de possuir uma liberdade de giro ao redor do eixo Y e dois rolamentos de guia em sua parte inferior. Deste modo, ele se acomoda independentemente da curvatura da superfície, garantindo a o deslocamento.

A fim de avaliar os erros de posicionamento nas juntas do TARTÍLOPE V4, foram realizados testes de deslocamento com medição por intermédio de um relógio comparador, Figura 3-19. Para a determinação dos referidos erros foi adotado a mesma metodologia nas quatro juntas que constituem o manipulador. Na referida metodologia, a junta em estudo era utilizada para deslocar o relógio comparador aproximadamente até a metade de seu curso. Em seguida, o controlador CNC do manipulador e o relógio comparador eram zerados. Posteriormente, era comandado um deslocamento de 30 mm com velocidade de 300 mm/s e retorno a posição original, ou seja, um deslocamento de -30 mm. Ao finalizar a trajetória era medido o

erro no relógio comparador. Os testes foram repetidos 50 vezes para cada junta, sendo que os valores dos erros médios de posicionamento são apresentados na Tabela 3.1.

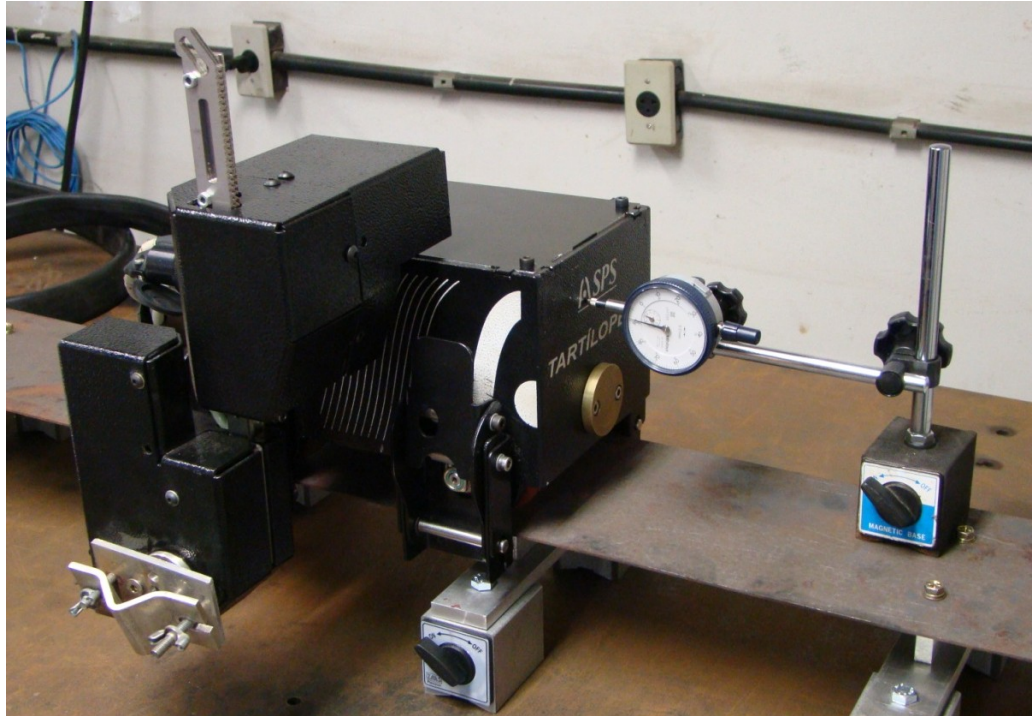


Figura 3-19 – Teste com relógio comparador para verificação de folgas no mecanismo

Tabela 3.1 – Erro médio de posicionamento das juntas do TARTÍLOPE V4

Junta	Erro médio
X	0,018 mm
Y	0,001 mm
Z	0,002 mm
A	0,02 °

A seguir é mostrada a nova versão do TARTÍLOPE V4 montado em uma cinta rígida para a soldagem orbital de dutos, Figura 3-20(a), e em um trilho flexível para a soldagem de superfícies livres.

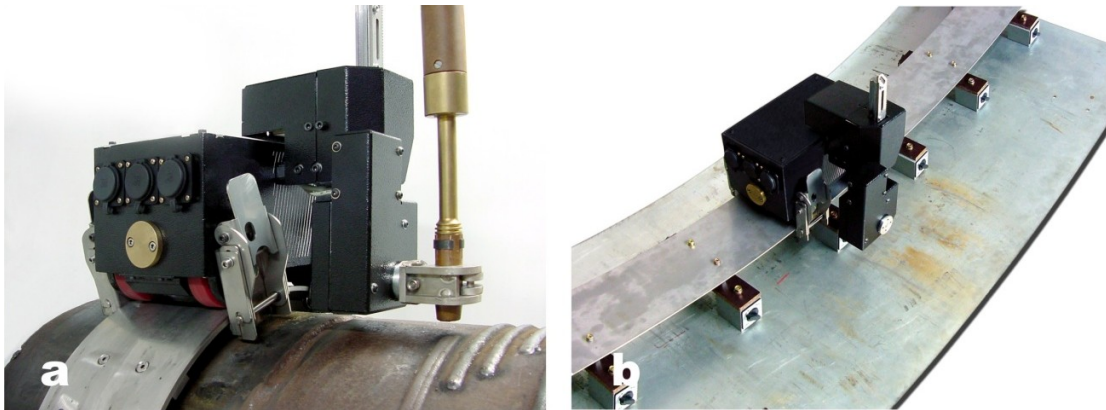


Figura 3-20 – Em (a) montagem para soldagem orbital e em (b) para a soldagem de superfícies curvas

3.3 Desenvolvimento eletro-eletrônico

O projeto dos circuitos eletro-eletrônicos levou em consideração os diferentes requisitos dos processos de soldagem, bem como visou proporcionar segurança a fim de evitar danos ou retrabalhos às peças que estão sendo soldadas.

Uma vez que o manipulador CNC em desenvolvimento visa a flexibilidade de operação com diferentes processos de soldagem, foi indispensável adequar o sistema eletro-eletrônico às situações mais críticas. Dentre estas situações, a principal é evidenciada na abertura do arco elétrico no processo TIG com alta frequência. Esta, por sua vez, consiste em uma seqüência de 4 ou 5 pulsos de alta tensão em um curto intervalo de tempo, com o objetivo de romper o dielétrico do gás para a abertura do arco elétrico. Tais pulsos podem danificar os circuitos eletro-eletrônicos.

As principais providências para solucionar o problema supracitado foram:

- Blindagem dos cabos: reduz os efeitos de campos elétricos sobre os sinais;
- Fiação com par trançado: atenua problemas com campos magnéticos principalmente em sinais diferenciais;
- Isolamento de sinais por intermédio de opto acopladores;
- Filtro de linha com o intuito de eliminar ruídos provenientes da rede elétrica.

3.3.1 Lógica de acionamento

O projeto da lógica de acionamento do TARTÍLOPE V4 baseou-se em um sistema CNC, posto que estes equipamentos seguem a mesma filosofia de intertravamento. No intertravamento são interligados todos os sensores de posicionamento e acionamento do manipulador, permitindo, caso haja algum problema em qualquer uma das partes, todo o sistema ser paralisado. Em virtude disto, a probabilidade de execução de trajetórias incorretas é menor.

Para nortear toda a construção da lógica de acionamento do primeiro protótipo, o sistema CNC pode ser subdividido, conforme mostra a Figura 3-21, em três grupos: painel elétrico de comando; manipulador; e periféricos.

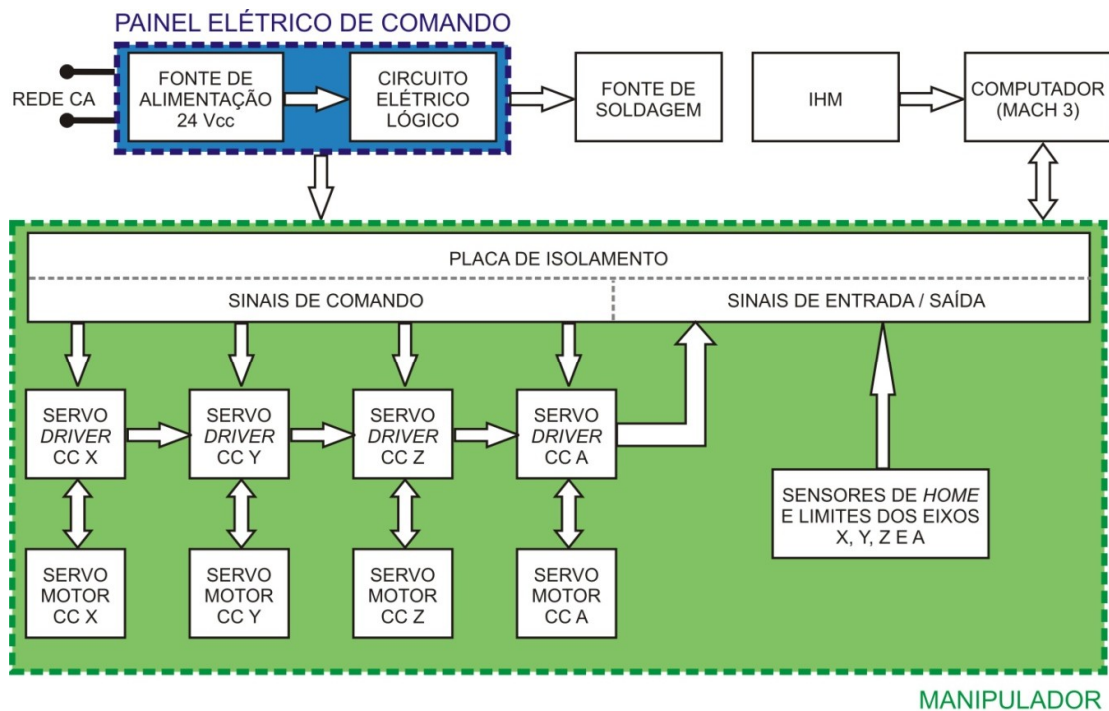


Figura 3-21 – Diagrama de blocos do primeiro protótipo

No transcorrer do projeto, devido à alteração da concepção mecânica do manipulador, as divisões da lógica de acionamento foram também alteradas. Entretanto, a sua forma de atuação permaneceu a mesma. No primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4 o diagrama de funcionamento é constituído por:

- Painel elétrico de comando: formado pela fonte de alimentação e o circuito lógico de intertravamento, o qual é responsável pela segurança e confiabilidade de funcionamento do robô CNC;
- Periféricos: componentes diretamente ligados ao controle do robô e à operação de soldagem, entre eles; microcomputador, IHM e a fonte de soldagem;
- Manipulador: formado pelas placas para o isolamento de sinais, servo *drivers*, servo motores e sensores das juntas.

No segundo protótipo do TARTÍLOPE V4, em consequência da alteração mecânica da junta prismática Y para a parte central do manipulador, passou a ser inviável a manutenção das placas eletrônicas e dos servo *drivers* no interior do robô. A permanência das referidas placas sobre o manipulador acarretaria em considerável aumento nas dimensões do equipamento. Deste modo, no novo projeto o diagrama de funcionamento, Figura 3-22, passou a ser formado por:

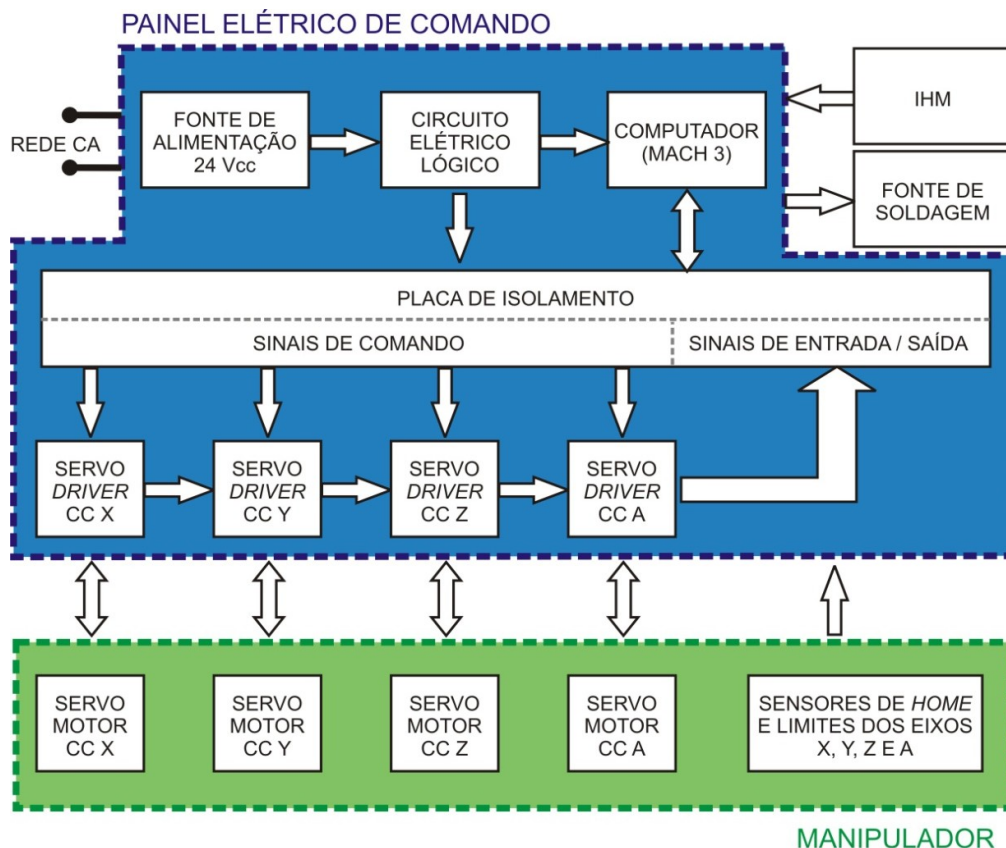


Figura 3-22 – Diagrama de blocos do segundo protótipo

- Painel elétrico de comando: constituído pela fonte de alimentação, o circuito lógico de intertravamento, microcomputador, placas de isolamento e servo *drivers*;
- Periféricos: IHM e a fonte de soldagem.
- Manipulador: estrutura mecânica do equipamento, servo motores e sensores das juntas.

Em ambos os diagramas funcionais, o circuito elétrico lógico habilita a alimentação para os servo *drivers*, sendo que estes possuem um sinal de ERRO ligado em série. Caso haja algum problema em um servo acionamento ou ativação de um dos sensores de limite de curso, o microcomputador é informado e interrompe a energia dos servo motores, o que pára imediatamente o deslocamento. Além disto, o microcomputador desabilita a fonte de soldagem e envia um sinal de parada de emergência para a IHM.

A Figura 3-23, apresenta todo o circuito esquemático de acionamento desenvolvido. Para o funcionamento do TARTÍLOPE V4, o operador inicialmente aciona a chave CG, que energiza apenas a fonte 24 Vcc. Em seguida, o botão LIGA tem que ser pressionado, a fim de habilitar o contactor responsável pela alimentação dos servo acionamentos. Se os botões SE e DESL não estão ativos e se não há problemas em algum dos servo acionamentos, a chave PRONTO é comutada indicando via sinalização “L” a continuidade de alimentação no sistema. Por fim, o operador solta a chave LIGA e o conjunto eletro-eletrônico permanecerá energizado.

Durante a execução de uma determinada tarefa de soldagem, o manipulador e a fonte de soldagem são desligados, caso o operador acione o botão PE ou DESL, ou, ainda, na ocorrência de alguma inconformidade em um dos servo acionamentos. Neste segundo caso, o contato PRONTO é aberto, o que paralisa o mecanismo.

Ainda na Figura 3-23, as chaves HX, HY, HZ e HA são utilizadas para o posicionamento do *home* das juntas do manipulador. Já as chaves SY0, SY1, SZ0, SZ1, SA0 e SA1 servem para a delimitação do espaço de trabalho do robô. As referidas chaves são acionadas nos fins de curso do equipamento, evitando colisões até com o próprio manipulador. Caso uma destas chaves seja acionada, é produzido um sinal de emergência e o robô é parado. Para solucionar o problema, o operador tem que pressionar o botão OR, o qual anula o efeito dos fins de curso, para liberar a emergência do equipamento e deslocar a referida junta até que o sensor seja desativado.

Por fim, tem-se o botão PAUSA, o qual paralisa o deslocamento sem desligar o robô, e o botão VT, o qual, quando acionado, inibe o disparo da fonte de soldagem por intermédio do TARTÍLOPE V4, mas executa o movimento normalmente, (o intuito é apenas verificar a trajetória programada).

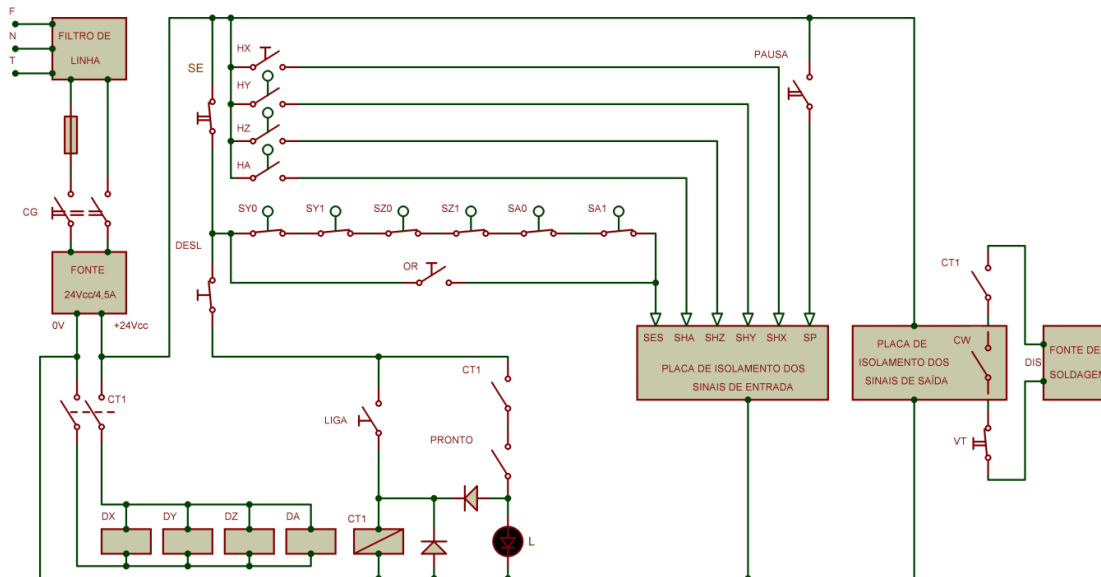


Figura 3-23 – Circuito elétrico lógico

3.3.2 Servo acionamento empregado

Atualmente, a maioria dos manipuladores de soldagem encontrados, tanto no exterior, quanto no LABSOLDA, são acionados por motores de passo ou motores de corrente contínua com escovas, sendo que em ambos os casos o controle é efetuado em malha aberta. Deste modo, havendo a solicitação de certo deslocamento a determinada velocidade, não se tem garantia que o comando será executado com sucesso. Além disto, motores de passo geram vibrações e grande quantidade de ruído, proveniente de suas características construtivas. Outro fator que dificulta a utilização dos motores de passo são as suas elevadas dimensões e massa, o que geraria um grande momento de inércia no braço do TARTÍLOPE V4.

Neste contexto, optou-se pelo emprego de servo motores de corrente contínua com escovas. Aplicando-se este sistema de acionamento, os problemas de vibrações e ruídos são diminuídos drasticamente e há um significativo aumento na velocidade de rotação do motor, quando comparado com a forma de acionamento

por intermédio de motores de passo. O referido fato torna factível a adição de uma redução na saída do motor. Com tal redução, a inércia refletida sobre o eixo do motor reduz na proporção de $1/r^2$, onde r é o valor total da redução. Com isto, é possível o deslocamento de elevadas cargas com a utilização de motores relativamente pequenos.

Por ser um sistema de acionamento que opera em malha fechada de controle de velocidade e posição, a eletrônica dosa a energia elétrica fornecida ao motor, a fim de executar trajetórias desejadas, mesmo que forças externas atuem no manipulador.

Em suma, a alteração do sistema de acionamento, de motores de passo para servo motores de corrente contínua com escovas, acarretou na diminuição do peso e ruídos no equipamento, aumento da velocidade de deslocamento, melhoria da repetitividade e das rampas de aceleração e de desaceleração. Desta maneira, insucessos nos deslocamentos são menos prováveis, quando comparados com acionamentos por motores de passo ou motores de corrente contínua com escovas.

É evidente que o emprego de servo motores de corrente contínua sem escovas ou servo motores de corrente alternada, trariam ainda mais vantagens para o acionamento do robô. Contudo, tais opções foram desconsideradas, sobretudo, porque acarretariam em elevação no custo final do manipulador.

Com o estudo de diversas opções de fabricantes de servo motores, selecionaram-se os produzidos pela empresa PITTMAN, sendo que todos apresentam alimentação de 24 Vcc. Isto é vantajoso, pois com a padronização das tensões, a complexidade da parte envolvida com o desenvolvimento das fontes de potência é reduzida.

Um dos aspectos vantajosos dos servo motores da PITTMAN é que já possuem um *encoder* de três canais não diferenciais com resolução de 500 linhas por revolução. No quesito imunidade, destaca-se o fato do *encoder* apresentar uma blindagem metálica. Esta é de extrema importância para a soldagem, uma vez que a alta frequência utilizada na abertura do arco elétrico no processo TIG pode danificar o *encoder* ou gerar sinais que causam erro de leitura pelo servo *driver*.

A Figura 3-24 apresenta os servo motores de corrente contínua com escovas selecionados para o acionamento, onde em (a) tem-se o servo motor da junta prismática X e em (b) das demais juntas. Observando a mesma figura, o número 1 indica o *encoder* responsável pela leitura de posição e velocidade. O item 2 mostra o

motor propriamente dito, enquanto que o item 3 é constituído pelo sistema de redução.

Quanto às características de cada um destes servo motores, o da junta prismática X pesa 645 g, apresenta uma caixa de redução com engrenagens de dentes retos e relação de 5,9:1, velocidade máxima a vazio de 790 rpm e torque contínuo máximo suportado de 0,34 Nm. Já o servo motor das demais juntas pesa 330 g, tem uma redução, também com engrenagens de dentes retos, com relação de 187,7:1, velocidade máxima de 24 rpm e torque contínuo máximo de 1,24 Nm. A grande diferença entre as reduções dos servo motores ocorre em virtude de que no caso da junta prismática X há mais uma etapa de redução. Assim, é fundamental que a velocidade de saída do redutor seja elevada.

O fabricante PITTMAN aconselha que seus servo motores operem em um torque máximo suportado. Desta forma, com a análise das curvas características de cada servo motor, Figura 3-25, conclui-se que o servo motor de acionamento da junta prismática X deve ter como patamares máximos aproximadamente uma corrente de 2 A e rotação de saída do redutor de 650 rpm. Enquanto isto, o servo motor das demais juntas apresenta valores limites de aproximadamente 400 mA e 19 rpm.

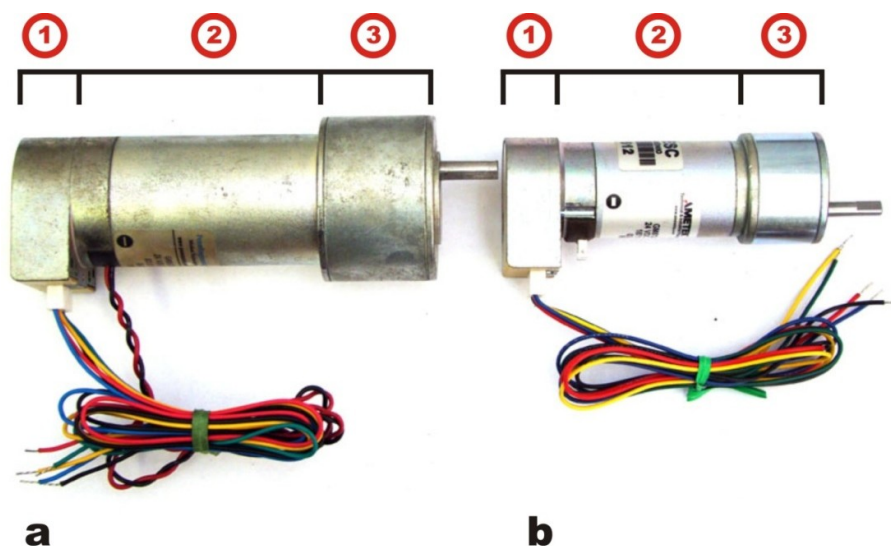


Figura 3-24 – Servo motores empregados. Em (a) da junta prismática X e em (b) das demais juntas

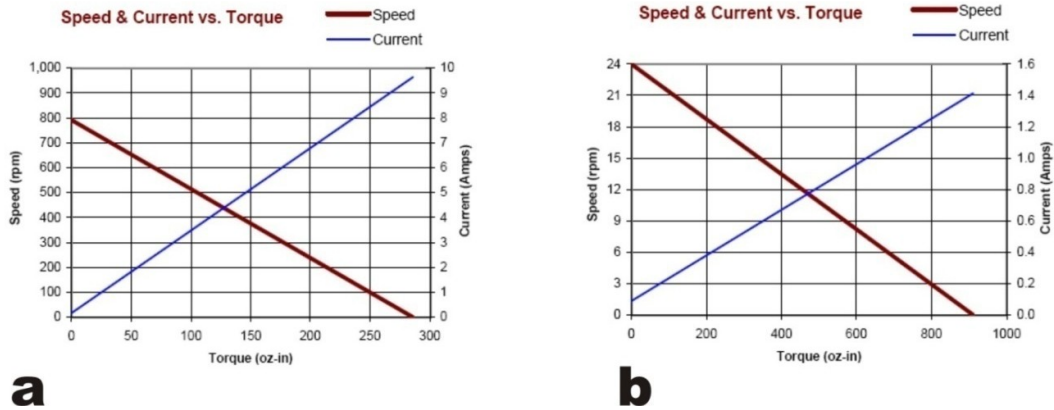


Figura 3-25 – Curvas características ilustrativas. Em (a) do servo motor da junta prismática X e em (b) dos servo motores das demais juntas

Com a escolha dos servo motores, partiu-se para a definição de um servo *driver* de acionamento. Do mesmo modo que toda a filosofia empregada no desenvolvimento do projeto, a seleção do servo *driver* visou conciliar qualidade, simplicidade de comando e baixo custo. Neste contexto, selecionou-se um servo *driver* fabricado pela empresa norte-americana RUTEX, denominado de R2010, Figura 3-26(a). No diagrama básico deste *driver*, Figura 3-26(b), os blocos “CONTROLADOR” e “FONTE 24 Vdc” dizem respeito aos sinais de controle e alimentação para a lógica de acionamento. Já os blocos “FONTE Tensão Motor” e “SERVO MOTOR DC” correspondem à parte de potência do sistema, desde a tensão de alimentação até o servo motor. Por fim, o bloco “ENCODER” é o responsável pelo fechamento da malha de controle, por intermédio da comparação dos sinais comandados pelo controlador e os obtidos pelo giro do servo motor.

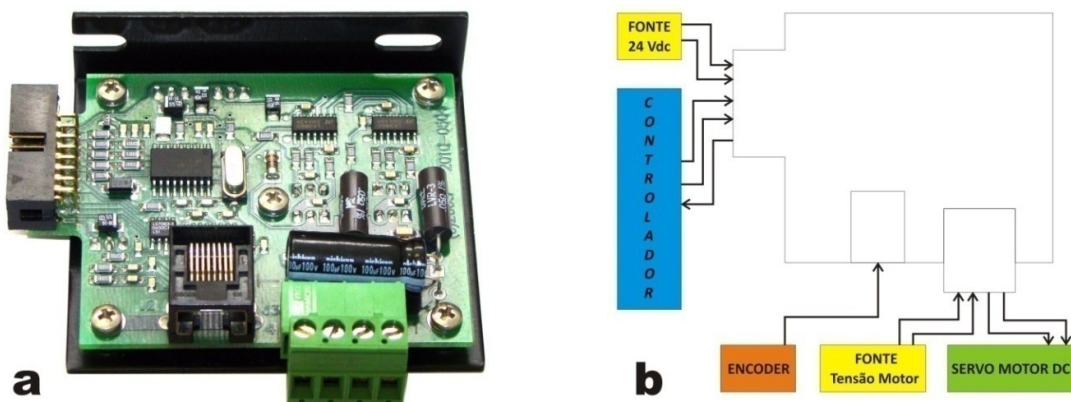


Figura 3-26 – Em (a) servo *driver* RUTEX R2010 e em (b) diagrama das ligações

O referido servo *driver*, o qual já realiza o fechamento da malha de controle, apresenta diversas características relevantes quando comparado a outros sistemas de acionamento disponíveis no mercado, dentre as quais se destacam:

- Energização de servo motores de corrente contínua com escovas até 100 V / 20 A, por intermédio de sinal PWM: a ampla faixa de operação proporciona flexibilidade para testes com outros motores. Assim, no decorrer do projeto ou para o desenvolvimento de novos equipamentos, é factível a utilização da mesma eletrônica. Isto reduz os gastos de aquisição de componentes e dá maior agilidade ao desenvolvimento;

- Controle de movimento por intermédio de sinais digitais STEP e DIR: esta forma de comando de deslocamento é similar ao método amplamente utilizado para o controle de motores de passo. Neste procedimento, a unidade de controle comanda dois sinais digitais de deslocamento, um para a direção e outro para a velocidade e percurso. O comando da velocidade do deslocamento é efetuado pela frequência de pulsos do sinal de STEP. Desta forma, para elevadas velocidades tem-se as maiores frequências do sinal. Esta funcionalidade para o comando do servo *driver* acarreta em um sistema de comando mais simples e imune a ruídos elétricos, posto que na forma tradicional de comando para *drivers* de motores de corrente contínua com escovas seria necessário um sinal analógico como referência de velocidade;

- Programação de proteções contra sobre e sub tensão, corrente de pico, erro de seguimento: com a configuração das referidas proteções, é possível elevar a confiabilidade na execução da trajetória, bem como proporcionar aumento na vida útil dos motores. Este último aspecto decorre do fato que com as proteções, é viável a programação da faixa de corrente de operação para os motores. Assim, não há riscos de execução de tarefas em regiões de sobre corrente;

- Comunicação com *encoder* diferencial de três canais: a operação com *encoder* diferencial oferece maior confiabilidade para os deslocamentos, principalmente quando relacionadas com a soldagem. A decorrência disto, é devido que ao trabalhar em modo diferencial os sinais do *encoder* são menos susceptíveis a ruídos elétricos provenientes de interferências externas, as quais são muito presente no ambiente de soldagem;

- Compensador PID e variáveis ajustáveis via *software*: toda programação do servo *driver* é realizada com o auxílio de um *software* denominado R2xTune, o qual opera em plataforma *Windows XP* e comunica-se com o *driver* por intermédio da porta paralela do microcomputador. Desta maneira, o programador configura tanto o controlador PID, como uma ampla quantidade de variáveis, dentre as quais se destacam: configuração da polaridade do motor e do *encoder*, modo de operação do *encoder*, valores limites de corrente fornecida e valor máximo admissível de erro de seguimento;
- Baixo custo: o valor total do servo *driver* é de US\$ 148.00, o que o torna bem acessível.

De forma básica, a configuração do servo *driver* pode ser dividida nas duas etapas mostradas a seguir. A metodologia de programação de todas as variáveis é apresentada em detalhes no Anexo A.

- Etapa 1 – Configuração das variáveis: configuram-se as variáveis elétricas do servo motor, do *encoder* e de proteções. Dentre os ajustes do servo motor tem-se: polaridade e corrente eficaz. O *encoder* é configurado para operar ou não em modo de quadratura, a fim de proporcionar maior ou menor resolução de posicionamento. Já nas opções de proteção, define-se o valor da corrente de pico, bem como o nível aceitável de erro de seguimento;
- Etapa 2 – Ajuste da dinâmica do sistema: aqui todo o conjunto é montado (servo *driver*, motor, carga) para que se possa configurar o sistema em modo de trabalho. Primeiramente eleva-se o ganho proporcional (K_p), observando a resposta ao degrau, até que o sistema comece a entrar em oscilação. Depois se aumenta o ganho derivativo (K_d), com o intuito de diminuir a oscilação do sistema. Por fim, ajusta-se o ganho integral (K_i), visando eliminar o erro de regime permanente.

Concluídas estas duas etapas, o servo *driver* está pronto para a utilização e pode ser desconectado do microcomputador e passar a receber os pulsos de acionamento de uma placa controladora externa.

3.3.3 Placas eletrônicas auxiliares

Já foi abordado o fato que o ambiente de soldagem apresenta elevada quantidade de interferências. Adicionalmente a estes problemas, que de forma geral são ocasionados pelo processo de soldagem em si, existem ainda as dificuldades encontradas para a execução de tarefas em campo. Geralmente os níveis das tensões da rede elétrica apresentam grande oscilação e vários equipamentos encontram-se ligados a um mesmo ponto da rede. A soma destes fatores com os ruídos do arco elétrico formam uma situação nociva para circuitos eletrônicos.

Com o intuito de solucionar os problemas causados pelos itens supracitados, bem como proteger as placas de controle de movimento, foram elaboradas placas eletrônicas auxiliares para o isolamento e a adequação de sinais. O desenvolvimento destas placas foi específico para o TARTÍLOPE V4, posto que as mesmas deveriam ser instalados sobre o manipulador. Em consequência, o projeto eletrônico caminhou paralelamente ao projeto mecânico, a fim de conciliar a segurança do acionamento com o quesito dimensional do robô.

A primeira das placas é constituída por uma fonte alimentação de 9 Vcc, além de circuitos de isolamento e adequação dos sinais de entrada e de saída. Os sinais de entrada estão relacionados com os sensores de posição inicial de cada junta, com os limites, máximo e mínimo, de deslocamento e com o botão de parada de emergência. Já os sinais de saída, chamados de CW, FLOOD e MIST, podem ser utilizados, por exemplo, para efetuar o disparo da fonte de soldagem ou comandar algum outro sistema auxiliar.

Apesar dos sinais de entrada e de saída possuírem baixa frequência, mesmo assim foram projetados circuitos de isolamento com o CI 4N25, o qual é um opto acoplador. Para os sinais de saída, adicionaram-se relés para o isolamento. Desta maneira, é possível comandar circuitos com tensões diferentes da existente na placa de isolamento.

A Figura 3-27(a) apresenta o diagrama de blocos da placa de isolamento de sinais de entrada e de saída. No referido diagrama é apresentado o fluxo dos sinais no interior da placa, bem como com os outros componentes do sistema. O resultado final com a placa de isolamento construída é mostrado na Figura 3-27(b).

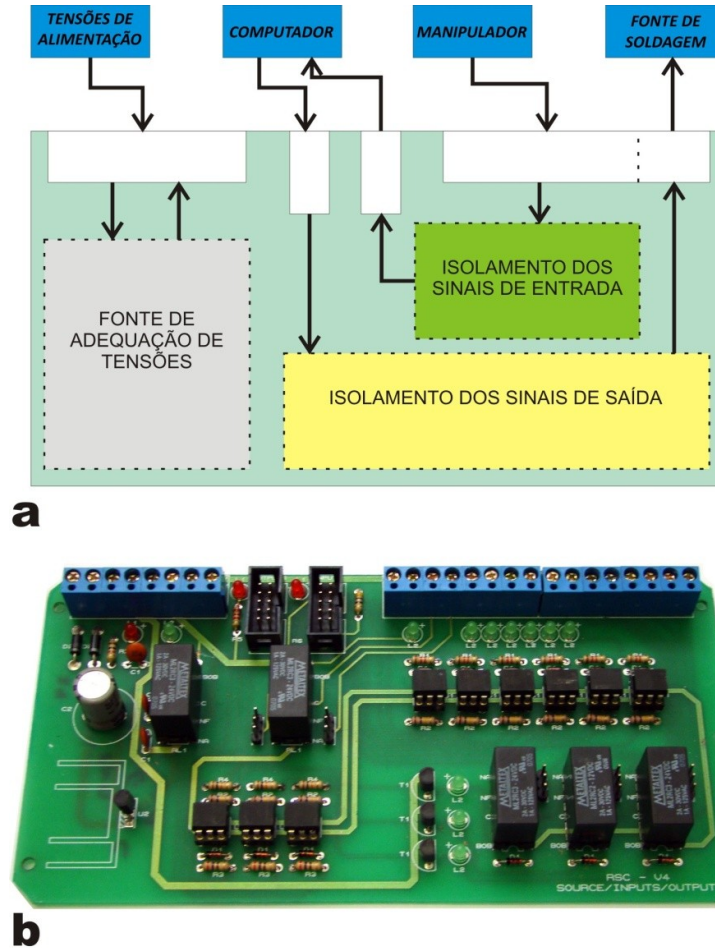


Figura 3-27 – Em (a) diagrama de blocos da placa de isolamento de sinais e em (b) o resultado final da placa

A segunda placa é voltada para o isolamento dos sinais de STEP e DIR enviados da unidade de controle para os servo *drivers*. Como circuito adicional, esta placa possui uma lógica que informa o sistema de controle caso haja alguma inconformidade, seja de sobre corrente ou erro de seguimento, em um dos servo *drivers*.

A concepção da forma de isolamento é a mesma da primeira placa, ou seja, são empregados opto acopladores. Contudo, as freqüências dos sinais são elevadas e chegam à faixa de 100 kHz. Portanto, o uso do CI 4N25 não foi possível, uma vez que este CI é limitado a freqüências de aproximadamente 80 kHz. Dado o referido problema, optou-se em utilizar o CI 6N137, o qual suporta freqüência de chaveamento de até 10 MHz. A **Erro! Fonte de referência não encontrada.** apresenta o circuito elétrico projetado para o isolamento.

Outra função da referida placa é diminuir a quantidade de cabos necessários para ligar os servo *drivers*. Com isto, ela atua como uma espécie de placa mãe onde são encaixados todos os servo *drivers*, além destes conecta-se também os cabos com os sinais de comando e de potência para o acionamento. Em virtude desta forma de construção, passou a ser factível a acomodação de todos os servo *drivers* no interior do manipulador. A Figura 3-28(a) traz o diagrama de blocos com os principais sinais envolvidos no comando do deslocamento das juntas do manipulador. Na Figura 3-28(b) é ilustrado o resultado final da placa de isolamento, enquanto que a Figura 3-28(c) mostra os servo *drivers* conectados à placa projetada.

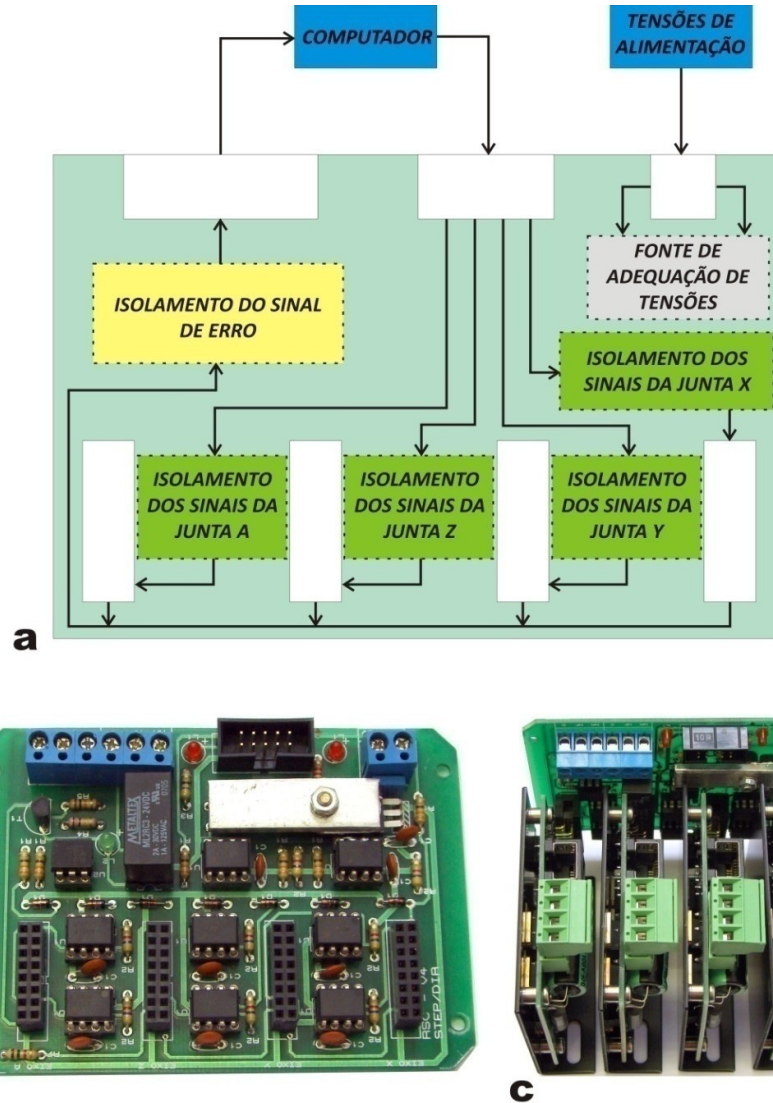


Figura 3-28 – Em (a) diagrama de blocos da placa de isolamento de STEP e DIR, em (b) placa de isolamento e em (c) conjunto da placa e os servo *drivers*

Por fim, a Figura 3-29 apresenta o resultado final com as placas eletrônicas instaladas no interior da primeira versão do TARTÍLOPE V4. Evidentemente com a alteração do projeto mecânico do manipulador as placas de isolamento e os servo *driver* deixaram de ser instalados em seu interior e migraram para um gabinete externo.

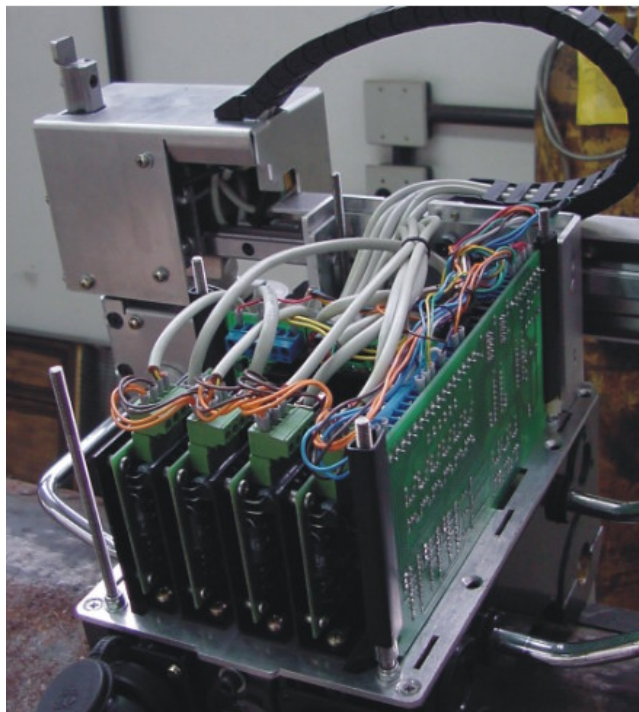


Figura 3-29 – TARTÍLOPE V4 com eletrônica no manipulador

Adicionalmente, foi projetada uma placa eletrônica para ser instalada no *encoder* dos servo motores com o objetivo de adequar os sinais, Figura 3-30. Esta altera os sinais originais do *encoder*, não diferenciais, para sinais diferenciais. Deste modo, a transmissão de informações passa a ser mais segura.

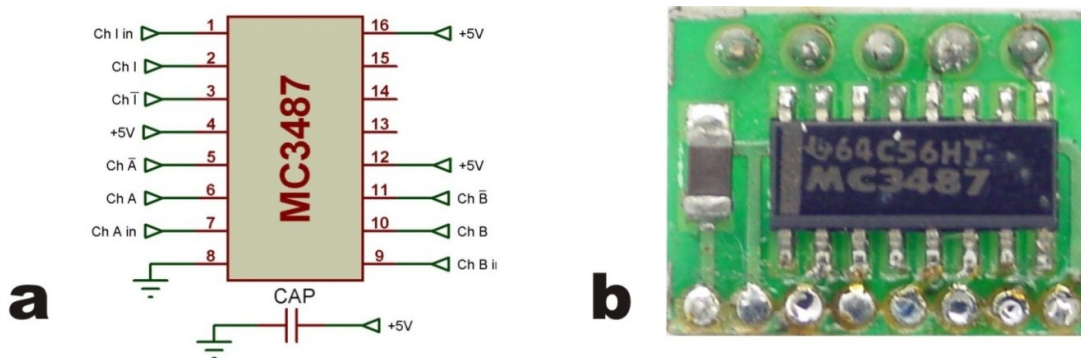


Figura 3-30 – Placa de adequação dos sinais do *encoder*. Em (a) circuito elétrico e em (b) placa eletrônica com dimensões de 15 mm x 11 mm

3.4 Controladores e programação

Como já mencionado, a análise da estrutura e dos movimentos realizados pelo TARTÍLOPE V4 gerou a idéia de controlá-lo da mesma forma que equipamentos CNC, baseados em microcomputador. Isto se deve ao fato de que os movimentos são similares aos de uma fresadora, posto que sua concepção apresenta três juntas prismáticas e uma rotacional. O objetivo é elaborar IHM's mais intuitivas e facilitar a interação com *softwares* de CAD, possibilitando assim o planejamento de trajetórias complexas sem que haja dificuldade de programação.

Neste contexto, foram estudadas duas formas para a execução do controle de movimento, sendo a primeira o pacote DeskCNC e posteriormente o *software* Mach3.

3.4.1 Controlador DeskCNC

Como já citado no presente trabalho, o DeskCNC era utilizado inicialmente por pessoas que fabricavam máquinas CNC apenas por *hobby*. Entretanto, com o tempo o referido sistema de controle de movimento sofreu grande evolução e passou a ser empregado em tarefas industriais. Para o uso no TARTÍLOPE V4 foi utilizada a segunda geração do controlador DeskCNC, a qual apresenta como principais características:

- Compatibilidade com diversas versões do sistema operacional Windows (95, 98, Me, XP, NT e 2000);
- Programação da rampa de aceleração dos motores;
- Interpolação de movimento em até 4 eixos;
- Comunicação por intermédio da porta serial do microcomputador;
- Sete saídas digitais;
- Oito entradas digitais;
- Uma saída PWM.

Em conseqüência de ser um *software* destinado a operar fresadoras CNC em processos de usinagem e mesas de corte, o DeskCNC disponibiliza diversas

funcionalidades dispensáveis para a soldagem. Portanto, as configurações para a programação foram efetuadas, sobretudo, nas partes destinadas especificamente ao controle de trajetórias.

O primeiro passo no ajuste do controlador foi a programação das velocidades da máquina, Figura 3-31(a). Tal programação é realizada com o preenchimento dos itens: *acceleration*, *acceleration scale*, *max velocity* e *start velocity*. A determinação destes dados gera um gráfico Velocidade x Tempo para ilustrar a curva de aceleração do manipulador. Para a automação da soldagem, o tempo entre o manipulador sair do repouso e alcançar a velocidade de regime deve ser o menor possível, algo em torno de 0,1 s. Este fato é decorrente das frequências exigidas no movimento de tecimento. Em virtude disto, tem-se uma rampa de aceleração bem inclinada.

Na tela de programação específica para cada junta, Figura 3-31(b), o usuário determina a posição de *home* do equipamento, que é fundamental para se referenciar a máquina. Em seguida programa-se a relação entre os pulsos gerados pelo controlador e o deslocamento linear da junta. Este valor é resultante dos cálculos existentes em todas as relações de transmissão da cadeia cinemática. Certamente é o dado que requer maior atenção para a programação, posto que é a partir dele que o sistema de controle determina todas as trajetórias de deslocamento. O operador ajusta também a velocidade máxima de cada junta, embasado nas informações obtidas com a análise das características de cada servo motor empregado no acionamento.

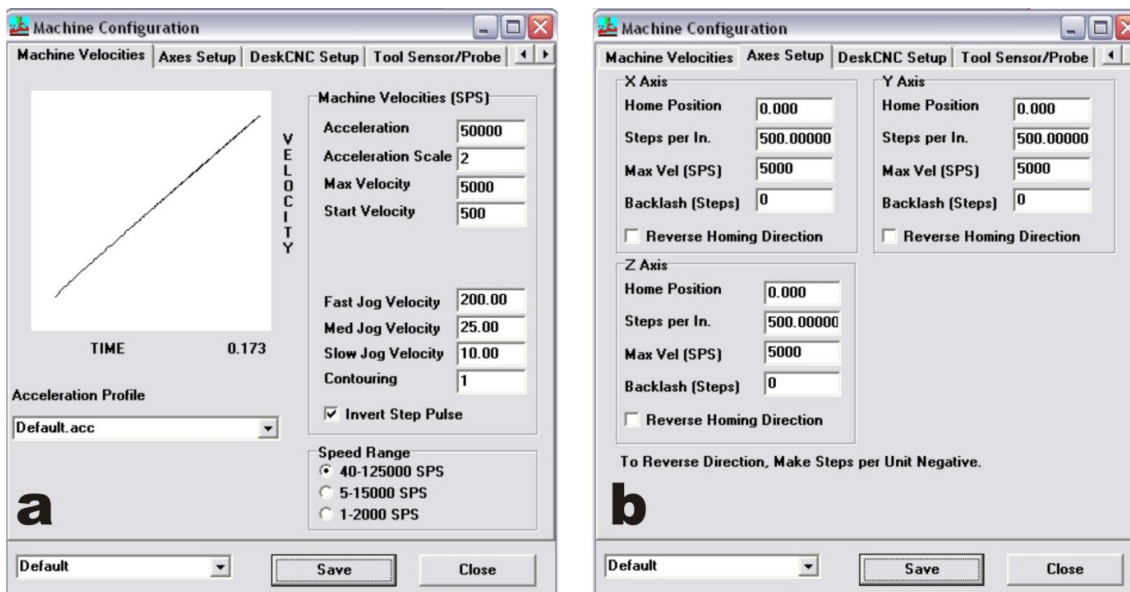


Figura 3-31 – Em (a) tela de programação das velocidades do equipamento e em (b) parametrização dos eixos de deslocamento

Ao término da programação de cada junta, passa-se para a determinação das variáveis pertinentes às características gerais do equipamento e do sistema de controle. Desta forma, a Figura 3-32(a) expõe as configurações genéricas do equipamento, sendo que o item mais relevante é o *Machine Size*, posto que delimita o espaço de trabalho do manipulador. Portanto, é factível o uso de limites de deslocamento por intermédio do próprio *software* de controle, o chamado *softlimit*. Este sistema auxilia na proteção contra colisões internas, uma vez que não há dependência apenas de chaves de fim de curso mecânicas, que eventualmente danificam-se. Ainda como funções primordiais a serem ajustadas, tem-se a unidade de operação e a porta serial que o microcomputador empregará na comunicação com a placa DeskCNC. Adicionalmente, como funções secundárias, aparecem as configurações de display.

Na Figura 3-32(b) são apresentadas as configurações da máquina relacionadas ao número de juntas, forma de execução da operação de posicionamento inicial, determinação de eixos escravos e funções diversas a respeito de configuração do DeskCNC.

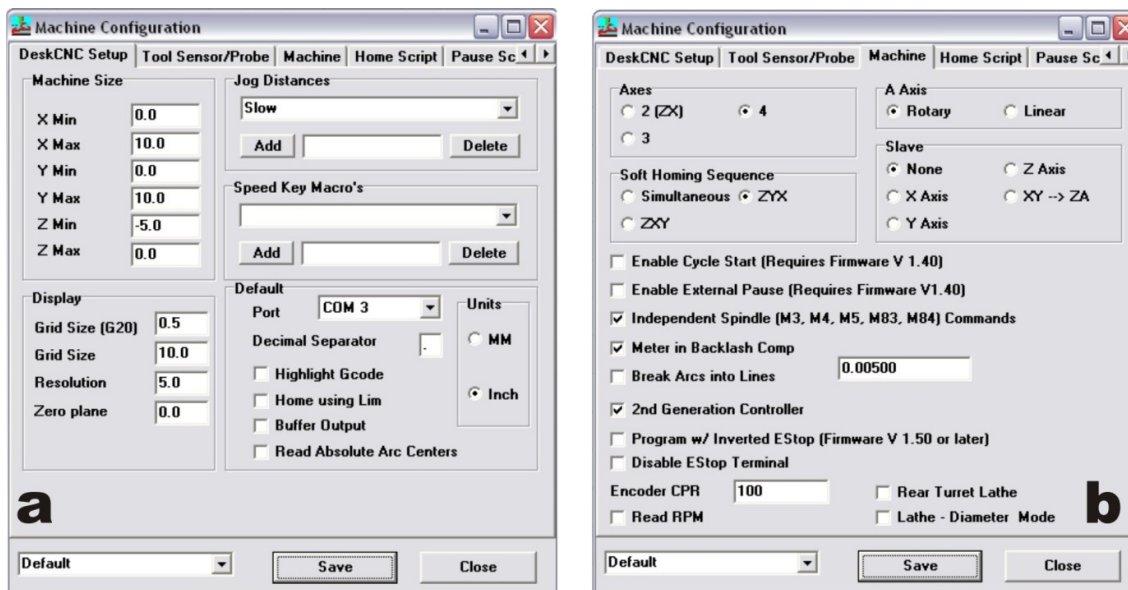


Figura 3-32 – Em (a) tela de configuração do espaço de trabalho e em (b) configuração das juntas

Todo o desenvolvimento realizado em torno do DeskCNC apresentou resultados satisfatórios quanto à confiabilidade da execução de trajetórias de soldagem, mesmo em situações de trabalho com elevada quantidade de ruídos. Todavia, o *software* de controle não possibilita a criação de uma interface para operação simples e dedicada à soldagem. Isto implica que o tempo de ajuste do manipulador seria demasiadamente elevado e complicado, fato que não é interessante para a automação da soldagem, principalmente em um equipamento voltado à operação em campo. Nestas operações são raras as repetições de trajetórias, fato que contribuiria para a diluição do tempo de ajuste do equipamento. Embora, todas as suas funcionalidades e bons resultados nos testes, o DeskCNC foi considerado inadequado para o controle de movimento de um robô para soldagem, em virtude de não viabilizar o desenvolvimento de uma IHM intuitiva para a diminuição do tempo de programação do manipulador.

3.4.2 Controlador CNC Mach3

Com as dificuldades encontradas na utilização do DeskCNC, optou-se por substituir o controlador de movimento. Entretanto, a filosofia de controlar o robô por intermédio de um sistema comercial com tecnologia CNC e de baixo custo foi mantida.

Neste âmbito, a opção selecionada foi o controlador CNC Mach3. As grandes vantagens deste sistema são os fatos de não possuir um *hardware* adicional para o controle, posto que utiliza a porta paralela do microcomputador, adicionalmente a ampla flexibilidade para a elaboração de interfaces gráficas e programação de rotinas específicas para cada tarefa. Desta forma, foi utilizada apenas a plataforma básica do Mach3, para a programação das rampas de acelerações de cada junta, bem como as características gerais do manipulador.

A primeira configuração do controlador CNC Mach3 refere-se à porta de comunicação e a velocidade de transmissão de dados que o *software* utilizará com os servo *drivers* e os sinais de entrada e de saída. Nesta configuração, Figura 3-33, foi determinada a utilização da porta paralela número 1 e uma velocidade de comunicação de 100 kHz.

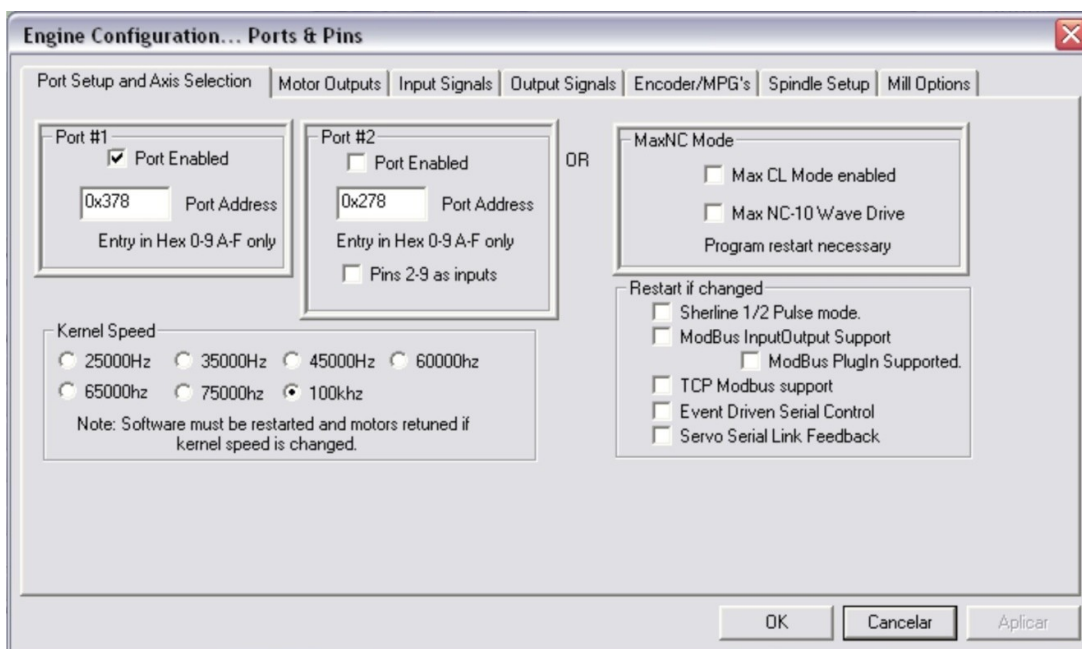


Figura 3-33 – Configuração de comunicação do Mach3

A partir da definição dos parâmetros referentes a porta de comunicação, em seguida são programados os pinos da porta paralela. O Mach3 proporciona a programação de 5 sinais de entrada e 12 sinais de saída, tomando como base apenas 1 porta paralela. Tais sinais digitais seguem padrão TTL e podem ser

utilizados, tanto para a lógica de acionamento, como para o controle de direção, velocidade e posição dos servo motores.

A função destinada a cada pino é facilmente definida por meio de uma interface simples e intuitiva. O ponto de partida para a programação é habilitar o sinal desejado. A seguir determina-se qual porta será usada. Posteriormente seleciona-se o pino referente ao sinal e se o mesmo deve ser ativo em nível alto ou baixo.

A seguir é apresentada a configuração dos sinais de comando dos servo *drivers*, Figura 3-34. Nesta programação determinou-se, por exemplo, que o servo *driver* do servo motor da junta X recebe sinais do pino 1 e pino 2 da porta paralela 1, sendo que significam respectivamente o sinal de direção (DIR) e de passos (STEP) para a velocidade de deslocamento. Ambos os sinais são ativos em nível alto.

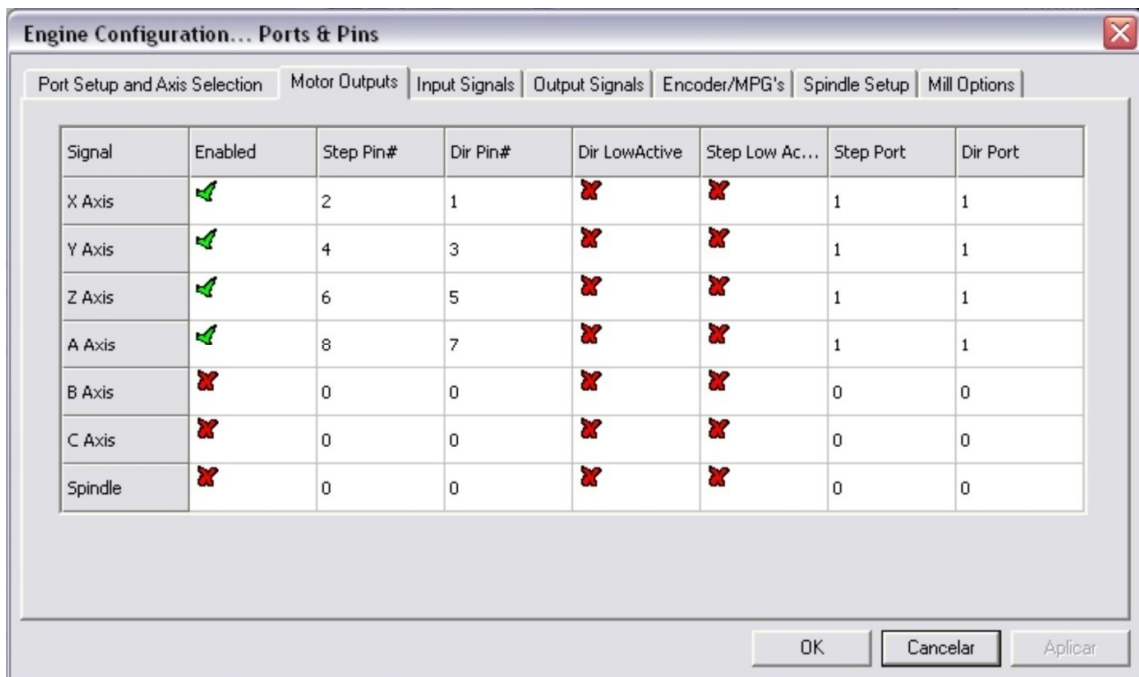


Figura 3-34 – Configuração dos sinais de comando dos servo *drivers*

O Mach3 possibilita a programação de uma série de sinais de entrada, os quais estão relacionados principalmente com a ocorrência de erro de posicionamento. Dentre estes sinais de erro, os principais são os de fins de curso. Todavia, pelo modo adotado na lógica de acionamento do TARTÍLOPE V4 todos os sinais de erro, seja de limite de deslocamento, dos servo *drivers* ou determinado pelo usuário, foram interpretados como um sinal de parada de emergência. Em conseqüência,

todos estes sinais foram ligados em série e chamados de Estop. A Figura 3-35 ilustra que o referido sinal foi programado para ser acionado em nível alto por intermédio do pino 15 de entrada da porta paralela 1.

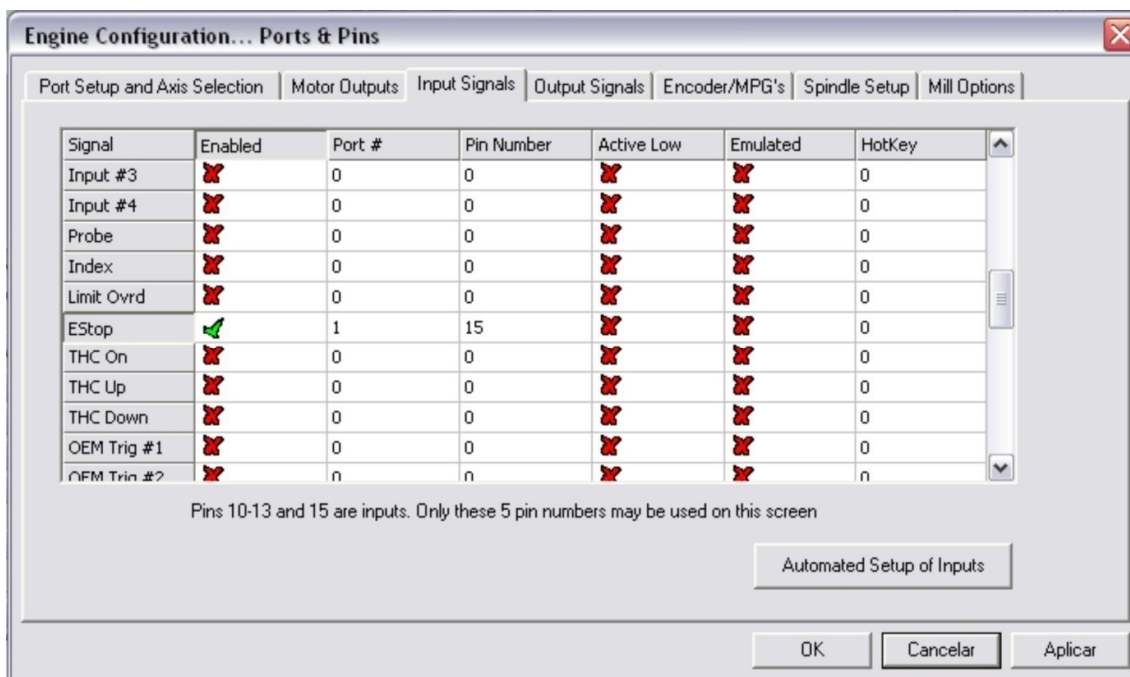


Figura 3-35 – Configuração dos sinais de entrada

Posteriormente, foram configurados os sinais de saída do sistema de controle, que são utilizados para o acionamento de periféricos, tendo a fonte de soldagem como o principal deles. Desta forma, o disparo da fonte de soldagem pode ocorrer de forma automática, provendo maior confiabilidade à soldagem. Na Figura 3-36, é apresentada a programação dos sinais de saída *Output #1*, *Output #2* e *Output #3*, os quais referem-se, respectivamente, aos pinos de saída 9, 14 e 16 da porta paralela 1.

No projeto do TARTÍLOPE V4 foi considerada a utilização de apenas uma porta paralela. Entretanto, existe a opção de serem adicionadas mais portas. Tal característica, associada com a possibilidade de desenvolvimento de programação específica, faz com que o Mach3 possa ser utilizado também como um CLP, o qual pode ser empregado, por exemplo, para a implementação de lógicas que interajam com a fonte de soldagem, a fim de modificar os parâmetros de soldagem no transcórre de um determinado deslocamento. Em suma, com o sistema de controle

baseado em microcomputador tem-se um controlador CNC flexível e de baixo custo, além de um CLP.

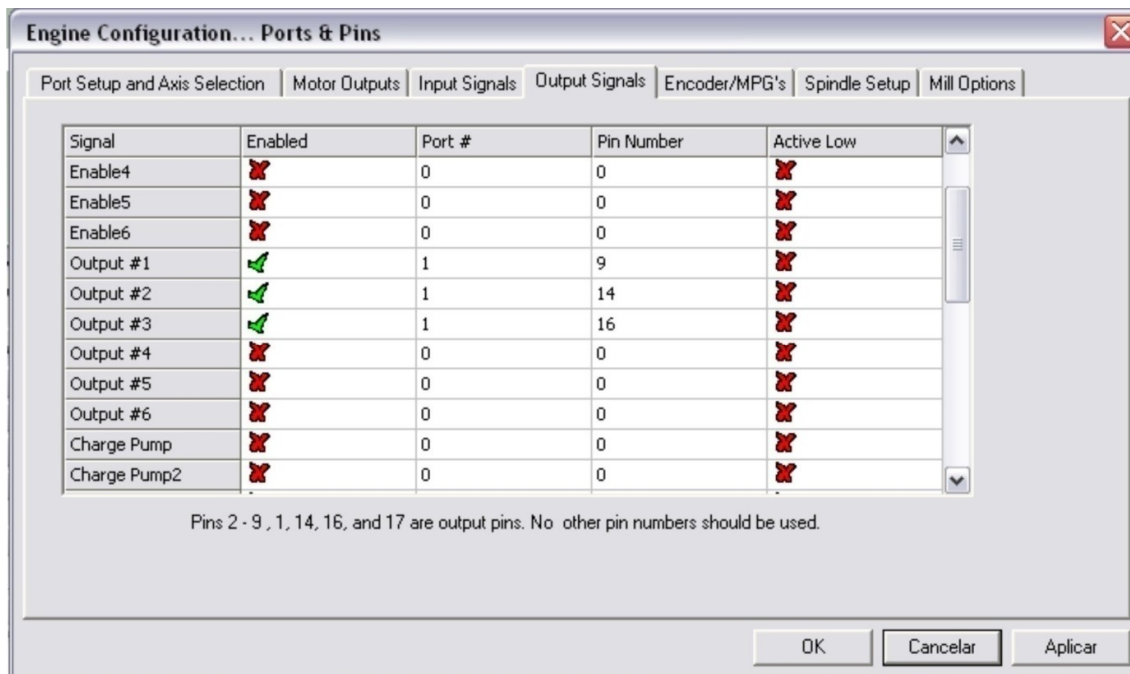


Figura 3-36 – Configuração dos sinais de saída

O *software* Mach3 proporciona também a determinação da rampa de aceleração dos motores, Figura 3-37, o que torna factível o melhor aproveitamento do desempenho dos motores. Em tal programação é ajustada a relação de transmissão com a quantidade de passos necessários para um deslocamento linear de 1 mm, considerando-se todas as transmissões e a resolução do *encoder*.

Também é determinada a velocidade máxima do servo motor e sua aceleração, fatores estes obtidos a partir da análise da folha de dados do servo motor.

A principal vantagem nesta programação das características dos sinais destinados ao servo motor está no fato de ser factível a alteração da largura do pulso de comando. Isto é fundamental, uma vez que o tempo necessário para entendimento de um sinal muda de acordo com cada servo *driver*.

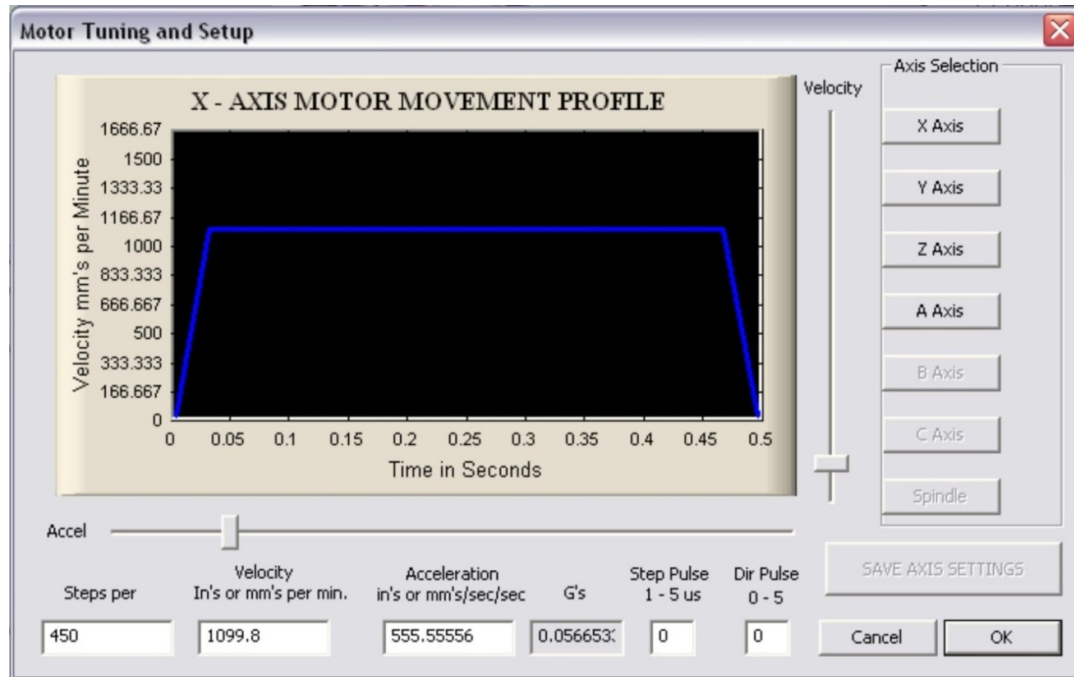


Figura 3-37 – Programação da rampa de aceleração

Adicionalmente às facilidades para a programação dos sinais envolvidos no controle do robô e na configuração das rampas de aceleração, o Mach3 disponibiliza ainda ferramentas auxiliares com distintos fins. Uma delas é um aplicativo denominado KeyGrabber, o qual possibilita a configuração de controles USB genéricos, amplamente encontrados no mercado. Com o emprego dos referidos controles é factível efetuar o deslocamento do manipulador de forma simples e rápida. A Figura 3-38 apresenta o controle USB utilizado e a tela de programação do software.

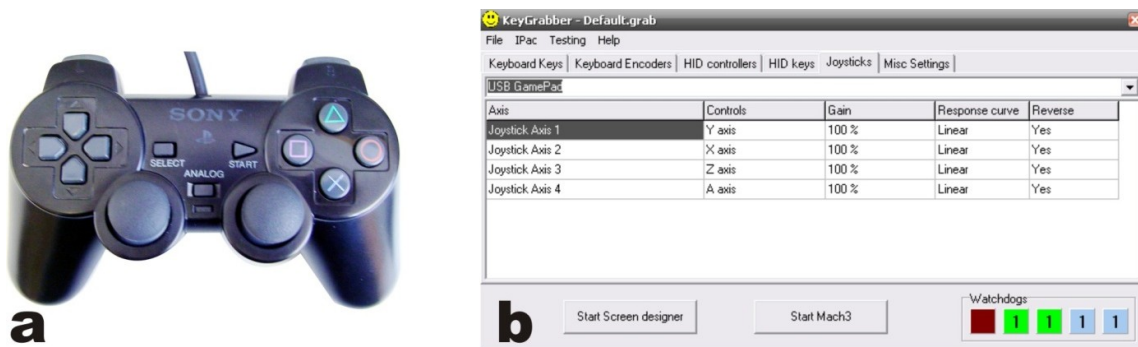


Figura 3-38 – Em (a) controle usado para movimentação do manipulador e em (b) tela de configuração do KeyGrabber

3.4.3 Programação dedicada

Pelo fato do controlador CNC Mach3 ser destinado à realização de operações de fresamento e torneamento, este não possui partes elementares de programação de robôs, sobretudo, a funcionalidades para a programação de trajetórias. Dentre as referidas partes, a que merece maior destaque, devido à praticidade que traz ao equipamento, é a determinação de trajetórias por intermédio da captura de pontos.

Neste contexto, foi desenvolvida uma programação específica para o TARTÍLOPE V4. Esta nova programação trabalha em conjunto e de forma paralela com o Mach3. Portanto, há a utilização das funcionalidades principais do Mach3 para o controle de movimento e para a criação de trajetórias, enquanto que as metodologias de soldagem têm rotinas dedicadas de programação criadas para o robô. Ou seja, tornou-se factível a adequação do controlador à maioria das necessidades impostas por um robô de soldagem.

Para nortear o desenvolvimento da programação dedicada, foi elaborado um fluxograma básico com as rotinas envolvidas na determinação de trajetórias do manipulador, Figura 3-39. Observando o fluxograma, tem-se uma tela inicial que apresenta duas alternativas, sendo uma para a criação de trajetórias e outra para abrir arquivos salvos no microcomputador. Caso a opção escolhida seja a de carregar um programa, o operador é direcionado para a tela final da IHM, denominada de soldagem. Entretanto, se o objetivo for criar uma nova trajetória de soldagem para um fim específico, ao ser selecionada a opção programar a IHM seguirá para a tela de seleção de tecimento.

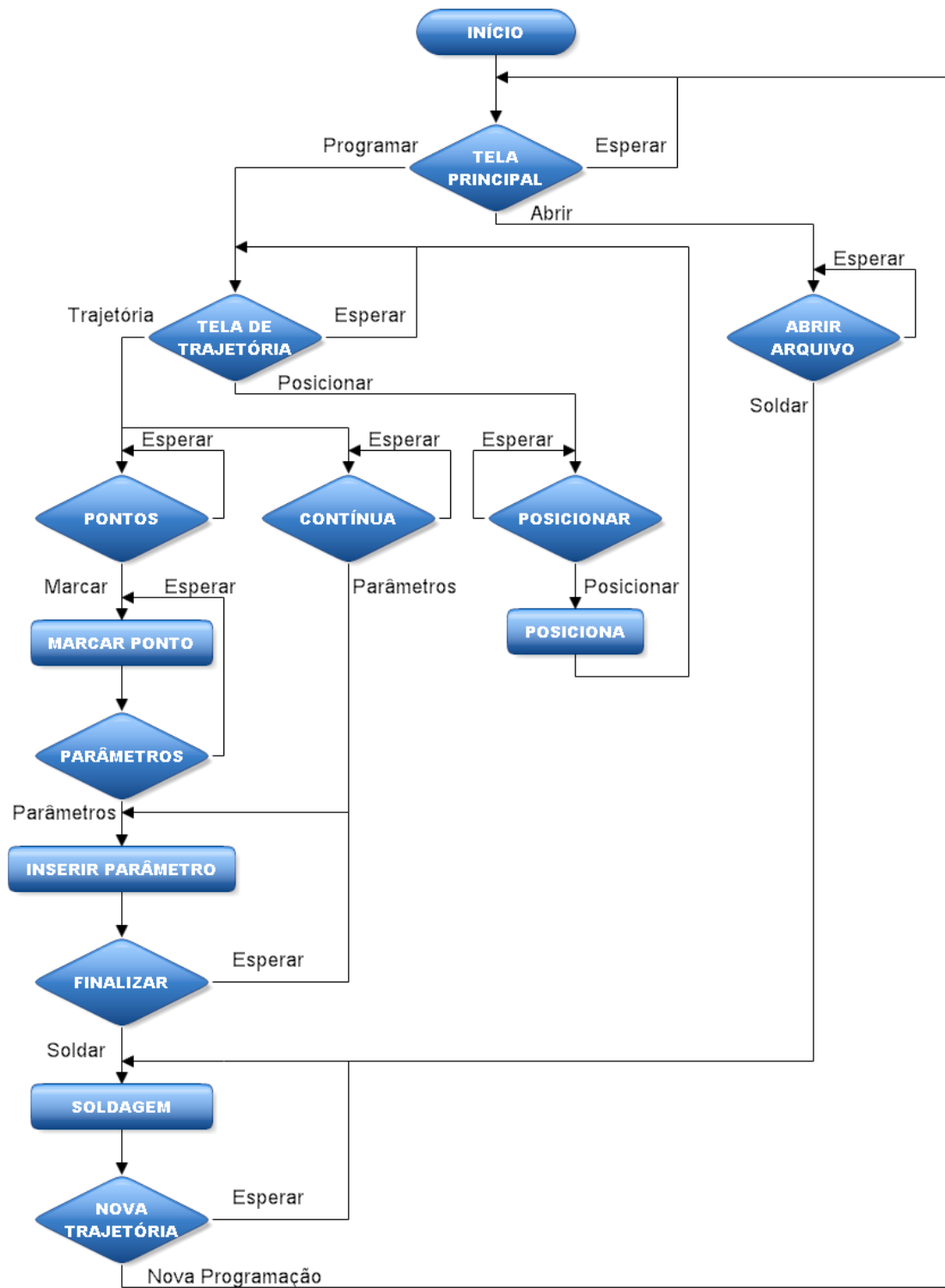


Figura 3-39 – Fluxograma da programação do TARTÍLOPE V4

Nesta tela o operador possui sete alternativas. Na primeira pode posicionar o manipulador. Após determinar a posição desejada, seleciona a opção voltar e retorna a tela de tecimento. Como segunda opção, pode-se selecionar uma trajetória de forma contínua, sendo que tal opção está habilitada para as três formas de trajetória (linear, tecimento triangular ou trapezoidal). Nesta opção o manipulador inicia a execução do deslocamento a partir de sua posição atual. Por fim, o operador tem a opção de criar uma seqüência de pontos que determinarão a trajetória, assim como no deslocamento contínuo esta opção está habilitada para as três formas de trajetória. Aqui a IHM segue para a tela de marcação de pontos.

Na marcação de pontos, o usuário posiciona o robô nos locais que deseja realizar o cordão de solda e efetua a captura destes por intermédio de um botão. Após a seleção de todos os pontos constituintes da trajetória almejada, o usuário pressiona um botão para finalizar a operação. Quando terminado a marcação de pontos a IHM é redirecionada para uma tela de inserção de variáveis relativas ao deslocamento de soldagem.

A tela de ajuste dos parâmetros de deslocamento, a qual é idêntica para o deslocamento por pontos ou contínuo, fornece as opções pertinentes a velocidade de soldagem e as características da trajetória. Com a determinação das referidas variáveis, o sistema vai para a tela de soldagem.

A tela de soldagem é a tela final de programação do robô. Nesta o operador tem a possibilidade de executar o deslocamento ou então, abrir um programa salvo anteriormente ou gerado a partir de um *software* de CAM.

Ao termino da soldagem, o usuário aciona um botão de início, tal ação faz com que o sistema retorne à tela principal da interface. A partir deste momento, o usuário pode iniciar a programação de uma nova trajetória de soldagem.

3.4.4 Desenvolvimento da IHM

A interface disponibilizada pela Mach3 é uma IHM funcional genérica e destinada às operações de fresamento ou torneamento. Entretanto, é compreensível apenas para um operador especializado. O desafio neste âmbito foi elaborar uma interface gráfica que fosse simples e intuitiva para um operador sem conhecimentos avançados. Em suma, foi fundamental um estudo sobre técnicas de *designer*, visto

que o foco era ter um produto de fácil utilização em campo e não apenas um protótipo restrito ao uso em laboratório.

Com o desenvolvimento de uma IHM em ambiente gráfico e específica às atividades de soldagem, tornou-se viável o emprego de monitores sensíveis ao toque, *touch screen*, em substituição aos monitores convencionalmente usados para a exibição de IHM's. Isto é altamente relevante, posto que com a implementação de um monitor sensível ao toque são eliminados teclado e mouse, ocasionando maior facilidade de operação do equipamento em campo. Desta maneira, é factível que o operador tenha total controle do equipamento por intermédio de uma tela com 7 polegadas. Este fato é fundamental para a soldagem, pois o usuário acompanha de perto a realização do cordão e atua no sistema caso detecte alguma inconformidade.

Em tal campo de atuação, os desenvolvimentos iniciais foram realizados com um *software* comercial, que opera em conjunto com o Mach3, denominado Screen4. A Figura 3-40 apresenta uma tela em fase de construção destinada à soldagem, a qual não fica restrita apenas às questões de alteração de *layout*.

Juntamente com a introdução de técnicas que proporcionassem uma operação mais intuitiva, foram criados subsídios para a programação de trajetórias por marcação de pontos e com diversas formas de tecimento. A elaboração de funções específicas para diferentes tarefas, foi realizada por intermédio da linguagem de programação *Visual Basic*, a qual é utilizada pelo Screen4.

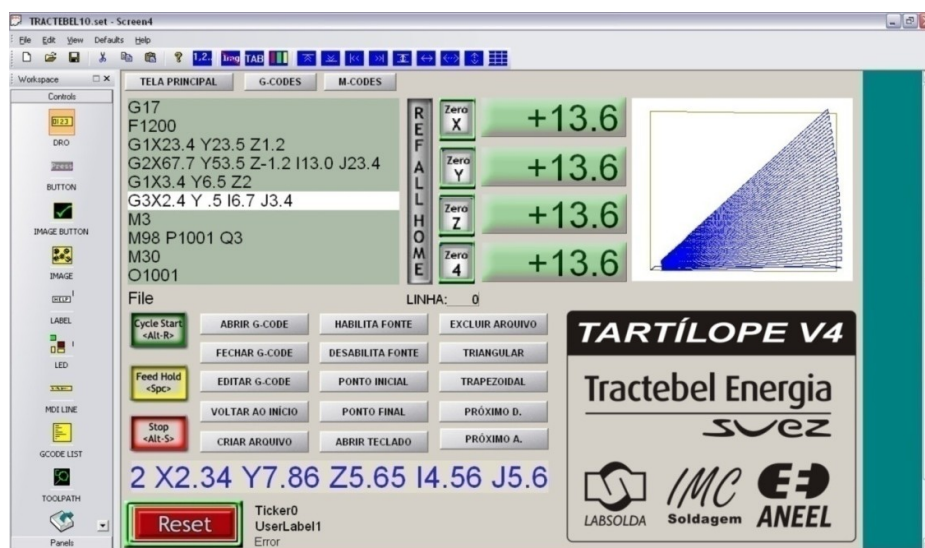


Figura 3-40 – Screen4: ambiente de desenvolvimento de IHM em linguagem *Visual Basic*

Com o intuito de gerar ainda mais integração entre as partes envolvidas nas tarefas, elaboraram-se metodologias para o comando da fonte de soldagem. Assim, durante a programação dos pontos pertencentes à trajetória, o operador indica quais os locais que deseja habilitar ou desabilitar a fonte de soldagem, bem como determina um tempo entre o disparo da fonte e o deslocamento do robô. Este tempo de espera é primordial para que haja estabilização do arco elétrico.

A IHM até aqui construída já apresentava significativo avanço em relação às interfaces fornecidas pelo Mach3. Contudo, o *software* Screen4 é um programa em fase de testes e apresenta uma série de problemas, os quais acarretam em desperdício demasiado de tempo para a construção de uma IHM tecnicamente simples.

Em virtude disto, o uso do Screen4 foi abolido e se iniciou uma nova pesquisa para a construção de IHM's, agora trabalhando com o *software* Adobe Flash CS3. Com a utilização deste novo programa, o desenvolvimento da interface tornou-se mais flexível, além de possibilitar maior elaboração gráfica, o que facilita a operação do robô.

Os resultados preliminares do desenvolvimento da nova IHM, com a aplicação da linguagem de programação *Flash*, são observados na Figura 3-41. No item (a) aparece a tela inicial de programação, onde o operador escolhe a forma do tecimento que o robô executará durante a execução da soldagem e em (b) a tela destinada ao ensinamento do robô. Nela o operador tem a possibilidade de efetuar a programação de uma trajetória específica por intermédio de marcação de pontos.

Basicamente, a tarefa de determinação dos pontos de uma trajetória é dividida em quatro etapas. Na primeira delas, o operador desloca o manipulador para a posição inicial de soldagem. Em seguida pressiona o ícone pertinente a cada uma das juntas, a fim de zerar os seus marcadores de posição.

Etapa 2, o usuário seleciona a opção de excluir arquivo com objetivo de eliminar algum ponto que possa estar gravado de forma equivocada, sendo que este interferiria diretamente na trajetória de soldagem. Após excluir o arquivo, deve ser escolhido a opção criar arquivo, a qual torna possível o início do procedimento de marcação de pontos.

Na etapa 3, o operador desloca o manipulador, por intermédio dos botões de mais e menos referentes a cada junta, até o ponto que deseja marcar. Ao determinar

o ponto deve-se acionar a tecla “marcar ponto”, o qual captura a posição do robô e armazena o dado. Atualmente, a operação de captura de pontos está limitada a 200 pontos, o que é mais do que suficiente para a soldagem em campo.

Por fim, na etapa 4, o operador certifica-se que todos os pontos foram marcados e pressiona a tecla “parâmetros”. Desta forma, o modo de ensinamento é encerrado e o programa do manipulador segue para a tela de determinação dos parâmetros de deslocamento da tocha de soldagem, Figura 3-42(a).



Figura 3-41 – Primeira IHM em ambiente Flash. Em (a) tela para seleção da forma de tecimento e em (b) captura de pontos

Na referida tela foi incorporado um teclado numérico virtual, o que facilita significativamente a operacionalidade do equipamento. Com o uso deste teclado em um monitor sensível ao toque, o operador, após marcar os pontos da trajetória, seleciona a variável desejada e digita o valor referente à mesma. Ao ser pressionado a tecla ENTER, o valor é armazenado e pode-se partir para a programação da próxima variável.

O exemplo apresentado na Figura 3-42(a) diz respeito à determinação dos parâmetros de soldagem com tecimento triangular e disparo automático da fonte de

soldagem. Deste modo, o operador programa a velocidade de soldagem, a amplitude e a frequência de tecimento, bem como o tempo de disparo da fonte. O referido tempo de disparo é uma variável medida em segundos, e determina o intervalo de tempo entre o disparo da fonte de soldagem e o início do deslocamento do manipulador. Esta variável visa garantir a estabilidade do arco elétrico antes que a trajetória seja inicializada. Os valores deste tempo dependem diretamente do processo e da fonte de soldagem que estão sendo utilizados. Ao ajustar todos os parâmetros, o operador clica no botão soldar e o sistema segue para a última tela da IHM do manipulador.

Por fim, a Figura 3-42(b) ilustra a tela final de operação do TARTÍLOPE V4, onde o usuário visualiza o programa gerado com o intuito de verificar algum erro. Nesta tela, as principais opções são a de iniciar, pausar, parar e voltar, sendo que esta última tecla tem a função de retornar ao início do programa para uma nova execução de trajetória. Além destas opções o operador pode abrir um arquivo previamente salvo ou gerado a partir de um *software* de CAM, editar o arquivo existente ou salvá-lo para ser utilizado posteriormente.

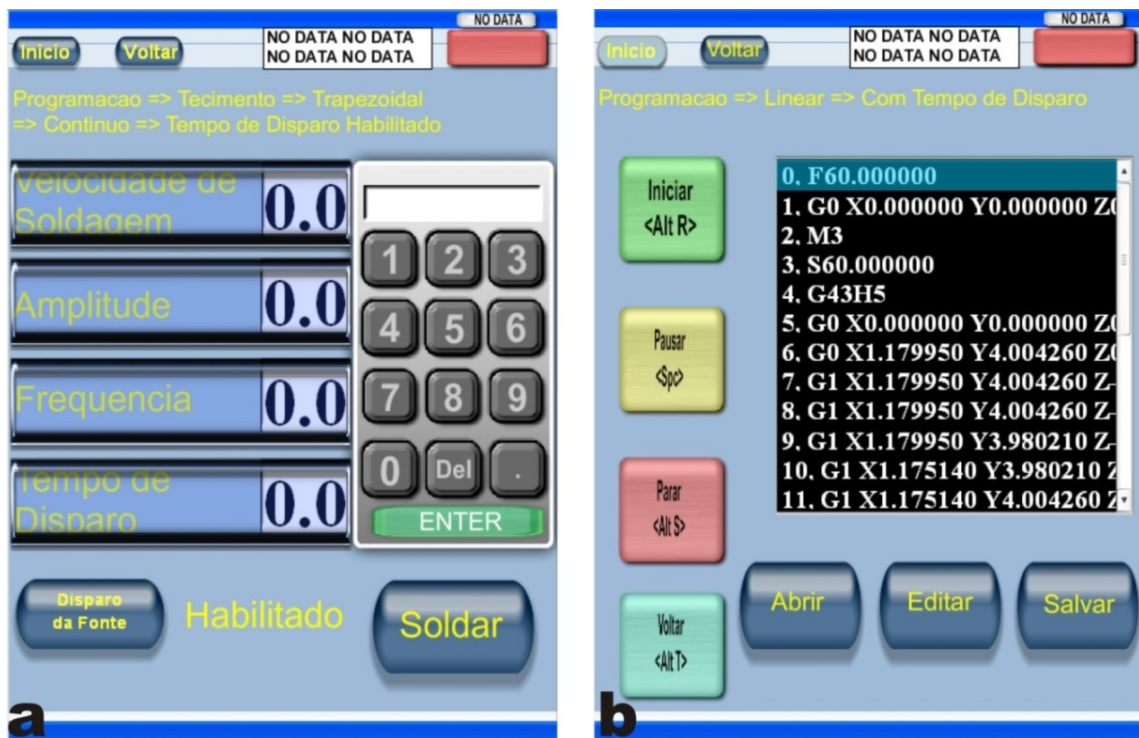


Figura 3-42 – Primeira IHM em ambiente Flash. Em (a) programação dos parâmetros de soldagem e em (b) tela de operação final

Esta primeira IHM teve como foco a implementação de funções específicas para a soldagem e definição de uma seqüência lógica para a operação do robô.

A partir dos resultados satisfatórios obtidos com a primeira IHM desenvolvida em ambiente *Flash*, uma segunda interface foi programada. Neste novo projeto, o objetivo era proporcionar maior facilidade de operação. Desta forma, o desenvolvimento do ambiente gráfico ocorreu em conjunto com testes de soldagem, a fim de verificar qual o melhor método de operação do robô. Portanto, juntamente com a análise operacional, empregaram-se metodologias de *design*, para com isto gerar uma IHM mais intuitiva. A Figura 3-43 apresenta o resultado final da nova interface, mais simples e intuitiva. Houve um ganho considerável na operacionalidade do equipamento (em virtude disto o tempo final de programação foi reduzido). A Figura 3-43(a) apresenta a tela inicial da IHM, onde o operador seleciona se deseja programar uma nova trajetória ou carregar um arquivo salvo anteriormente. Caso opte por programar uma nova trajetória, o sistema é direcionado para a tela de seleção da forma de deslocamento, Figura 3-43(b), onde se opta por uma trajetória linear, com tecimento trapezoidal ou triangular. Dentro destas opções, é factível escolher uma trajetória contínua, onde o manipulador inicia o deslocamento a partir da posição que se encontra, ou então programar uma seqüência de pontos. Adicionalmente, há a opção de posicionar o robô.

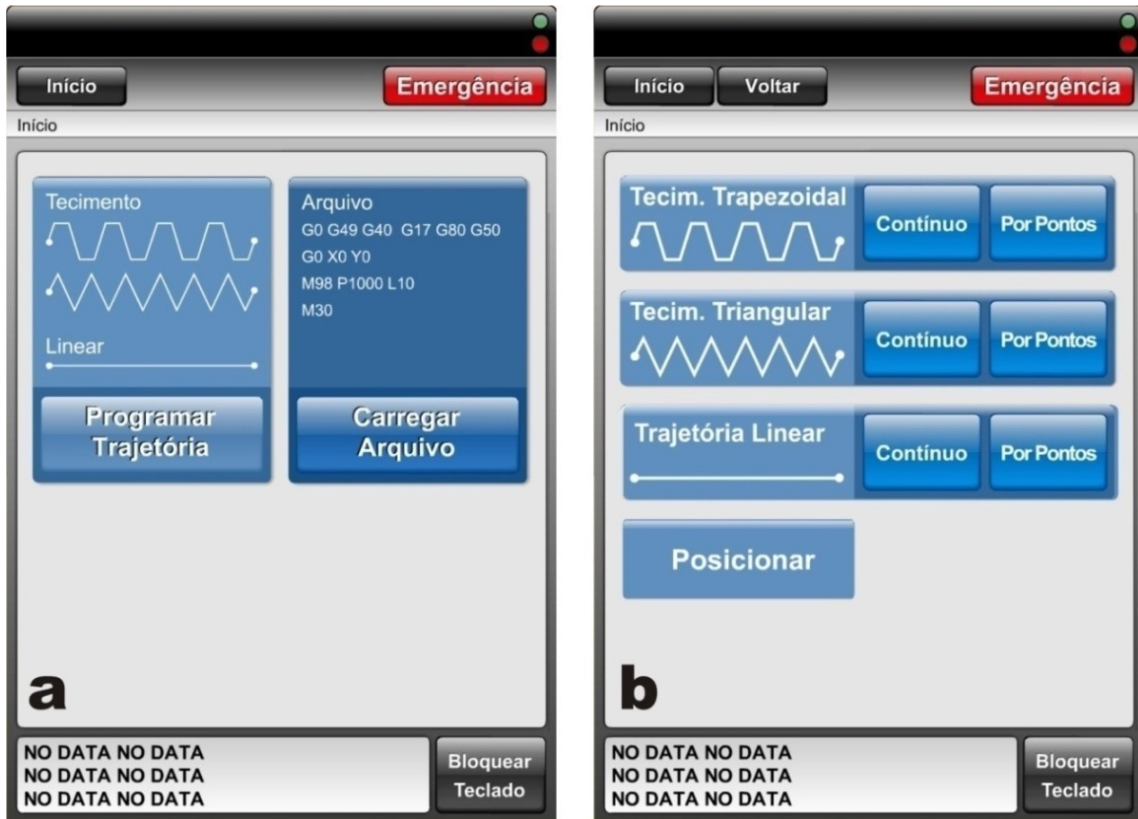


Figura 3-43 – Em (a) tela inicial de programação do manipulador e em (b) tela de seleção da forma de trajetória

Considerando que foi escolhida a realização de um tecimento trapezoidal por pontos, a IHM vai para a tela de programação dos pontos, Figura 3-44(a). Aqui o usuário limpa os pontos marcados anteriormente, desloca o manipulador até o zero peça e inicia a captura dos dados que descreverão a trajetória de soldagem. Caso algum ponto seja marcado equivocadamente, a tecla excluir ponto elimina a última informação armazenada. Ao finalizar a marcação dos pontos, basta selecionar a tecla de parâmetros.

Do mesmo modo que na primeira interface em ambiente *Flash*, na tela de determinação de parâmetros, Figura 3-44(b), o operador seleciona a variável e digita o valor no teclado virtual. Ao final da operação basta selecionar em finalizar programação.

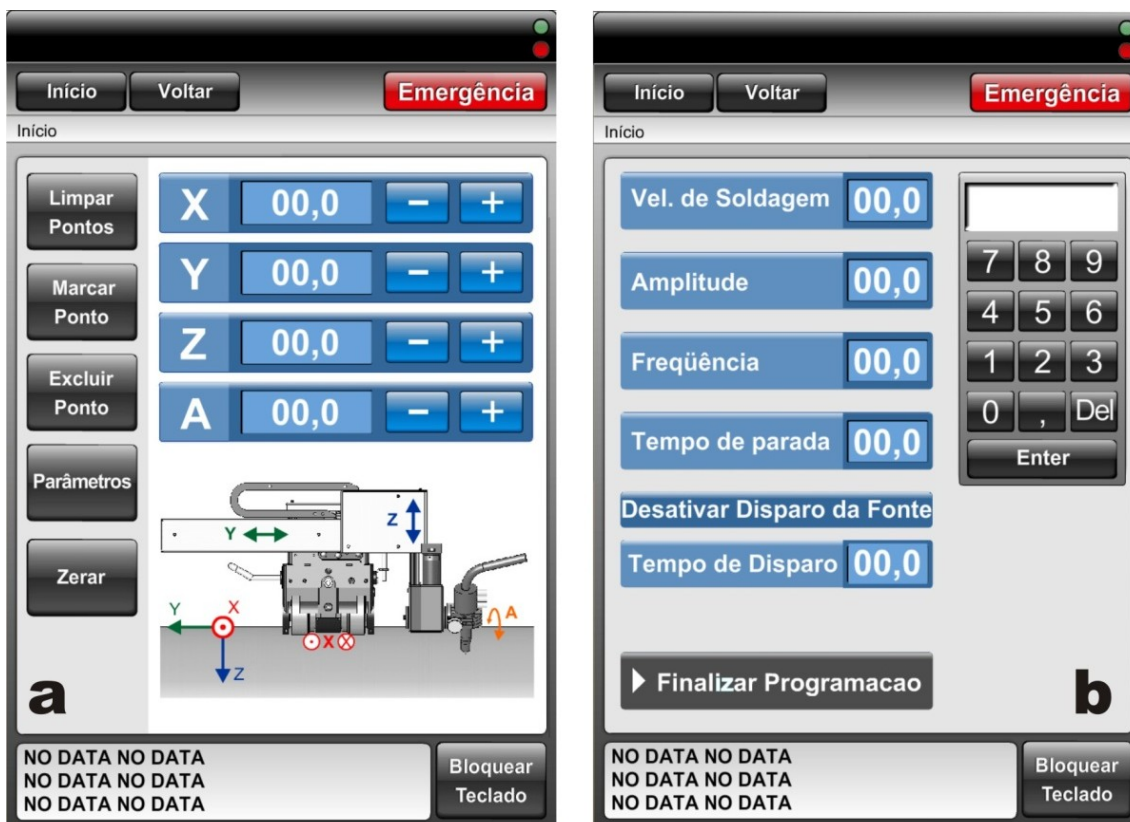


Figura 3-44 – Em (a) tela para a marcação de pontos e em (b) tela para determinação dos parâmetros de deslocamento

Por fim, o usuário tem a tela para o acompanhamento da soldagem, Figura 3-45, onde são apresentadas as variáveis ajustadas e opções de edição e execução do programa.

Posto que a confiabilidade é primordial na execução das trajetórias, todas as telas de programação possuem uma tecla para bloquear o teclado. Esta visa evitar que o operador acione involuntariamente algum comando do robô, aumentando o nível de segurança do equipamento. Ao se pressionar tecla “bloquear” somente o botão “emergência” pode ser acionado.



Figura 3-45 – Tela final para acompanhamento da soldagem

3.5 Unidade de Controle

Toda a concepção mecânica adotada para o desenvolvimento do TARTÍLOPE V4 foi embasado no requisito operacionalidade. Ou seja, era fundamental a construção de um equipamento leve, portátil e prático para a operação em campo. Seguindo a mesma linha da concepção mecânica, o projeto da unidade de controle também buscou ser compacto. Assim como o ocorrido na estrutura mecânica, a unidade de controle passou por um desenvolvimento inicial e posterior aperfeiçoamento.

Em virtude de que no primeiro protótipo do robô a parte da unidade de controle constituída pelas placas de isolamento e pelos servo *drivers* estava alocada dentro do próprio manipulador, e a central de controle de movimento era formada por um microcomputador convencional, foi necessário apenas o projeto de um gabinete para comportar a eletrônica de potência e as botoeiras da lógica de acionamento.

Neste contexto, a primeira unidade de controle construída, Figura 3-46, apresentava as dimensões de 27 x 18 x 11 cm. Tal unidade foi desenvolvida em caráter experimental.

Na parte interna do gabinete, Figura 3-46(a), o item 1 indica uma fonte chaveada de 24 Vcc, sendo esta utilizada para toda a parte de alimentação dos servo motores, sensores de posicionamento e para as partes integrantes da lógica de acionamento. O número 2 mostra o contactor empregado como elemento a fim de prover maior segurança ao sistema. Em 3 tem-se um filtro de linha, com o intuito de amenizar os ruídos provenientes da rede elétrica. Desta forma, reduz-se a possibilidade de interferências nos circuitos eletrônicos. Por fim, em 4 é indicado um transformador para adequação do tensão de alimentação da placa DeskCNC, com o transcorrer do projeto este item deixou de ser necessário.

Na parte frontal do gabinete, Figura 3-46(b), estão dispostos todos os botões da lógica de acionamento e o conector para o cabo de comunicação com o manipulador. Na parte central tem-se os botões LIGA (verde), DESL (vermelho), VT (azul) e PAUSE (laranja), enquanto que no lado esquerdo aparecem os botões de OR (branco) e SE (vermelho).

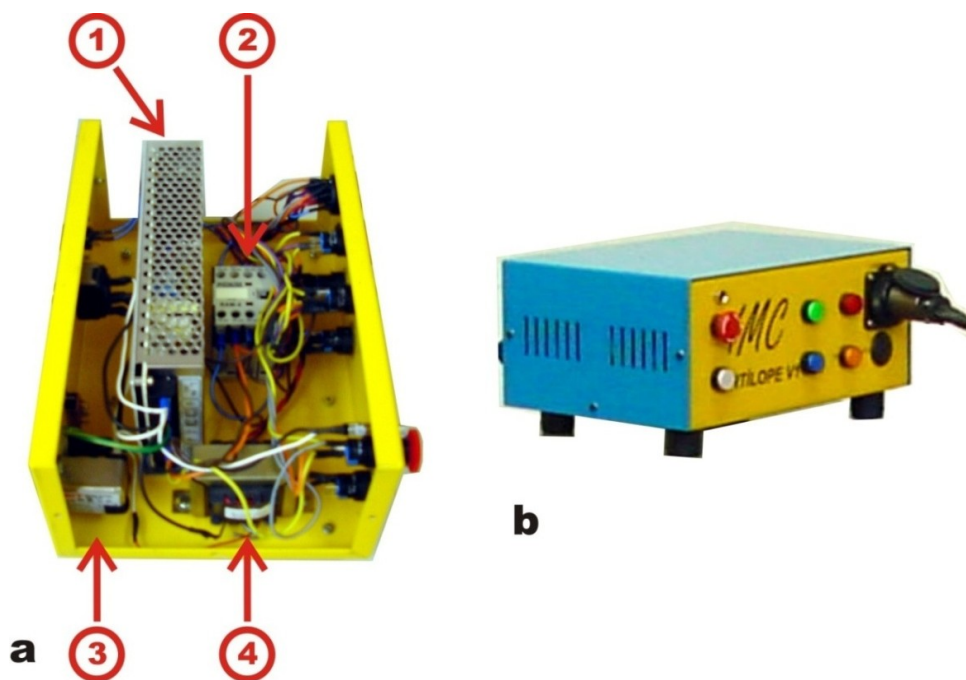


Figura 3-46 – Painel elétrico de comando. Em (a) parte interna e em (b) parte externa do primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4

Com o re-projeto da estrutura mecânica do manipulador e conseqüente retirada das placas eletrônicas do interior do mecanismo, tornou-se indispensável o projeto de um novo gabinete. Dada a necessidade deste novo projeto, partiu-se para uma unidade de controle única, ou seja, um gabinete onde estaria contida toda a eletrônica de potência, lógica de acionamento e *hardwares* para o controle de movimento.

O novo gabinete construído, Figura 3-47, apresenta dimensões similares a um computador convencional, com medidas 41 x 19 x 41 cm. O seu interior é apresentado na Figura 3-47(a), sendo que o número 1 indica a fonte de alimentação do sistema computacional. Em 2 é apresentada uma placa mãe de PC, o que torna o TARTÍLOPE V4 um microcomputador. O item 3 mostra a fonte chaveada de 24 Vcc. Em 4 aparecem as placas de isolamento e os servo *drivers*, estes anteriormente estavam alocados no interior do manipulador. O número 5 ilustra o contactor do circuito lógico de acionamento. Por fim, o item 6 aponta o HD utilizado para armazenar as informações de controle.

A estrutura externa do gabinete, Figura 3-47(b), possui os mesmos botões e funções encontradas no primeiro gabinete. Adicionalmente a estas funcionalidades, há um conector de vídeo para o monitor *touch screen*, duas entradas USB e um pino de alimentação de 24 Vcc. Existe também um conector para tornar factível o disparo da fonte de soldagem pelo robô e um conector para o botão de PE, o qual tem um cabo extensor que possibilita ao operador interromper mais facilmente a soldagem caso haja algum problema. Por último há três conectores para a comunicação entre gabinete e manipulador.

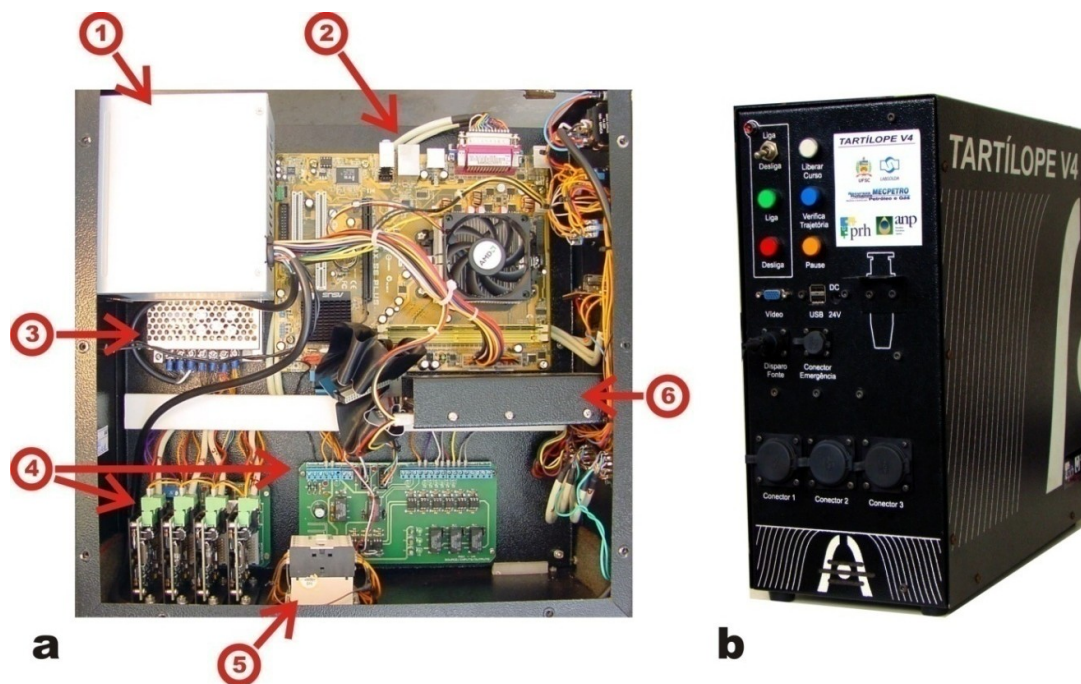


Figura 3-47 – Painel elétrico de comando do segundo protótipo do TARTÍLOPE V4. Em (a) a parte interna e em (b) a externa

3.6 Síntese deste capítulo

O projeto do TARTÍLOPE V4 englobou pesquisas em diversas áreas de atuação, sempre com o foco em gerar um equipamento para a operação em campo.

Mesmo com o seu caráter extremamente multidisciplinar, o desenvolvimento de todas as partes (mecânica, eletroeletrônica, programação, *design* e engenharia de produto) ocorreu de maneira integrada durante as etapas. As prioridades na construção do primeiro e do segundo protótipos foram distintas, contudo as partes foram consideradas em todos os momentos.

O contexto geral do desenvolvimento apresentado pode ser resumido pelo resultado final do projeto, Figura 3-48, onde é exposto o conjunto completo do TARTÍLOPE V4.

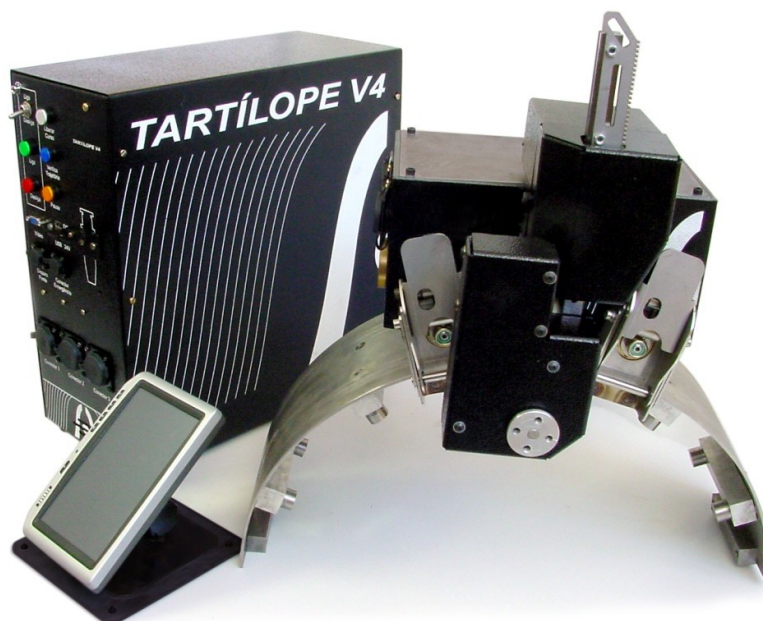


Figura 3-48 – Sistema completo: unidade de controle, monitor sensível ao toque, cinta orbital e mecanismo

CAPITULO 4

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

No presente capítulo são relacionados os principais equipamentos empregados tanto nos experimentos em laboratório, como em campo. Toda a metodologia da construção do manipulador exposta no capítulo anterior é aqui utilizada, juntamente com processos e meios para a automação da soldagem. Por fim, são apresentados os resultados práticos de soldagem obtidos nos testes efetuados inicialmente em laboratório e posteriormente no ambiente real de operação.

4.1 Descrição das bancadas

Em consequência do caráter multifuncional do TARTÍLOPE V4 e das distintas tarefas a que o mesmo é destinado, no transcorrer do projeto foi necessária a construção de duas bancadas, a fim de simular as particularidades de cada operação.

A primeira destas bancadas é voltada para a soldagem orbital MIG de dutos com 16 polegadas de diâmetro, Figura 4-1. Na referida imagem, as partes constituintes do sistema mostram o primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4. O número 1 indica o microcomputador com o *software* Mach3 empregado no controle de deslocamento do robô.

Para a programação do equipamento foi utilizado um monitor sensível ao toque com a IHM gráfica, o qual é indicado com 2. O item 3 traz o painel elétrico com as fontes de potência e botoeiras para a lógica de acionamento. Aqui, o usuário tem a possibilidade de interromper a soldagem caso visualize alguma inconformidade na trajetória.

Em 4, tem-se um fonte de soldagem MTE DIGITEC 600, fabricada pela empresa IMC – Soldagem, que foi utilizada para os testes preliminares de soldagem com o processo MIG/MAG. Por fim, o número 5 indica o manipulador instalado em uma cinta orbital rígida sobre um duto de 16 polegadas de diâmetro e 25 mm de espessura de parede.

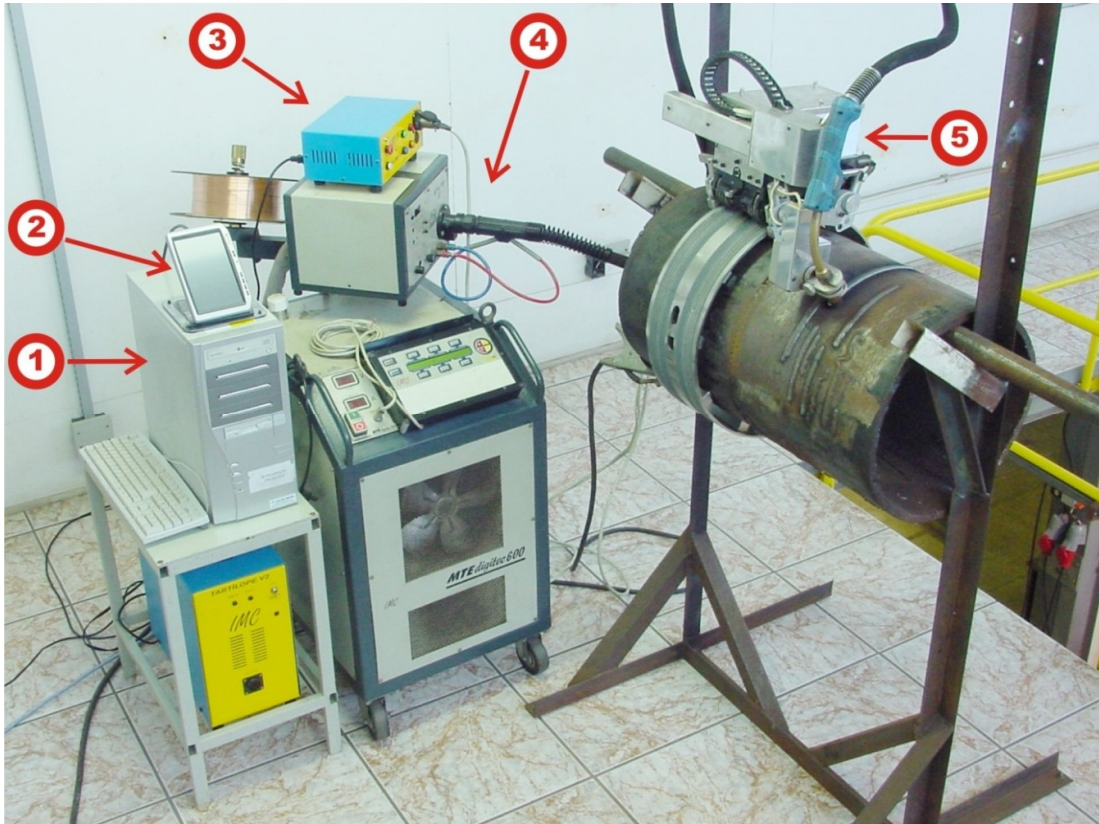


Figura 4-1 – Bancada para soldagem orbital

A segunda bancada é destinada à soldagem, na posição vertical, de tubos de parede de caldeira de usinas termelétricas, Figura 4-2. Para a construção de tal bancada considerou-se dados de uma caldeira real. Assim, foi construída uma parte de parede com tubos de 63,5 mm de diâmetro externo e distância entre centros de 82,2 mm. A partir destes dados projetaram-se os fixadores magnéticos para instalação do trilho flexível aos tubos. Em (a) o item 1 apresenta o primeiro protótipo do TARTÍLOPE V4 instalado em um trilho flexível na posição vertical, bem como um corpo de prova para os testes preliminares. Em 2 encontra-se o alimentador de arame e em 3 uma unidade refrigeradora de tocha UPR7500. Já o em (b) é mostrada a fonte de soldagem utilizada nos testes, a qual é proveniente de um projeto com a TRACTEBEL Energia e, do mesmo modo que o TARTÍLOPE V4, apresenta dimensões reduzidas para a operação em ambientes confinados.

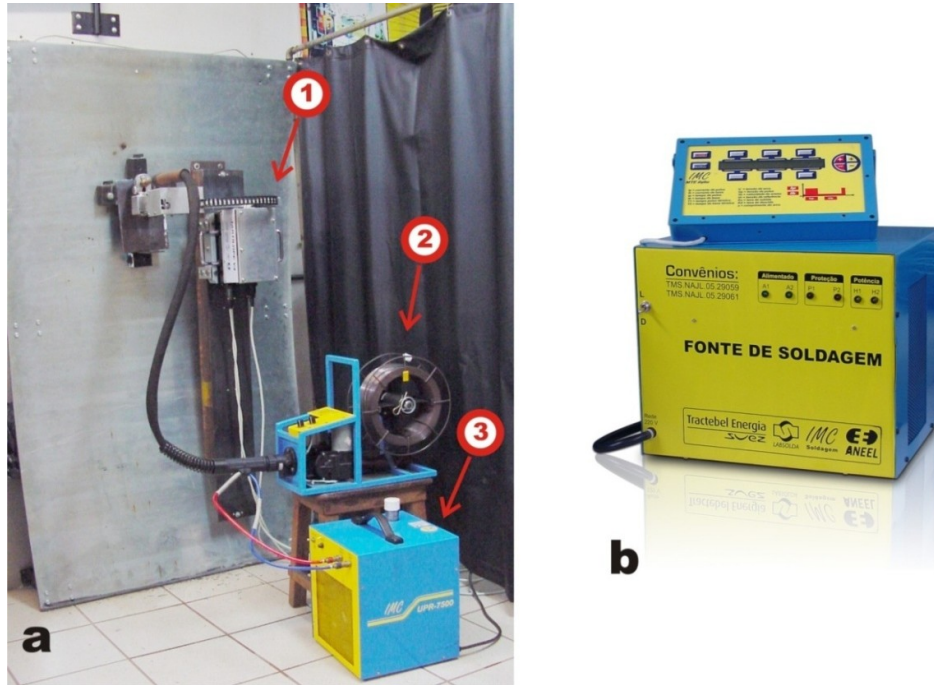


Figura 4-2 – Bancada para revestimento de tubos de caldeira

4.2 Resultados obtidos em laboratório

Grande parte dos testes efetuados em laboratório estava relacionada diretamente com o levantamento de problemas no TARTÍLOPE V4. Com a análise destes, no transcorrer do desenvolvimento surgiram novas versões do equipamento, tanto na concepção mecânica quanto na programação e IHM. Deste modo, os resultados de soldagem ainda são preliminares e devem ser aprimorados.

4.2.1 Soldagem de dutos

No âmbito da soldagem de dutos, os testes focaram quase que exclusivamente o levantamento de dados a respeito do robô. Isto implica que foram considerados os resultados das características dinâmicas do deslocamento, bem como a funcionalidade e confiabilidade do manipulador. Conseqüentemente os ensaios de soldagem, os quais não objetivaram a união de dutos, tiveram ênfase em avaliar o comportamento do TARTÍLOPE V4 em um ambiente de operação.

Neste contexto, a Figura 4-3 mostra alguns cordões de solda realizados durante a avaliação do robô. Os referidos ensaios foram executados partindo-se da posição

plana, passando pela vertical descendente até a sobrecabeça com velocidade de soldagem de 21 cm/min, tecimento triangular com amplitude de 4 mm e frequência de 1 Hz. Quanto aos parâmetros de soldagem, foi utilizado o processo MIG convencional com tensão entre 20 e 21 V, arame ER 70S-6 com 1,2 mm de diâmetro e velocidade de avanço de 3 m/min.

Na Figura 4-3, é apresentado em detalhe o cordão de solda obtidos em diferentes posições. Na posição plana, apresentou largura de 11,5 mm e altura de 3,2 mm. Já na vertical descendente 13 mm de largura e 2,2 mm de altura. Por fim, na posição sobre-cabeça largura de 10,0 mm e altura de 3,5 mm.

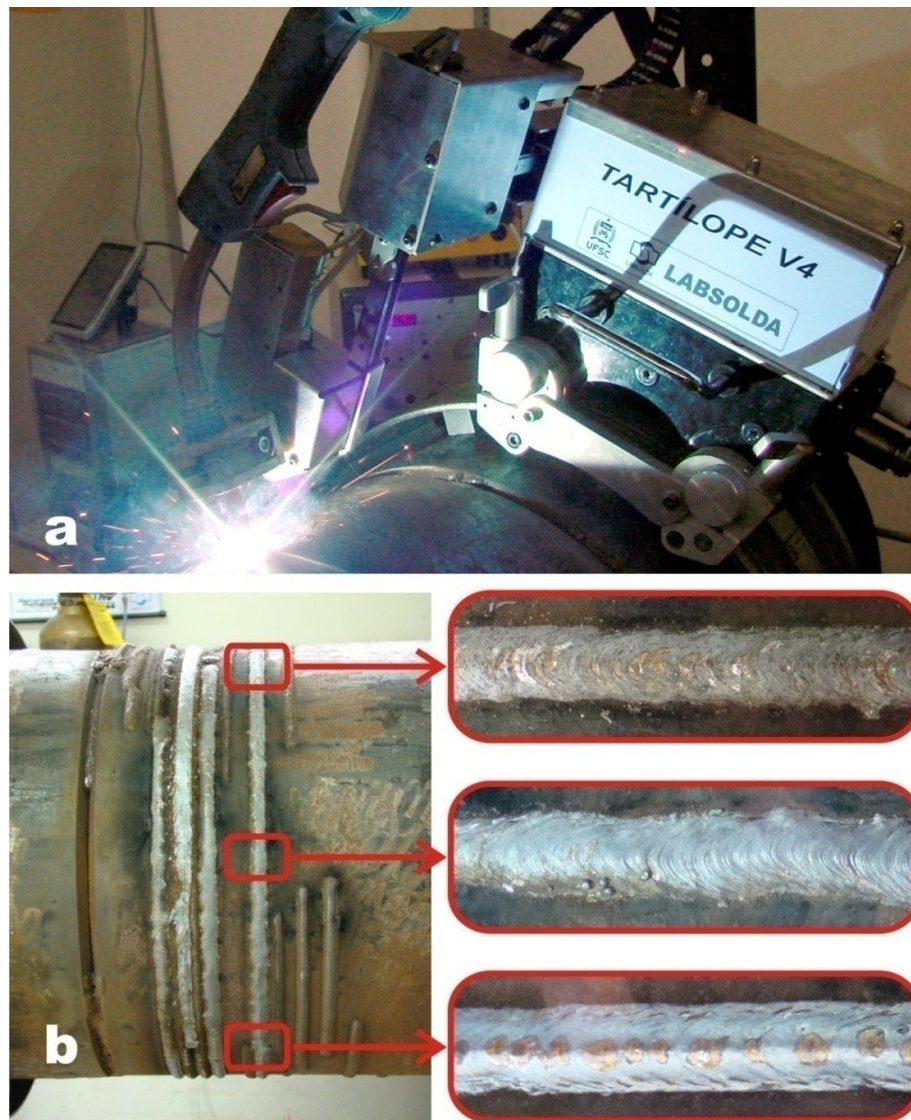


Figura 4-3 – Testes iniciais de soldagem orbital MIG. Em (a) o robô em operação e em (b) resultados preliminares

Tais resultados de soldagem ainda não são satisfatórios, até mesmo porque os testes foram exploratórios. Não houve, por exemplo, ensaios voltados para a execução do passe de raiz, sendo este o de maior importância e dificuldade para a soldagem de união de dutos.

4.2.2 Revestimento de tubos de caldeiras de usinas termelétricas

Os testes preliminares de soldagem de tubos de caldeira foram efetuados com o processo MIG/MAG convencional com o arame AWS ER80S-G de 1,2 mm de diâmetro, maciço. O objetivo era analisar o robô e elaborar uma metodologia para a soldagem em campo.

Posteriormente, efetuaram-se testes iniciais e comparativos para o revestimento de tubos de paredes de caldeiras com materiais nobres, onde foram elaboradas duas metodologias distintas. A primeira delas empregou o processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica e o aço inox 309L como material de adição. Já a segunda, fez uso do processo PTAP com adição de INCONEL 625 em pó. Todos os testes tiveram o mesmo padrão de corpo de prova, sendo este um tubo com 50 mm de diâmetro e 6 mm de espessura. Quanto à característica da soldagem de revestimento, foram efetuadas na posição horizontal e em apenas 180° do tubo.

Os testes com o processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica e aço inox 309L tiveram bons resultados quanto à continuidade dos cordões e estabilidade da soldagem. A Figura 4-4 apresenta os primeiros resultados, onde foi utilizado uma velocidade de soldagem de 40 cm/min e tecimento trapezoidal com frequência de 1,7 Hz, amplitude de 5 mm e tempo de parada lateral de 0,1 s, sendo que após cada cordão o tubo era girado, a fim de marcar a soldagem sempre na posição plana. Mesmo com esta técnica, que tem como característica proporcionar maior controle sobre a geometria do cordão, não foi conseguido um depósito com espessura menor do que 2,5 mm. Esta espessura é considerada exagerada para um revestimento com materiais mais nobres do que o material de base. Além do desperdício de material, tal espessura acarreta uma deformação grande nos tubos. Nos ensaios de revestimento um corpo de prova de 500 mm de comprimento teve uma deformação de cerca de 6 mm de flecha, Figura 4-5.

Um dos principais problemas durante a execução dos ensaios foi a instabilidade no arco elétrico, esta por sua vez era decorrente de uma elevada amplitude de

tecimento. Tal fato é natural, dado que ao fazer-se o tecimento sobre uma superfície curva ocorre grande variação na DBCP. Esta variação de DBCP impossibilitou alcançar-se amplitudes maiores que 5 mm para o processo MIG/MAG. Desde forma, para um revestimento de 180° do tubo foi necessária a realização de 10 cordões de solda.

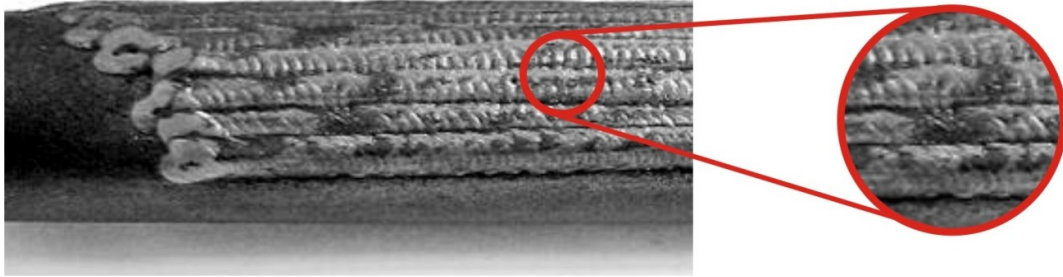


Figura 4-4 – Revestimento de tubos de caldeira com o processo MIG/MAG e aço inox 309L na posição plana

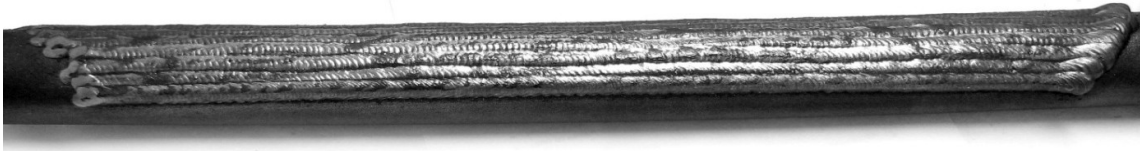


Figura 4-5 – Corpo de prova com deformação, soldado na posição plana

A segunda solução aplicada foi com o processo PTAP, onde empregado como material de adição o pó INCONEL 625. A não utilização do inox 309L se deve a sua indisponibilidade comercial. Quando comparado com o processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica, o PTAP apresenta um arco elétrico extremamente estável para variações de DBCP na ordem de 3 a 5 mm. Assim, foi possível a utilização de amplitudes bem maiores do que no caso anterior, chegando-se ao valor limite de 13 mm. Desta forma, com apenas 3 cordões, ao invés de 10, foi factível efetuar o revestimento do tubo. A Figura 4-6 mostra a característica do revestimento no tubo de 50 mm de diâmetro.

Com o revestimento por intermédio do processo PTAP, os cordões de solda apresentaram alturas na faixa de 1 mm, o que é altamente desejado em um procedimento de revestimento desta natureza.



Figura 4-6 – Tubo revestido com o processo PTAP e INCONEL 625 na posição plana

4.3 Resultados obtidos em campo

Infelizmente no decorrer do projeto não foi factível a realização de testes de soldagem orbital na construção de linhas dutoviárias. Deste modo, os experimentos em campo ocorreram apenas no que diz respeito ao revestimento de tubos de caldeira de usinas termelétricas.

Os testes preliminares foram realizados na caldeira 4 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, localizado no município de Capivari de Baixo – SC e pertencente à TRACTEBEL Energia, Figura 4-7. Posto que o intuito era verificar as funcionalidades do manipulador em ambiente real de trabalho e não o revestimento com materiais nobres, empregou-se o processo MIG/MAG convencional com o arame AWS ER80S-G de 1,2 mm de diâmetro, maciço.

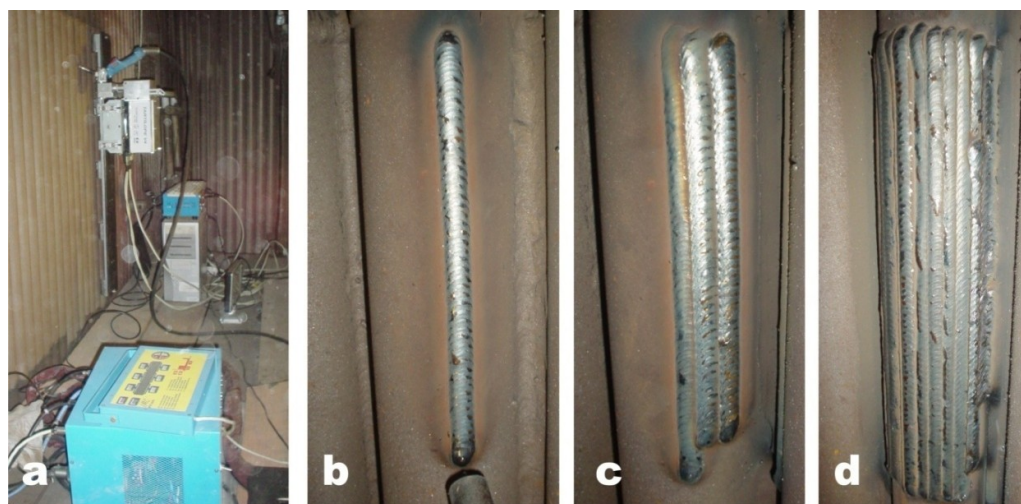


Figura 4-7 – Em (a) manipulador em operação no interior da caldeira 4 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda, em (b), (c) e (d) seqüência do revestimento

Quanto ao processo de soldagem, apesar dos cordões não terem ficado suficientemente sobrepostos, Figura 4-7(d), os resultados já foram satisfatórios. Já com relação ao desempenho do sistema robótico, ocorreu a avaliação de diversos pontos relativos às características de controle e mecânica.

Como ponto satisfatório cabe destacar que o sistema de controle CNC Mach3 funcionou corretamente, não gerando problema relacionado com possíveis interferências. Os fixadores magnéticos para o trilho flexível também tiveram bons resultados, sendo que garantiram elevada rigidez e facilidade para a instalação.

Apesar dos resultados alcançados, houve a detecção de problemas em determinadas características do robô, a saber:

- A junta Z ficou muito próxima à parede da caldeira, não possibilitando o correto ajuste da DBCP;
- A baixa velocidade de deslocamento da junta Y impossibilita a execução de tecimento com frequência acima de 2 Hz;
- O deslocamento total de aproximadamente 100° da junta A é insuficiente para o posicionamento adequado da tocha de soldagem;
- Perpendicularidade entre a tocha e o tubo: na soldagem da base do tubo há problema de colisão entre a tocha e o tubo vizinho ao que está em recuperação. Logo, não é factível manter a perpendicularidade entre as partes, ocasionando certa instabilidade do arco elétrico durante a realização do cordão.

Os dados obtidos foram tomados como base para o desenvolvimento do segundo protótipo do TARTÍLOPE V4. Desta maneira, houve subsídios para a construção do novo projeto.

4.4 Discussão de resultados

No que tange ao projeto do manipulador para a automatização da soldagem, o desenvolvimento é satisfatório, posto que os testes efetuados tanto em laboratório, quanto em campo mostraram resultados promissores.

Em virtude de que o TARTÍLOPE V4 é uma evolução de outro equipamento gerado por intermédio de pesquisa oriunda do próprio LABSOLDA, o TARTÍLOPE

V2, a análise dos resultados do projeto deve então ser comparativa entre estes dois manipuladores para a soldagem.

Neste contexto, o primeiro ponto a ser considerado é o sistema de acionamento, o qual foi completamente reprojeto, migrando-se de um acionamento em malha aberta e com motores de passo para um servo acionamento em malha fechada com servo motores de corrente contínua com escovas. Esta alteração diminuiu significativamente a quantidade de ruídos e vibrações geradas durante a operação. Como resultado direto obteve-se cordões com maior uniformidade. Outro ponto fundamental desta modificação na forma de acionamento é a confiabilidade. Anteriormente havendo algum problema em uma das juntas o sistema continuava funcionando, o que poderia acarretar em danos na peça que estivesse sendo soldada. Agora qualquer falha, seja no acionamento ou no controle, desliga automaticamente o manipulador e a fonte de soldagem, paralisando assim a operação o que evita possíveis retrabalhos.

Outra mudança significativa foi a alteração do sistema de controle. O TARTÍLOPE V2 utiliza um microcontrolador e um *software* desenvolvido pelo próprio laboratório. Tal fato é vantajoso por proporcionar domínio sobre a tecnologia, entretanto torna a evolução mais lenta, uma vez que não existe um grande número de pessoas envolvidas em aprimoramentos. Já com o controlador CNC Mach3, empregado no TARTÍLOPE V4, a implementação de novas funções torna-se mais rápida, dado há uma rede de suporte ao mesmo. Os resultados alcançados neste aspecto não ficam restrito apenas ao TARTÍLOPE V2, posto que quando comparado com os equipamentos internacionais, tem-se conclusões similares.

No que diz respeito a IHM, tem-se agora uma tela mais intuitiva e simples para o operador, posto que no TARTÍLOPE V2 a interface era baseada em um *display* de segmentos monocromáticos.

No âmbito da soldagem de união de dutos, os resultados ficaram restritos às características do robô, o qual apresentou confiabilidade para o deslocamento, em torno do duto, com velocidades na ordem de 1 m/min. A IHM gráfica também demonstrou grande funcionalidade e simplicidade para esta operação.

Os ensaios mais exploratórios no contexto da soldagem foram de fato a respeito de revestimento de tubos de caldeiras. Neste quesito, as duas metodologias de soldagem adotadas, MIG/MAG pulsado com pulsação térmica e PTAP, registraram bons resultados quanto à continuidade dos cordões. Como melhor opção para o

revestimento tem-se o processo PTAP com adição de INCONEL 625. Embora, o custo do INCONEL 625 seja alto, cerca de três vezes o valor do inox 309L, a sua aplicação pelo processo PTAP produz cordões com espessuras menores, o que economiza material e o acabamento é mais uniforme. Outra vantagem diz respeito ao tempo total de soldagem. Com a utilização do processo MIG/MAG pulsado com pulsação térmica a velocidade de soldagem ficou na casa de 40 cm/min e são necessários a realização de 10 cordões. Já com o processo PTAP, a velocidade de soldagem ficou na ordem de 20 cm/min, entretanto foram feitos apenas 3 cordões para conseguir-se o revestimento em 180° do tubo.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no desenvolvimento do TARTÍLOPE V4, visando à solução de problemas no âmbito da construção de linhas dutoviárias e para a manutenção de caldeiras de termelétricas, são satisfatórios. Dentre os destaques tem-se:

- Operacionalidade: mostrou-se robusto para operar com as dificuldades encontradas em campo, bem como facilidade de transporte, em virtude de suas dimensões e massa reduzidas, montagem e desmontagem;
- *Software*: o controlador CNC de baixo custo proporcionou a elaboração de meios que facilitam a programação do manipulador, como por exemplo, a captura de pontos e o uso de monitores sensíveis ao toque;
- Orientação da tocha: este diferencial do TARTÍLOPE V4, em relação aos demais equipamentos encontrados no mercado, proporciona maior confiabilidade na execução de cordões nas diferentes posições de soldagem, posto que em geral cada posição requer um ângulo de ataque;
- Controle em malha fechada: ao contrário de outros equipamentos, o TARTÍLOPE V4 opera com juntas controladas em malha fechada de velocidade e posição. Isto é altamente relevante, dado que garante maior confiabilidade na realização de tarefas, principalmente em operações de alto risco, por exemplo, a soldagem de dutos em operação.

Assim, o trabalho efetuado no âmbito desta dissertação exerce a filosofia de pesquisa do LABSOLDA, a qual busca além dos conhecimentos científicos e tecnológicos, os meios físicos para a fabricação industrial. Tal conduta proporciona maior desenvolvimento nacional, pois não fica concentrada apenas na utilização de equipamentos existentes no mercado. No âmbito da tecnologia da soldagem isto é relevante para o Brasil, posto que a maioria absoluta de equipamentos utilizados no país são provenientes de empresas estrangeiras. Adicionalmente, a elaboração de tecnologia própria cria subsídios para o real crescimento científico nacional, uma vez que não se fica restrito as limitações impostas por um equipamento comercial. A ampla maioria dos sistemas disponibilizados no mercado são uma espécie de caixa

preta, onde não é factível qualquer adaptação à tarefa objetivada, mesmo que seja de pequena ordem. Em suma, o Brasil deixa de ser um mero usuário de equipamentos importados e passa a ser detentor da tecnologia, tornando viável pequenas alterações no equipamento para suplantar as necessidades específicas de cada tarefa.

Neste contexto, o trabalho realizado tende a suprir uma das lacunas tecnológicas existentes na automação da soldagem nacional. O equipamento desenvolvido não é um sistema robótico inédito no âmbito mundial, contudo é mais acessível, flexível e voltado para o mercado nacional. Quando analisadas as questões de custos, os equipamentos importados são cerca de quatro vezes mais caros que o TARTÍLOPE V4, isto sem considerar gastos posteriores com manutenção, treinamento e qualificação de pessoal para operação. Deste modo, o projeto gera facilidades para o aperfeiçoamento dos sistemas industriais, bem como para a estruturação de centros acadêmicos de pesquisa.

Adicionalmente, este trabalho servirá como base para futuras pesquisas no que tange à tecnologia da soldagem, seja na parte de desenvolvimento de novos processos ou em novos métodos para a automação da soldagem.

Quanto aos resultados na área da soldagem, é fundamental que haja aprimoramento nos procedimentos de união de dutos e no revestimento de tubos de parede de caldeiras de usinas termelétricas. A elaboração de métodos para a execução das referidas tarefas de maneira automatizada certamente repercutirá em redução de custos e tempo de construção ou manutenção nos referidos cenários. Conseqüentemente, o setor energético brasileiro terá grandes benefícios.

Além das diversas possibilidades de aplicação na indústria, o projeto do TARTÍLOPE V4 gerou também o aperfeiçoamento de recursos humanos, dado que envolveu bolsistas e engenheiros das áreas de mecânica, elétrica e automação industrial.

CAPÍTULO 6

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho gerou elevada quantidade de informações a respeito de diversos tópicos pertinentes à automação da soldagem, aplicada principalmente em operações de construção de linhas dutoviárias e revestimento de superfícies. Juntamente com os conhecimentos adquiridos criaram-se vertentes para futuras pesquisas, a saber:

- Desenvolvimento de *hardwares* e *softwares* que trabalhem paralelamente com o controlador CNC Mach3 e realizem a alteração de trajetória em tempo real;
- Aprimoramento da integração com *softwares* de CAD/CAM a fim de viabilizar o corte ou soldagem de peças com grande complexidade ou que sejam executadas em uma linha de produção seriada;
- Integração com processos específicos para a execução do passe de raiz, por exemplo o CCC, adicionalmente à elaboração de metodologias para a soldagem orbital MIG;
- Projeto de um sistema de *backing* interno para operar em conjunto com o TARTÍLOPE V4 na soldagem orbital e solucionar a problemática do alinhamento dos dutos;
- Aprimoramento no projeto do manipulador, principalmente na concepção do trilho de fixação, visando aumentar a agilidade para o revestimento de tubos de caldeira;
- Desenvolvimento de equipamentos e de metodologias para a soldagem PTAP fora de posição;
- Construção de uma mini tocha MIG para operação em conjunto com o robô em ambientes confinados;
- Desenvolvimento de um sistema AVC para a correção automática da DBCP usando a própria junta do TARTÍLOPE V4.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] SILVA, R. H. G. **Soldagem MIG/MAG em transferência metálica por curto-circuito controlado aplicado ao passe de raiz**. 2005. 113 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [2] THE FABRICATOR. **Stuck on SMAW?**. Disponível em: <http://www.thefabricator.com/ArcWelding/ArcWelding_Article.cfm?ID=1674>. Acesso em: 13 de novembro de 2008.
- [3] FELIPPE, L., DUTRA, J. C. **Desenvolvimento de tecnologias e de equipamentos para a recuperação por soldagem de tubos de parede de água de caldeira**. P&D ANEEL 0403-006/2005. 2008.
- [4] TRACTEBEL ENERGIA. **Tubos da caldeira 4 do Complexo Termelétrico Jorge Lacerda**. 2008.
- [5] SCIAVICCO, L., SICILIANO, B. **Modelling and controlo f robot manipulators**. London: Springer, 2004. 378 p.
- [6] MOTOMAN. **Motoman EA1400N arc weld robot**. Disponível em: <<http://www.motoman.com/products/robots/models/EA1400N.php>>. Acesso em: 09 de outubro de 2008.
- [7] LONE STAR AUTOMATED WELDING SYSTEMS. **Lone Star Automated Welding System – Operating Manual**. 2006, v. 4, 30 p.
- [8] POLYSOUDE. **POLYCAR MP “multi-process” open type carriage weld heads**. Disponível em: <http://www.polysoude.com/documents/english/POLYCAR-MP_EN.pdf>. Acesso em: 13 de novembro de 2008.

- [9] BUG-O SYSTEMS. **All position overlay system**. Disponível em: <<http://www.bugo.com/pdf/overlay%20system.pdf>>. Acesso em: 13 de novembro de 2008.
- [10] ROEHL, C., STANZEL, K. Improved pulsed arc welding nets higher productivity. **Welding Journal**, Miami, v. 87, n. 7, p. 38-41, Jul. 2008.
- [11] AWS. **Welding Handbook**. Miami: American Welding Society, v. 1, 2001.
- [12] DÍAZ, V. M. V. **Inovação do equipamento e avaliação do processo plasma de arco transferido alimentado com pó (PTAP) para a soldagem fora de posição**. 2005. 198 f.. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [13] OPUS. **Opus – Products**. Disponível em: <<http://www.opus-srl.it/product.htm>>. Acesso em: 22 de outubro de 2008.
- [14] YAPP, D., BLACKMAN, S. A. Recent developments in high productivity pipeline. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. XXVI, n. 1, p. 89-97, Jan./Mar. 2004.
- [15] DUTRA, J. C., SILVA, R. G. MIG/MAG – Transferência metálica por curto-circuito sob controle da forma de onda da corrente – sistemas CCC e STT – fundamentos. **Revista Soldagem e Inspeção**, v. 13, n.2, p. 92-96, Abr./Jun. 2008.
- [16] DERUNTZ, B., D. Assessing the benefits of Surface Tension Transfer® welding to industry. **Journal of Industrial Technology**, v. 19, n. 4, p. 2-8, Aug./Oct. 2003.
- [17] STAVA, E. K., NICHOLSON, P. **New technology speeds oil sands pipe welding**. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/content/oilsands.asp>>. Acesso em: 23 de outubro de 2008.

- [18] STAVA, E. K. **Technology gets to the root of pipe welding**. Disponível em: <<http://www.lincolnelectric.com/knowledge/articles/content/pipewelding.asp>>. Acesso em: 25 de outubro de 2008.
- [19] LAI, G., STAMPER, D., JIRINEC, M., HULSIZER, P. Use of pulse spray gás metal arc weld overlay technology for boiler tube protection against corrosion and erosion. **Proceedings: Thrid International Conference on Boiler Tube Failures in Fossil Plants**, Nashville, TR-109938, p. 340-353.
- [20] RIBAS, F. **Depoimento sobre o desenvolvimento de tecnologias para a recuperação por soldagem de regiões cavitadas de turbinas hidráulicas**. Disponível em: <<http://www.labsolda.ufsc.br/reconhecimento/depoimentos.php>>. Acesso em: 27 de outubro de 2008.
- [21] DUTRA, J. C. Sistema e processo de soldagem vencendo a erosão das turbinas hidráulicas de grande porte. **Energia para o MERCOSUL: Edição 2004 do Prêmio MERCOSUL de Ciência e Tecnologia**, Brasília, p. 101-113, Ago. 2005.
- [22] BARRA, S. R. **Influência do processo MIG/MAG térmico sobre a microestrutura e a geometria da zona fundida**. 2003. 219 f.. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [23] GOHR JR., R. **Novos métodos de controle da soldagem MIG/MAG**. 2002. 150 f.. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [24] DEUIS, R. L., YELLUP, J. M., SUBRAMANIAN, C. Metal matriz composite coatings by PTA surfacing. **Composites Science and Technology**, Elsevier, v. 58, n. 2, p. 299-309, 1998.
- [25] BELKACEM, B., AIT-MEKIDECHE, A., GEBERT, A., WOCIKA, D., CLAUSTHAL, Z. Utilisation of high-temperature plasma containing nitrogen for

reactive coating by means of plasma-arc weld surfacing. **Welding Research Abroad**, New York, v. 48, n. 3, 2002.

[26] KLAFTER, R.D., CHMIELEWSKI, T. A., NEGIN, M. **Robotic engineering – an integrated approach**. Englewoor Cliffs: Prentice Hall, 1989. 744 p.

[27] UNECE – United Nations Economic Commission for Europe. **Solid recovery of Sales and production of industrial robots en Germany – the world’s second largest user and producer of industrial robots**. Disponível em: <http://www.unece.org/press/pr2004/04stat_p03e.pdf>. Acesso em: 28 de outubro de 2008.

[28] BRACARENSE, A. Q., FELIZARDO, I. Soldagem robotizada. **Mecatrônica Atual**, Tatuapé, v. 4, p. 26-30, Ago/Set. 2007.

[29] MARQUES, P. V., MODENESI, P. J., BRACARENSE, A. Q. **Soldagem – Fundamentos e tecnologias**. Belo Horizonte: UFMG, 2005. 362 p.

[30] PIRES, J. N., LOUREIRO, A., BOLMSJÖ, G. **Welding robots: technology, system issues and applications**. London: Springer, 2006. 180 p.

[31] BROERING, C. E. **Desenvolvimento de sistemas para a automatização da soldagem e do corte térmico**. 2005. 112 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[32] BUG-O SYSTEMS. **GO-FER III**. Disponível em: <<http://www.bugo.com/pdf/gofbroc.pdf>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2008.

[33] FILHO, A. R. C. **Desenvolvimento de um sistema de seguimento de junta que utiliza o próprio arco como sensor**. 2003. 102 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

[34] DUTRA, J. C. **Equipamento para soldagem automática com um grau de liberdade para superfícies planas – TARTÍLOPE V1**. Disponível em:

<http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v1.php>.
Acesso em: 29 de outubro de 2008.

[35] DUTRA, J. C. **Equipamento para soldagem automática com dois graus de liberdade para superfícies planas – TARTÍLOPE V2**. Disponível em: <http://www.labsolda.ufsc.br/projetos/projetos_viabilizados/tartilope_v2.php>.
Acesso em: 29 de outubro de 2008.

[36] BONACORSO, N. G., NOLL, V., GEVAERD, B. M. Desenvolvimento de um drive didático para acionamento de motores de passo aplicados ao ensino de eletrônica e mecatrônica. **Revista Eletrônica de Potência**, v. 13, n. 2, p. 117-123, Mai. 2008.

[37] PARKER AUTOMATION. **Tecnologia eletromecânica – apostila 1600.231.01**. Jacareí, 2003. 60 p.

[38] MARQUES, M. **Características eletro-mecânicas das máquinas**. Disponível em: <http://www.umc.br/~mmarques/umc_2004/cam/motor_2004.pdf>.
Acesso em: 30 de novembro de 2008.

[39] NATIONAL INSTRUMENTS. **NI 734x**. Disponível em: <<http://www.ni.com/pdf/products/us/4mo636-637.pdf>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2008.

[40] GALIL MOTION CONTROL. **DMC-18x2 series**. Disponível em: <<http://www.galilmc.com/catalog/cat18xx.pdf>>. Acesso em: 10 de dezembro de 2008.

[41] SMID, P. **CNC programming handbook**. 3. ed. New York: Industrial Press, 2007. 600 p.

[42] SUH, S. H., KANG, S. K., CHUNG, D. H., STROUND, I. **Theory and design of CNC systems**. London: Springer, 2008. 455 p.

- [43] MADISON, J. **CNC machining handbook: basic theory, production data, and machining procedures**. New York: Industrial Press, 1996. 396 p.
- [44] CARKEN CO. **DeskCNC setup & operating manual**. Disponível em: <<http://www.deskcnc.com/DeskCNCManual.pdf>>. Acesso em: 03 de novembro de 2008.
- [45] ART SOFT. **Using Mach3 Mill**. Disponível em: <http://www.machsupport.com/documentation/M3M1_84-A2.pdf>. Acesso em: 03 de novembro de 2008.
- [46] ZHEJIANG YUEJIAN MACHINERY MANUFACTURE CO. **Magnetic pipe cutting machine**. Disponível em: <http://yuejian.en.alibaba.com/product/50110493/50500852/Gas_Cutting_Machines/Magnetic_Pipe_Cutting_Machine/showimg.html>. Acesso em: 10 de novembro de 2008.
- [47] TERZIAN, R. L. **Conceitos e metodologias de gestão de projeto e sua aplicação ao caso da integridade da malha dutoviária**. 2005. 138 f.. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro.
- [48] CUHEL, J. GMAW options offer increased productivity for pipe FAB shops. **Welding Journal**, Miami, v. 87, n. 6, p. 66-68, Jun. 2008.
- [49] CUHEL, J. Modifief GMAW for root passes. **The Tube & Pipe Journal**, Rockford, Apr. 2008.
- [50] PRO-FUSION. **How to analyze a welding application for automation**. Disponível em: <<http://www.pro-fusiononline.com/welding/automation.htm>>. Acesso em: 30 de outubro de 2008.
- [51] KARDEC, A., NASCIF, J. **Manutenção – Função estratégica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 1998. 368 p.

[52] CARVALHO, R. S., DUTRA, J. C., BONACORSO, N. G. Desenvolvimento de um manipulador CNC robótico para a recuperação por soldagem dos tubos das caldeiras de termelétricas. 63º Congresso Anual da ABM. 2008. Santos. **Anais**. 2003. CD.

[53] CARVALHO, R. S., DUTRA, J. C., BONACORSO, N. G. Implementação de controlador CNC de baixo custo em manipulador robótico para a soldagem. CONEM. 2008. Salvador. **Anais**. 2008. CD.

[54] CARVALHO, R. S., DUTRA, J. C., BONACORSO, N. G. Desenvolvimento de um manipulador robótico para a soldagem orbital. Rio OIL & GAS. 2008. Rio de Janeiro. **Anais**. 2008. CD.

[55] CARVALHO, R. S., DUTRA, J. C., BONACORSO, N. G. Desenvolvimento de um manipulador robótico CNC para a soldagem. International Congress – 2nd Latin American Welding Congress – XXXIV CONSOLDA. 2008. São Paulo. **Anais**. 2008. CD.

ANEXO A – Parametrização dos Servo Drivers da Família R20x0

A determinação do compensador PID dos quatro servo acionamentos do TARTÍLOPE V4 seguiu a mesma metodologia, a qual buscou encontrar os valores dos ganhos (proporcional, derivativo e integral) que proporcionassem resposta rápida, mínimo sobre-sinal, erro de regime nulo, para uma função degrau como entrada de referência. A fim de explicar o procedimento aplicado, a seguir é apresentado o roteiro de parametrização do servo acionamento da junta prismática Y. Na operação de ajuste dos parâmetros do compensador PID, é fundamental que o manipulador esteja completamente montado e com carregamento nominal, ou seja, com a tocha de soldagem fixada na junta rotacional A. Não realizar o referido procedimento pode cominar em um compensador PID que não proporcione a adequada resposta em situações reais de operação.

Para a parametrização, dos servo *drivers* R2010, foi utilizado o *software* R2xTune (rev 080115), o qual é disponibilizado pela empresa Rutex, a mesma fabricante dos servo *drivers*. A Figura A.8-1 apresenta a tela do *software* utilizada para a configuração de parâmetros, tanto das características do servo motor quanto dos ganhos PID.

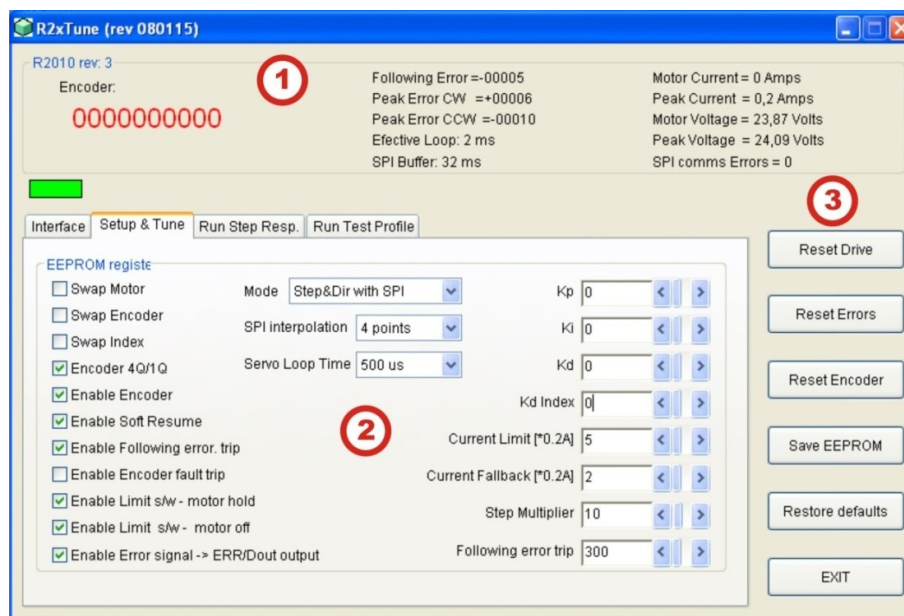


Figura A.8-1 – Tela principal de programação do compensador PID

Na região 1, tem-se informações gerais atualizadas a respeito do *driver*. Dentre estas se destacam:

- *Encoder*: indica o deslocamento efetuado pelo eixo do servo motor;
- *Following Error*: mostra o erro de posição do sistema;
- *Peak Error CW*: erro máximo de posicionamento no sentido horário;
- *Peak Error CCW*: erro máximo de posicionamento no sentido anti-horário;
- *Motor Current*: corrente instantânea fornecida ao servo motor;
- *Peak Current*: corrente máxima que foi fornecida ao servo motor;
- *Motor Voltage*: tensão instantânea fornecida ao servo motor;
- *Peak Voltage*: tensão máxima que foi fornecida ao servo motor.

Os itens da região 2, registros da EEPROM do servo *driver*, são parametrizados de acordo com o servo motor empregado. As principais variáveis a serem configuradas são:

- *Swap Motor* e *Swap Encoder*: estas opções são utilizadas para inverter respectivamente a polaridade aplicada ao servo motor e o sentido da contagem de pulsos fornecido pelo encoder. O objetivo da aplicação destes recursos de programação é estabelecer uma realimentação negativa ao controle de posição, evitando com isto, alterações nas ligações elétricas do servo acionamento;

- *Enable Encoder* e *Enable Encoder 4Q/1Q*: a primeira opção habilita o uso do *encoder* para a operação em malha fechada, enquanto que na segunda o programador escolhe se deseja trabalhar com o *encoder* em modo normal ou em quadratura. Operando em modo de quadratura a resolução do *encoder* é dividida por quatro. Por exemplo, um *encoder* de 500 linhas em modo normal necessita de 500 pulsos de comando para efetuar uma rotação, contudo se o mesmo *encoder* estiver em modo de quadratura passa a ser necessário 2000 pulsos de comando para a execução de uma rotação;

- *Following Error Trip*: determina o valor do erro máximo de seguimento tolerado pelo sistema de controle de posicionamento.

- *Enable Following Error Trip*: habilita o erro de seguimento, o qual inibi o servo *driver* quando o módulo do erro de posicionamento ultrapassar o erro máximo de seguimento. Esta opção deve ser ativada somente ao final da parametrização;
- *Current Limit* e *Current Fallback*: a *Current Limit* é a corrente máxima suportada pelo servo motor. Quando o sistema permanece nesta corrente por 2 s o servo *driver* automaticamente reduz a corrente limite para a *Current Fallback*, com o intuito de evitar que o motor seja danificado. Esta segunda corrente deve ser ajustada na ordem de 30 a 50% da corrente limite;
- *Enable Error Signal – ERR/Dout Output*: torna ativo o sinal de erro do servo *driver*. Caso haja algum erro de seguimento ou sobrecorrente, é gerado um sinal de proteção. Este, por sua vez, foi usado para inibir o funcionamento do TARTÍLOPE V4, a fim de proporcionar maior segurança;
- *Kp, Ki, Kd* e *Kd Index*: campos para o ajuste dos ganhos proporcional, integral, derivativo e multiplicador de ganho derivativo respectivamente;
- *Step Multiplier*: multiplicador dos pulsos de comando. Por exemplo, se o *Step Multiplier* for ajustado com o valor 10, quando for enviado 5 pulsos de comando ao servo *driver* o servo motor será deslocado 50 pulsos de seu respectivo *encoder*. Esta é uma funcionalidade importante, posto que certas unidades de comando não possuem capacidade de fornecer pulsos em frequência elevada, resultando numa diminuição da faixa de velocidade do servo motor. Desta forma, pode-se solucionar tal problema com a multiplicação dos pulsos de comando;

Por fim, na região 3 estão as opções para o reset do *driver*, dos erros de posicionamento e do *encoder*, além dos campos para salvar os parâmetros ajustados ou restabelecer os valores padrões do servo *driver*.

Basicamente a determinação dos parâmetros PID no servo *driver* R2010 pode ser dividido em quatro etapas. A primeira é analisar os dados técnicos do servo motor empregado e preencher os campos pertinentes as suas características elétricas. Feito isto, estas variáveis devem ser salvas. Na segunda etapa, o ganho K_p deve ser incrementado lentamente e em seguida deve-se analisar a respectiva resposta, posição versus tempo, para a entrada de referência em degrau.

O valor ideal para o ganho K_p , Figura A.8-2, é aquele que faz com que a dinâmica do sistema apresente uma resposta oscilatória para a entrada ao degrau.

Observando o gráfico da Figura A.8-3, fica evidente o caráter oscilatório da resposta do sistema. Na mesma figura pode-se verificar que a função degrau possui amplitude de 2000 pulsos, entretanto o *encoder* detectou 2015 pulsos. Isto comprova que há um erro de regime, o que não é desejado para um sistema robótico. No final desta etapa o parâmetro K_p é salvo.

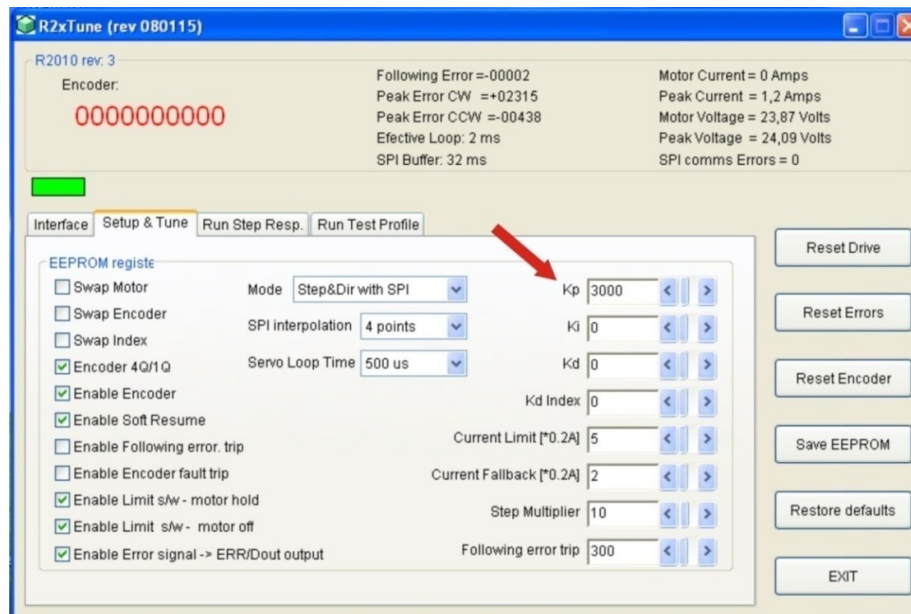


Figura A.8-2 – Ajuste do ganho proporcional K_p

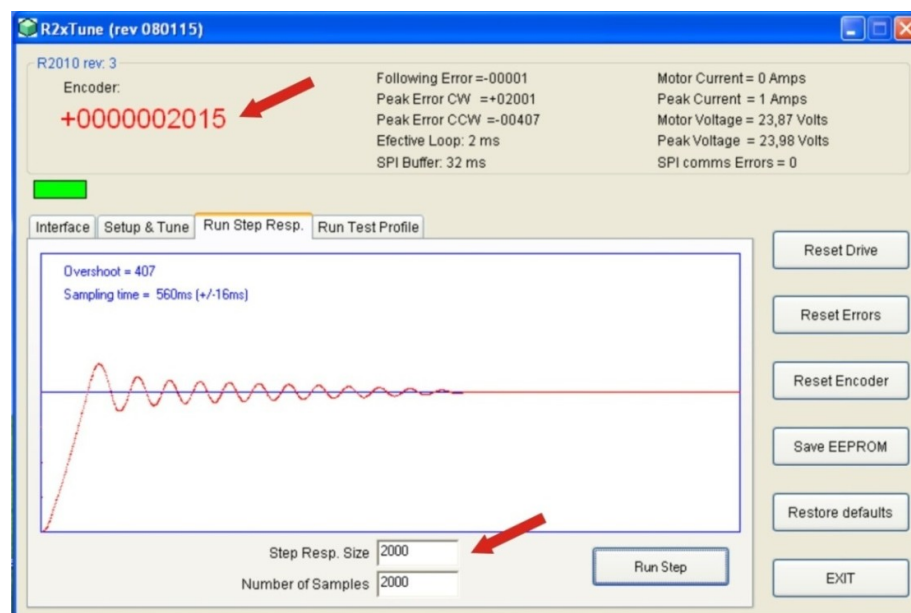


Figura A.8-3 – Resposta ao degrau com compensador do tipo proporcional

Como terceiro passo na programação do controlador PID, o ganho Kd e seu multiplicador Kd índex são gradativamente incrementados, sendo que a cada incremento a resposta ao degrau tem que ser analisada. Considera-se que o valor de Kd e Kd índex, Figura A.8-4, é ideal quando combinado com o ganho Kp, proporcione uma resposta ao degrau sem oscilação ou sobre-sinal, Figura A.8-5.

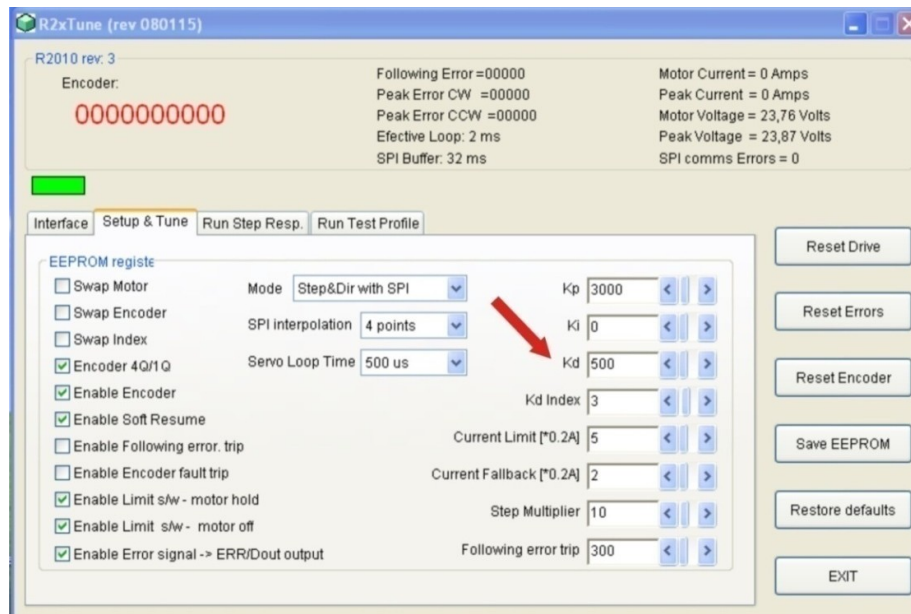


Figura A.8-4 – Ajuste do ganho derivativo Kd e Kd index

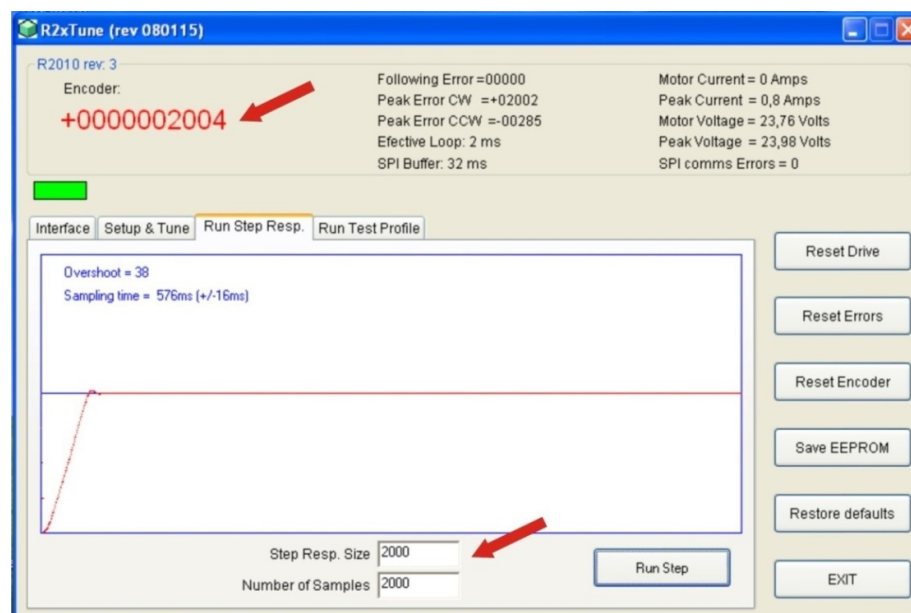


Figura A.8-5 – Resposta ao degrau com do tipo proporcional derivativo

Ainda observando a Figura A.8-5, nota-se que o erro em regime diminuiu significativamente. Agora para os mesmos 2000 pulsos comandados, o *encoder* detectou 2004 pulsos. Isto mostra que houve melhora na resposta, proporcionado pelo compensador em implantação. Os dados devem ser salvos.

Na quarta e última etapa se ajusta o ganho Ki. Da mesma forma que na determinação dos outros ganhos, o Ki é incrementado lentamente e a cada elevação em seu valor, o gráfico da resposta ao degrau deve ser observado. O valor mais adequado para o ganho Ki, Figura A.8-6, é aquele que juntamente com os valores de ganho Kp, Kd e Kd índice, gera uma resposta ao degrau com o menor tempo de subida possível, desde que não haja um sobre-sinal maior que o limitado para a tarefa que o manipulador é destinado. A Figura A.8-7 ilustra a resposta ao degrau para uma entrada de 2000 pulsos, sendo que o *encoder* detectou 2000 pulsos. Assim, nota-se que o sistema não apresentou erro em regime, além de possuir elevada velocidade de resposta e pequeno tempo de acomodação.

Por fim, se habilita a opção *Enable Following Error Trip*, salva os parâmetros e o servo *driver* está pronto para ser utilizado.

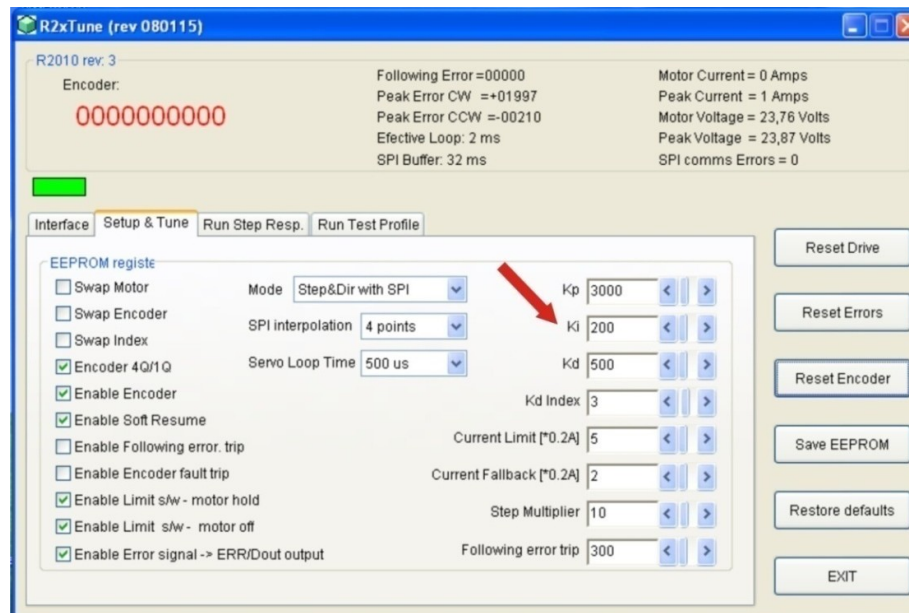


Figura A.8-6 – Ajuste do ganho integral Ki

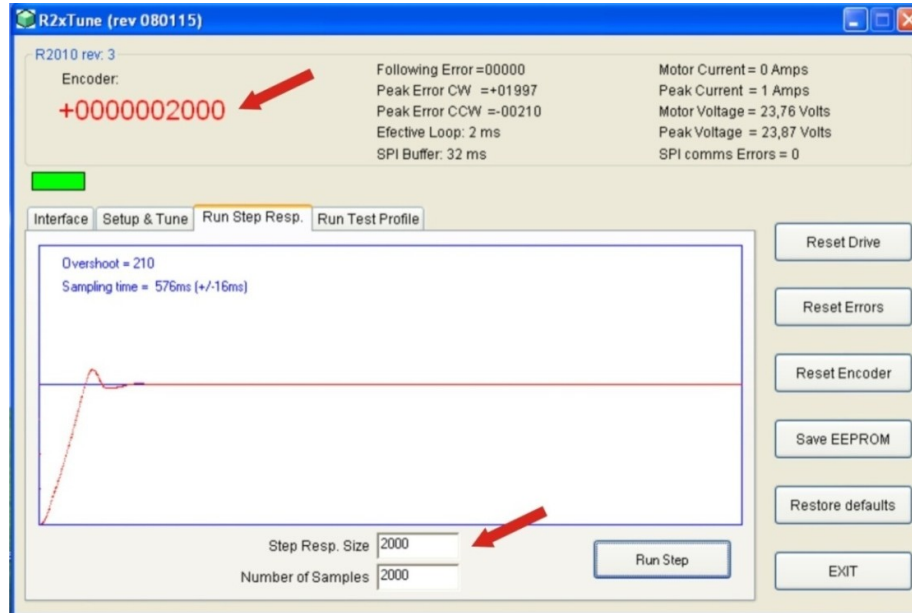


Figura A.8-7 – Resposta ao degrau com compensador do tipo PID

ANEXO B – Principais Funções do Código G Usadas na Soldagem

A linguagem em código G é amplamente difundida no meio das máquinas de fresamento e torneamento CNC. Nesta programação, o operador determina as coordenadas e as velocidades desejadas entre os pontos de uma trajetória. Quando destinada a tarefas de usinagem, esta linguagem apresenta vasta quantidade de código e funções específicas (47). Contudo, para a soldagem são empregados primordialmente os códigos voltados ao controle de movimento. Desta forma, o presente capítulo apresenta as principais funções desta linguagem necessárias para a programação do TARTÍLOPE V4, a saber:

- G0 – Deslocamento linear rápido: o equipamento efetua o percurso entre dois pontos com a velocidade máxima ajustada nas configurações do controlador CNC Mach3;
- G1 – Deslocamento linear com velocidade determinada: realiza a mesma forma de deslocamento do G0, entretanto com a velocidade estipulada pelo operador;
- G2 e G3 – Deslocamento em arco: com o uso destas funções o operador determina dois pontos e um raio de curvatura entre eles, conseqüentemente o movimento descreverá um arco. A função G2 é relativa a deslocamentos em sentido horário e a G3 em anti-horário;
- G4 – Habilita tempo de espera: com esta função o usuário tem a possibilidade de introduzir um tempo de espera na execução do programa. No caso da soldagem é utilizado para garantir que o arco elétrico fique estável antes que o deslocamento seja iniciado;
- G20 e G21 – Unidade de medição: seleção da unidade de medição em que o sistema irá operar. G20 corresponde a polegadas e G21 a milímetros;
- G90 e G91 – Modo de trabalho: determinação de operação de deslocamento em modo absoluto, G90, ou incremental, G91.

Juntamente com as funções supracitadas, existem códigos auxiliares empregados para a elaboração de rotinas mais complexas e acionamento de periféricos, dentre os quais se destacam:

- M3 – Habilita eixo árvore: usado, em fresadoras, para ligar o eixo árvore no sentido horário. No caso do manipulador para soldagem, este sinal é empregado para o disparo da fonte de soldagem;
- M5 – Desabilita eixo árvore: no caso do TARTÍLOPE V4, inibi a fonte de soldagem;
- M7 e M8 – Controle de dispositivos de auxiliares: sinais digitais de saída que podem ser usados para controlar periféricos de soldagem;
- M30 – Final do programa: indica o término do programa;
- M98 – Chamada de sub-rotina: para facilitar a execução da mesma trajetória diversas vezes, esta deve ser programada como uma sub-rotina. Desta modo, para realizá-la deve-se utilizar o M98, bem como seu nome;
- M99 – Retorno de sub-rotina: indica o final da sub-rotina e retorna ao programa principal;
- O – Identificador de sub-rotina: nome da sub-rotina;
- L – Contador: indica o número de vezes que uma sub-rotina será realizada;
- N – Número de linha: apresenta a linha do código G em execução;
- F – Velocidade de deslocamento da ferramenta: determina a velocidade de deslocamento da ferramenta quando utilizada a função G1, G2 ou G3;
- P – Tempo de espera: corresponde ao tempo de espera, em segundos, habilitado pela função G4.

Para facilitar o entendimento das funções utilizadas, é apresentado a seguir um exemplo de código G para a operação de soldagem, Figura B.9-1. Ao ser inicializado o programa determina na linha N10 que irá operar em milímetros e em modo de deslocamento absoluto. Em N20 chama a sub-rotina denominada de 10 e diz que esta será realizada três vezes. N40 define a posição da sub-rotina 10. Em N50 a tocha de soldagem é deslocada com velocidade máxima para uma posição de segurança, onde não há risco de colisão com a peça, Figura B.9-2(a). A seguir em N60 a tocha segue para a posição inicial de soldagem, ainda com velocidade máxima, Figura B.9-2(b). Agora a fonte de soldagem é habilitada na linha N70 e o arco elétrico estabelecido conforme mostra a Figura B.9-3(a). O robô permanece neste ponto por 5 s antes de iniciar o deslocamento, em virtude da programação

encontrada em N80. Em N90 o manipulador efetua o deslocamento linear de 120 mm pelo trecho 1 com velocidade de 25 cm/min, Figura B.9-3(b).

Na alteração do trecho 1 para o trecho 2, o sistema realiza uma interpolação das juntas X e Y em forma de arco no sentido anti-horário e com um raio de 30 mm, como pode ser observado na linha N100, Figura B.9-4(a). Até o final do trecho 2 a trajetória de 130 mm na junta Y, conforme N110, ocorre com a mesma velocidade de 25 cm/min, Figura B.9-4(b). Na mudança do trecho 2 para o trecho 3, o equipamento faz novamente uma interpolação das juntas X e Y em forma de arco com raio de 30 mm, contudo agora em sentido horário, como pode ser visualizado na linha N120, Figura B.9-5(a). Até o fim do trecho 3 a trajetória de 180 mm na junta X, de acordo com N130, será com velocidade de 25 cm/min, Figura B.9-5(b). Ao término do trecho 3, o manipulador desabilita a fonte de soldagem, N140, e espera novamente 5 s, N150, Figura B.9-6(a). A seguir, o programa deixa a sub-rotina, N160, retornando ao principal, para a execução de mais duas vezes a sub-rotina descrita, Figura B.9-6(b). Por fim, o programa é finalizado em N30.

N10 G21 G90	<u>Comentários</u>
N20 M98 P10 L3	(Rotina Principal)
N30 M30	
N40 O10	(Sub-rotina de Soldagem)
N50 G0 X20 Y40 Z10	
N60 G0 X0 Y0 Z0	
N70 M3	
N80 G4 P5	
N90 G1 X120 F250	
N100 G3 X150 Y30 R30	
N110 G1 Y130	
N120 G2 X180 Y160 R30	
N130 G1 X300	
N140 M5	
N150 G4 P5	

Figura B.9-1 – Exemplo de código G

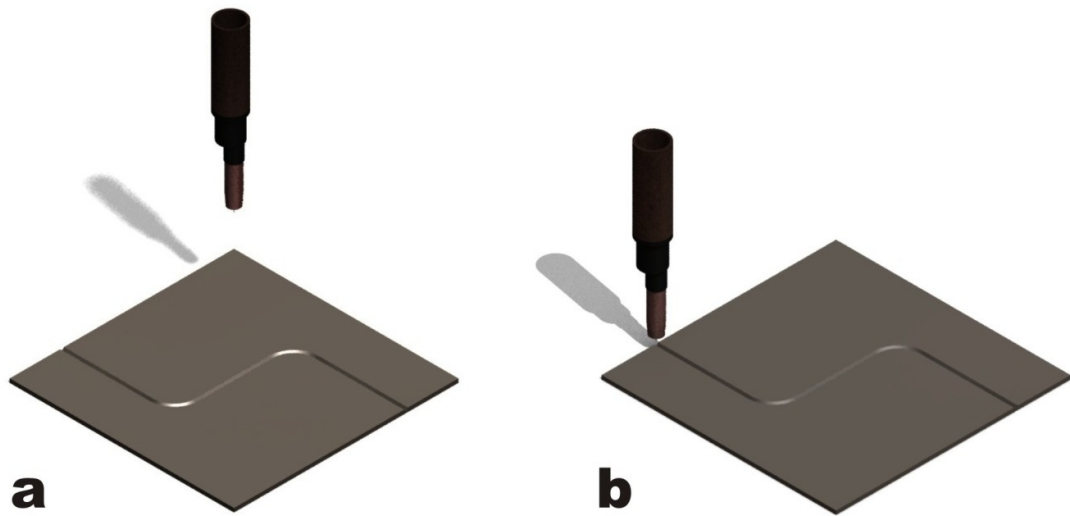


Figura B.9-2 – Posicionamento da tocha

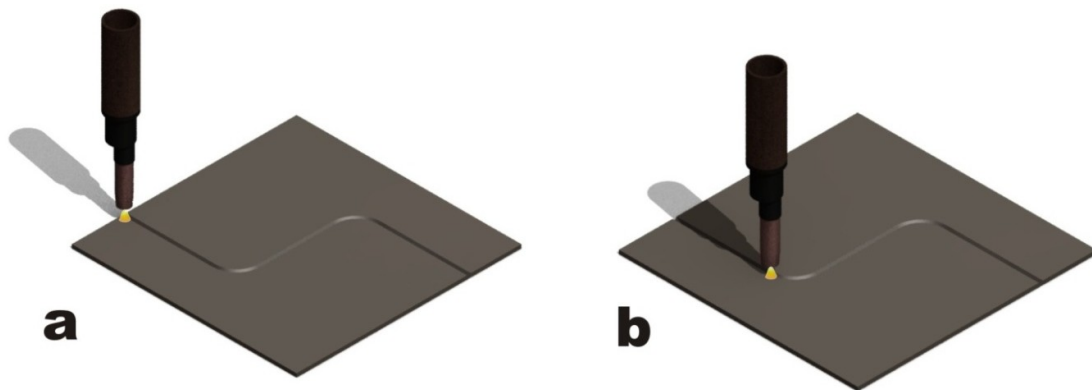


Figura B.9-3 – Soldagem no trecho 1

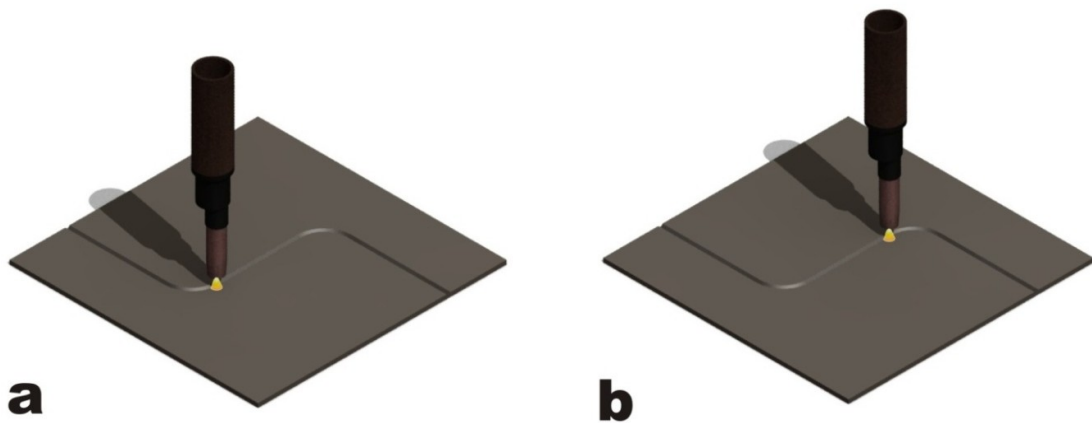


Figura B.9-4 – Soldagem no trecho 2

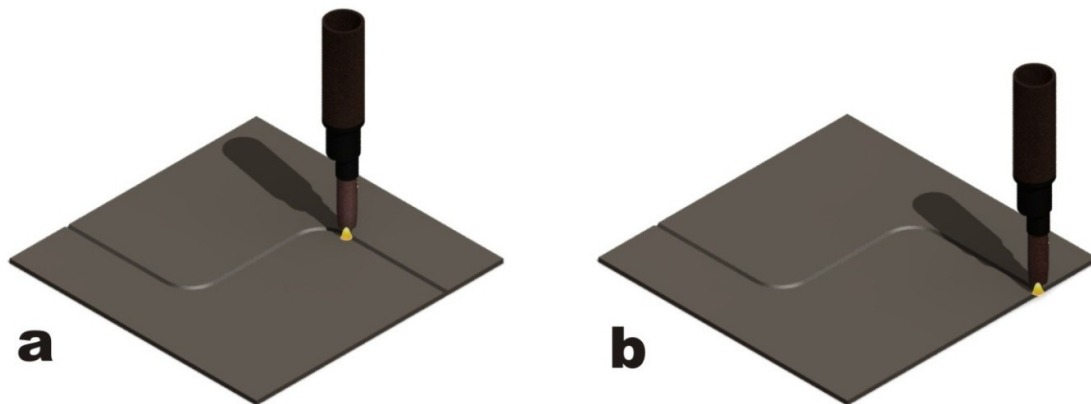


Figura B.9-5 – Soldagem no trecho 3

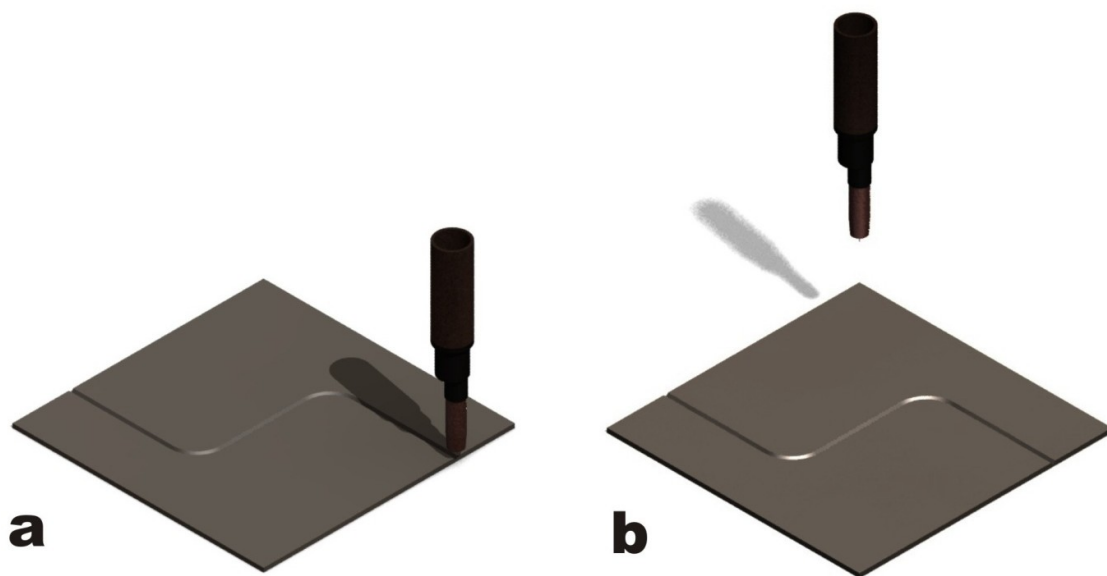


Figura B.9-6 – Reposicionamento para próximo cordão