

Guilherme de Santana Weizenmann

**DESENVOLVIMENTO DE INFRA-ESTRUTURA PARA O
ESTUDO DOS EFEITOS DA OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DA
TOCHA DE SOLDAGEM (SWITCH BACK) E AVALIAÇÃO DE
DESEMPENHO NO PROCESSO TIG AUTÓGENO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Mecânica
Orientador: Prof. Dr. Jair Carlos Dutra
Coorientador: Prof. Dr. Nelso Gauze
Bonacorso

Florianópolis
2015

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

Weizenmann, Guilherme de Santana

Desenvolvimento de Infra-Estrutura para o Estudo dos Efeitos da Oscilação Longitudinal da Tocha de Soldagem (Switch Back) e Avaliação de Desempenho no Processo TIG Autógeno / Guilherme de Santana Weizenmann ; orientador, Jair Carlos Dutra ; coorientador, Nelso Gauze Bonacorso. – Florianópolis, SC, 2015.

80 p.

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

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Oscilação longitudinal. 3. TIG. 4. Retrofitting. 5. Soldagem Robotizada. I. Dutra, Jair Carlos. II Bonacorso, Nelso Gauze. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título

Guilherme de Santana Weizenmann

DESENVOLVIMENTO DE INFRA-ESTRUTURA PARA O ESTUDO DOS EFEITOS DA OSCILAÇÃO LONGITUDINAL DA TOCHA DE SOLDAGEM (SWITCH BACK) E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO NO PROCESSO TIG AUTÓGENO

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

Florianópolis, 11 de Setembro de 2015.

Armando Albertazzi Gonçalves Jr., Prof. Dr. - Coordenador do Curso

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

Nelso Gauze Bonacorso, Prof. Dr. - Coorientador
Instituto Federal de Santa Catarina

Banca Examinadora:

Régis Henrique Gonçalves e Silva, Prof. Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

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

Jesualdo Pereira Farias, Prof. Dr.
Universidade Federal do Ceará

Moisés Alves de Oliveira, Dr.
Whirlpool

Raul Gohr Júnior, Dr.
IMC Soldagem

Este trabalho é dedicado aos meus pais
e meus avós.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos que contribuíram direta ou indiretamente a este trabalho, em especial:

Nelso Gauze Bonacorso, por todos os anos de amizade e orientação, desde a graduação, sendo um dos principais responsáveis por tornar o presente trabalho possível e exemplo de dedicação à docência e à pesquisa;

Jair Carlos Dutra, pela oportunidade de fazer parte da equipe do LABSOLDA e pelo exemplo de dedicação em tornar o ensino uma ferramenta de desenvolvimento além do meio acadêmico;

À equipe de eletrônica e programação do laboratório: Fernando Costenaro da Silva, Ricardo Campagnin, Alberto Bonamigo Viviani, Felipe Kalil Mendonça e Miguel Mannes Hillesheim, pelo apoio no desenvolvimento eletro-eletrônico e da manutenção do projeto;

Ao coordenador de P&D do LABSOLDA, Cléber Marques, pelo apoio e atenção em suprir as necessidades do presente projeto e do restante do laboratório;

Aos estagiários: Natália Wendt Dreveck, Danilo Varasquim Ribeiro e Rafael Gomes Nunes Silva, pelo auxílio no trabalho desenvolvido;

À toda equipe de graduandos, mestrandos, doutorandos, funcionários e parceiros do LABSOLDA, que de alguma forma contribuíram, mesmo que somente com momentos de descontração e amizade;

À toda a minha família por me apoiar e compreender a atenção que o projeto necessitou em detrimento deles;

À Agência Nacional do Petróleo e Gás (ANP) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (POSMEC) pelo apoio financeiro.

“Se enxerguei mais longe, foi por estar sobre o ombro de gigantes”

(Isaac Newton, 1675)

RESUMO

A produção industrial está em contínua exigência por processos cada vez mais produtivos. No caso da soldagem este aumento de produtividade, não necessariamente é alcançado por meio de novos processos, mas frequentemente pela implementação de técnicas especiais nos processos considerados tradicionais. Estas técnicas, não só consideram atuação na forma de controle da energia de soldagem e atuação na tecnologia das tochas de soldagem, mas também se baseiam muito na atuação na trajetória de soldagem. Este trabalho atua neste último flanco, buscando condições de infraestrutura para estudar o efeito de um tipo de trajetória denominada de movimento de *switch back*. Esta consiste em oscilar a tocha na direção longitudinal do cordão de solda, via os movimentos de avanço e de retrocesso. Como o Laboratório de Soldagem da UFSC (LABSOLDA) não possuía equipamentos que realizassem tal movimento, uma vez que os robôs industriais presentes no laboratório também não possuem esta capacitação, o presente trabalho se propõe a criar esta infraestrutura de desenvolvimento. No caso em questão, foi realizado o *retrofitting* de um antigo robô antropomórfico industrial, RV-15 fabricado em 1987 pela Reis Robotics, o readequando eletronicamente e desenvolvendo um novo controlador de movimento "*open source*", que permite a geração simplificada de trajetórias de oscilação diferenciadas, sincronizadas com sinais para a fonte de soldagem. O trabalho realizado no robô demonstrou ser eficaz e permitiu um estudo confiável do processo TIG autógeno com o movimento de *switch back*. Os ensaios revelaram que tal oscilação mostra-se como uma alternativa para a diminuição de defeitos de descontinuidade.

Palavras-chave: Oscilação longitudinal, TIG, *Retrofitting*. Soldagem robotizada. Trajetória de soldagem.

ABSTRACT

Industrial production is in continuous demand for more productive processes. When it comes to welding this increase in productivity is not necessarily achieved through new processes, but often by implementation of special techniques in traditional processes. These techniques not only consider to act in the form of welding power control and in the welding torches technology, but also rely heavily on acting in the welding path. This work focuses on building infrastructure conditions to study the effect of a path type, known as switch back motion. This consists in oscillating the torch in the longitudinal direction of the weld bead, via forward and backward movements. As the UFSC Welding Laboratory (LABSOLDA) did not have an equipment to perform such movement, since available industrial robots are not also able to, this paper proposes to create this development infrastructure. In this case, a retrofitting of an old industrial anthropomorphic robot RV-15 manufactured in 1987 by Reis Robotics was performed, adapting it electronically and developing a new "open source" motion controller, which enables simplified generation of differentiated oscillation trajectories synchronized with signals to the welding source. The work on the robot has proved to be effective and allowed a reliable study of autogenous TIG process with the switch back movement. The tests revealed that this oscillation is shown as an alternative for reducing discontinuity defects.

Keywords: switch back. TIG. Retrofitting. Robot Welding. Welding trajectories

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Oscilação <i>switch back</i> com sincronismo	24
Figura 2 – Velocidade x Corrente de soldagem e seus respectivos defeitos [7]	27
Figura 3 – Exemplo de <i>humping</i> em soldagem TIG [2].....	28
Figura 4 - Esquema mostrando a formação da cratera na poça de fusão no processo TIG[2].....	28
Figura 5- Zona de atuação da robótica industrial [10]	30
Figura 6- Robô antropomórfico Motoman MA1400.....	31
Figura 7- Manipulador de solda Tartilope V2F desenvolvido especialmente para soldagem orbital de tubos	31
Figura 8 – Braço antropomórfico com punho esférico com as juntas posicionadas por Denavit-Hartenberg [12].....	32
Figura 9 – Oscilação triangular em soldagem [15]	33
Figura 10 – Oscilação <i>switch back</i> [17]	34
Figura 11 – Sincronização da corrente com a oscilação transversal em (a) e a oscilação <i>switch back</i> com variação da velocidade em (b) [21].	35
Figura 12–Oscilação triangular com sincronização da polaridade com o movimento [23].	36
Figura 13 - Distribuição de temperatura quando o tamanho da poça atinge o tamanho máximo.	37
Figura 14- Fotos retiradas em maio de 2013 demonstrando a situação precária do robô: braço robótico (a), painel eletroeletrônico (b) e base do braço robótico (c)	39
Figura 15 - Diagrama de blocos do sistema	41
Figura 16 - Funcionamento da transmissão serial síncrona [27].....	41
Figura 17- Antigo driver analógico (a) e o novo driver adquirido (b)	42
Figura 18 - Resposta em velocidade do servo motor do eixo 6 com um PWM de 20 kHz e razão cíclica de 50%.....	43
Figura 19 - Resposta em velocidade do servo motor do eixo 6 em série com indutor de 5 mH com um PWM de 20 kHz com razão cíclica de 50%	44
Figura 20 - Placa de interface: entradas e saídas isoladas (a), conexão para os drivers (b), conexão para a porta paralela (c) e intertravamento (d)....	45
Figura 21 - Circuito lógico de potência (a) e intertravamento (b).....	46
Figura 22 - Gabinete eletro-eletrônico modelado no <i>SolidWorks</i> (a) e gabinete após o <i>retrofitting</i> (b).....	47
Figura 23 - Fluxograma básico do programa de operação do robô	49
Figura 24 - Arquivo *.txt com duas posições salvas	50
Figura 25 - Tela do programa de operação.....	50
Figura 26 - Perfil de posição, velocidade e aceleração de uma trajetória cicloidial [30].....	52
Figura 27 - Software de aquisição desenvolvido.....	53

Figura 28 - Sistema de medição montado no robô Reis-RV 15	54
Figura 29 - Medição do deslocamento linear e <i>switch back</i> com linha média	55
Figura 30 - Oscilogramas de corrente e tensão pulsadas	56
Figura 31 - Trajetória <i>switch back</i> programada com 20 cm/min (3,33 mm/s) resultantes no Motoman HP-20	57
Figura 32 – Bancada montada utilizada para os ensaios	58
Figura 33 - cordões soldados com deslocamento linear	59
Figura 34 - Cordões de solda com <i>switch back</i> pulsado de acordo com a Tabela 5	60
Figura 35 - Cordões de solda com <i>switch back</i> pulsado de acordo com a Tabela 6	61
Figura 36 - Cordões de solda com <i>switch back</i> de acordo com a Tabela 8	62
Figura 37 - Macrografias, de cima para baixo: soldagem linear, <i>switch back</i> pulsado e <i>switch back</i> cc	63
Figura 38 - Macrografias longitudinais, soldagem som TIG linear (acima) e TIG <i>switch back</i> cc (abaixo)	64
Figura 39 – Distribuição de calor no lado oposto ao soldado, para movimentação linear (a) e <i>switch back</i> (b)	65
Figura 40 - Soldagem de chapas sobrepostas com movimentação linear	66
Figura 41 - Soldagem de chapas sobrepostas com oscilação <i>switch back</i> de acordo com a Tabela 7	66

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Tabela 1 - Características dos servomotores	42
Tabela 2 - Resultados das medições de velocidade.....	54
Tabela 3 - Medições dos tempos de avanço	55
Tabela 4 -Medições dos tempos de retorno.....	55
Tabela 6 - parâmetros de soldagem com <i>switch back</i> pulsado	60
Tabela 7 - parâmetros de soldagem com <i>switch back</i> pulsado com maior amplitude de movimento.....	60
Tabela 8 - parâmetros de soldagem com <i>switch back</i> sem pulsação de corrente	61
Tabela 9 - Resultados das medições das macrografias.....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Ar – Gás Argônio

DH – Denavit-Hartenberg

DLL - dynamic link library

H₂ – Gás Hidrogênio

He – Gás Hélio

IHM – Interface Homem Máquina

LABSOLDA – Laboratório de Soldagem da Universidade Federal de Santa Catarina

MAG – Metal Active Gas

MIG – Metal Inert Gas

MISO – Master input slave output

MOSI – Master output slave input

SPI – Serial Peripheral Interface

TIG – Tungsten Inert gas

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES	24
2 ANTECEDENTES E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	27
2.1 ASPECTOS DO TIG QUANTO A PRODUTIVIDADE	27
2.2 ASPECTOS DE ROBÓTICA	29
2.3 MOVIMENTO DE OSCILAÇÃO DA TOCHA	33
3 READEQUAÇÃO TECNOLÓGICA DO ROBÔ	39
3.1 SISTEMA MECÂNICO	40
3.2 SISTEMA ELETROELETRÔNICO	40
3.3 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL	47
4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL.....	53
4.1 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO.....	53
4.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM.....	57
5 CONCLUSÃO	69
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	71
REFERÊNCIAS	73
ANEXO A - Códigos para geração da trajetória <i>switch back</i>.....	77
ANEXO B – Certificado de calibração do sensor de deslocamento	81

1 INTRODUÇÃO

Os processos de soldagem a arco, como o MIG/MAG e o TIG, estão cada vez mais presentes na indústria nacional, seja diretamente na fabricação de peças ou na manutenção de equipamentos. A soldagem tem papel significativo na produção industrial e conseqüentemente no desenvolvimento econômico do país, no qual tem se destacado nos últimos anos o setor de petróleo e gás.

Apesar da elevada importância, os processos de soldagem ainda são pouco utilizados de forma automática na indústria e sofrem com paradigmas, como a disseminada baixa produtividade do processo TIG.

É neste contexto que pesquisas para melhorias de processos de soldagem têm a contribuir fortemente, quebrando paradigmas, e suprimindo a crescente demanda de produção. Dentre as melhorias possíveis destacam-se o aumento da produtividade e a redução de custo dos processos.

O LABSOLDA vem há anos investindo em pesquisa e desenvolvimento, buscando mais do que formar pessoas, teses e dissertações, mas também o desenvolvimento de novas e próprias ferramentas de soldagem, fortalecendo a pesquisa nacional na área de soldagem.

Em dissertações anteriores, voltadas ao desenvolvimento de processos TIG de alta produtividade [2,1], se conseguiram atingir velocidades de soldagem compatíveis com MIG/MAG. Contudo, descontinuidades na solda ainda eram frequentes e, como uma possível solução, surgiu o interesse de se estudar os efeitos da movimentação de avanço e retrocesso da tocha de soldagem (oscilação *switch back*). Adicionalmente sincronizando as fases desse movimento com a pulsação da corrente de soldagem, Figura 1.

O problema é que os robôs industriais disponíveis no LABSOLDA (Motoman UP-6, HP-20 e SIA-10) não possuem uma forma simples e intuitiva para realizar a programação de trajetórias com avanço e retrocesso configuráveis e, muito menos, sincronizados com um sinal para a fonte de soldagem. Além disso, alguns estudos têm demonstrado que os robôs são pouco confiáveis quanto a executar com exatidão a amplitude de oscilação programada [3].

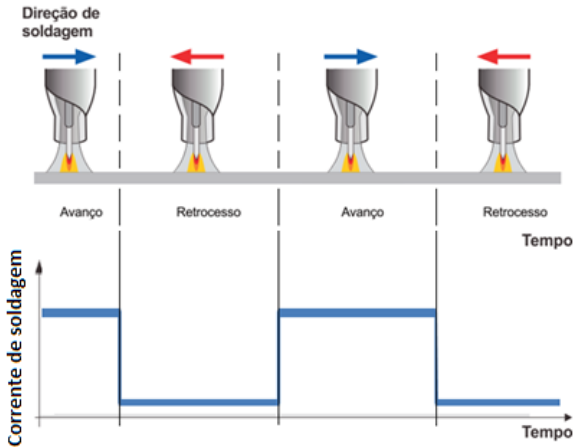


Figura 1 - Oscilação *switch back* com sincronismo

A busca por uma alternativa culminou com a oportunidade de colocar de volta em funcionamento um antigo robô antropomórfico com seis graus de liberdade, readequando-o eletronicamente, substituindo as partes obsoletas e desenvolvendo-se inteiramente o novo controlador "*open source*", que permita a realização de trajetórias sincronizadas com sinais para a fonte de soldagem, possibilitando o estudo dos movimentos de avanço e retrocesso no processo TIG com maior facilidade.

Neste trabalho são abordados a readequação tecnológica de um manipulador antropomórfico, visando a geração de trajetórias de oscilação *switch back*, e um estudo de seus efeitos na produtividade do processo TIG.

1.1 OBJETIVOS E CONTRIBUIÇÕES

O objetivo principal deste trabalho é desenvolver uma infra-estrutura que possibilite os estudos da técnica de oscilação *switch back* no processo TIG de forma confiável e intuitiva.

Os objetivos específicos do trabalho consistem, em ordem cronológica de execução:

- i. Readequar tecnologicamente a eletroeletrônica do robô Reis RV15;
- ii. Desenvolver um software para o robô Reis RV15, com funções de: cálculo de trajetórias *switch back*, comando dos atuadores e IHM.

- iii. Testar e avaliar os efeitos na produtividade da trajetória *switch back* para o processo TIG autógeno.

As contribuições do trabalho envolvem:

- i. Fortalecer o desenvolvimento de manipuladores robóticos de soldagem dentro da universidade e no âmbito nacional;
- ii. Possuir um software de controle robótico aberto, para modificações e desenvolvimento de trabalhos futuros, independente de fabricantes externos;
- iii. Procedimento de soldagem TIG mais produtivo.

2 ANTECEDENTES E FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 ASPECTOS DO TIG QUANTO A PRODUTIVIDADE

Segundo a literatura tradicional, o TIG é um processo de soldagem que promove facilmente cordões de qualidade, sem respingos, mas com o limitante da baixa velocidade de soldagem [5,4].

Tal consideração quanto à baixa produtividade do TIG acontece, pois, tradicionalmente, o processo é pouco utilizado de maneira automatizada na indústria. A maior parte das aplicações é feita de forma manual, sendo principalmente soldagem de raiz, de chapas finas e aços especiais. Como a soldagem realizada manualmente tende a apresentar baixa velocidade e, conseqüentemente, baixas intensidades de correntes, o processo fica estável e não ocorrem defeitos [1]. Porém, quando se utiliza o processo autógeno (sem adição de arame) com intensidades de corrente superiores a 250 A, aproximadamente, o comportamento da poça de fusão apresenta mudanças. Como pode ser visto no gráfico da Figura 2, com o aumento da velocidade e da corrente de soldagem ocorre o aparecimento de defeitos, sendo que o mais comum em tais situações é o *humping*, Figura 3[6].

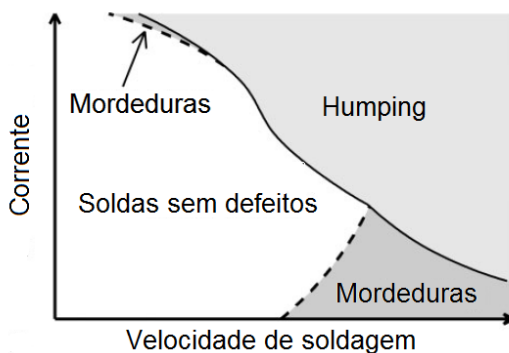


Figura 2 – Velocidade x Corrente de soldagem e seus respectivos defeitos [6]

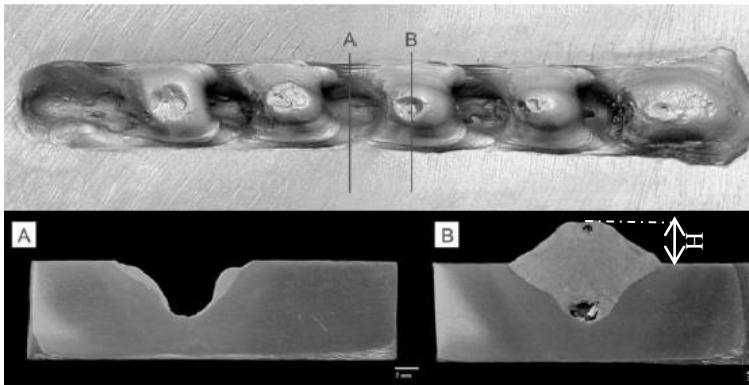


Figura 3 – Exemplo de *humping* em soldagem TIG [1]

Mendez [7], explica o fenômeno da formação da cratera formadora do *humping*, como sendo o resultado de um desbalanço entre forças exercidas pela pressão do arco (P_a), que tende a expulsar o material fundido para a região posterior em relação ao sentido de soldagem, e de pressões hidrostáticas (P_h), formadas pelo metal líquido, que agem em sentido contrário, Figura 4. Quanto maior a corrente de soldagem, maior a pressão do arco e, conseqüentemente, maior a cratera. Quando submetido às velocidades elevadas de deslocamento, o material fundido deslocado para parte posterior solidifica-se antes de conseguir preencher novamente cratera, formando o *humping* [1].

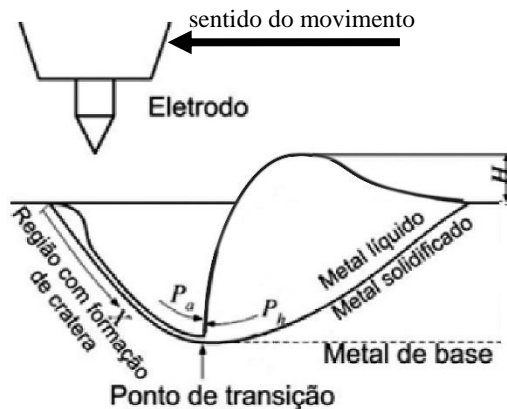


Figura 4 - Esquema mostrando a formação da cratera na poça de fusão no processo TIG[1]

Trabalhos realizados no LABSOLDA mostraram que é possível reduzir o aparecimento desses defeitos. Dentre as principais constatações, se percebeu que o eletrodo com a afiação em formato cônico seccionado (tronco de cone), a inclinação do ângulo de trabalho da tocha e a substituição de *Ar* por *He*, como gás de proteção, diminuem significativamente o efeito prejudicial da pressão do arco. Misturas de *Ar+H₂* também aumentam significativamente a eficiência de fusão, aumentando o tamanho da poça metálica, sem aumentar a pressão do arco.

A adição de *H₂* à mistura gasosa, apesar de ter apresentado os melhores resultados em termos de eficiência de fusão e eliminação de *humping*, deixou o material base mais susceptível a porosidades e trincas e também torna o processo mais perigoso, visto que o *H₂* é altamente inflamável [2,1].

Ietka [2] e Schwedersky[1] em seus trabalhos, mediante minuciosos testes e seleção da mistura gasosa, do diâmetro e afiação do eletrodo, da distância entre eletrodo e peça e da inclinação da tocha conseguiu chegar a velocidades de soldagem superiores à 1,2 m/min na selagem de compressores herméticos, Figura 5, equiparando-se em produtividade ao processo MIG/MAG, convencionalmente utilizado para esta aplicação.

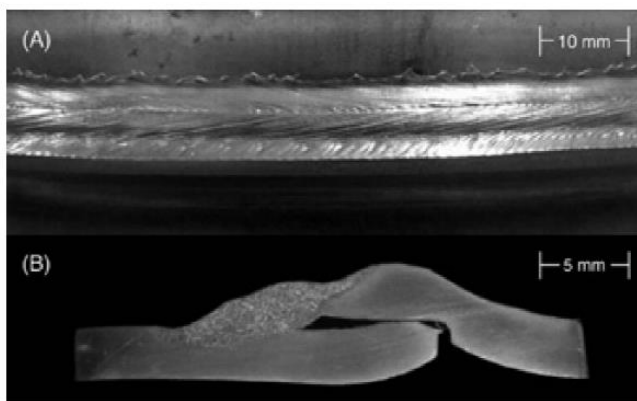


Figura 5 – Cordão soldado na selagem de um compressor com processo TIG autógeno à 1,5 m/min. Aspecto superficial em (A) e secção transversal

Apesar da alta produtividade atingida por Ietka, o índice de defeitos com TIG ainda foi maior que com o processo MIG/MAG.

2.2 ASPECTOS DE ROBÓTICA

Nas condições atuais de mercado, há uma tendência se utilizar os conceitos de *lean manufacturig* (manufatura enxuta), aonde se procura fabricar pequenos e médios lotes de peças, evitando ao máximo o desperdício. Nessas condições a produção robotizada exibe o melhor custo benefício, combinando produtividade, qualidade e flexibilidade, Figura 6 [4,8]. Tratando-se de soldagem, segundo RIA (*robotics industries association*), esta é responsável, atualmente, por quase 50% do mercado de robótica na América do Norte [9].

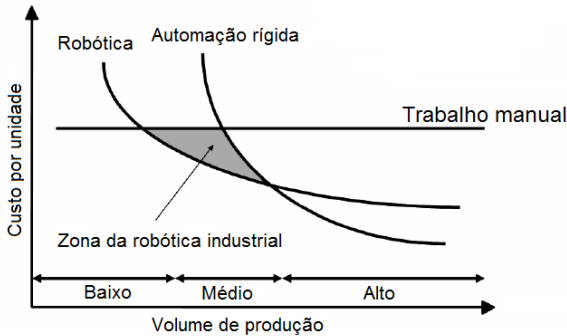


Figura 6- Zona de atuação da robótica industrial [10]

Quando se fala a respeito de sistemas para o deslocamento da tocha de soldagem, geralmente o que vêm à mente são os robôs do tipo antropomórfico, Figura 7, largamente utilizados na indústria devido a sua ampla flexibilidade e espaço de trabalho. Contudo, em algumas situações como, por exemplo, a soldagem de dutos em campo, é muito mais producente o uso de manipuladores especiais, portáteis e específicos para tal função, como os manipuladores cartesianos e orbitais, Figura 8 [11].



Figura 7- Robô antropomórfico Motoman MA1400



Figura 8- Manipulador de solda Tartfilope V2F desenvolvido especialmente para soldagem orbital de tubos

Robôs e manipuladores cartesianos, apenas com juntas prismáticas, Figura 8, são muito mais simples no que diz respeito ao controle de posição, visto que cada coordenada no espaço cartesiano corresponde direta e proporcionalmente às coordenadas de juntas. Contudo, robôs com juntas rotacionais como os antropomórficos, Figura 7, são mais complexos e cada coordenada no espaço é dependente de um movimento combinado de todas as juntas. Para solucionar os problemas de cálculo de posição destes manipuladores foram desenvolvidos métodos de cinemática direta e inversa.

A cinemática direta consiste em, a partir do posicionamento das juntas do manipulador e conhecendo a geometria de seus elos, determinar a posição e orientação do efetuador final. O método clássico mais conhecido para solução deste problema, usado no desenvolvimento do presente trabalho, é o método de Denavit-Hartenberg, ilustrado na Figura 9, [12].

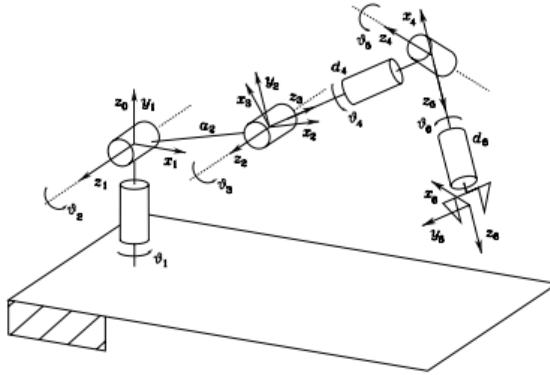


Figura 9 – Braço antropomórfico com punho esférico com as juntas posicionadas por Denavit-Hartenberg [12]

A cinemática inversa é o problema contrário, ou seja, determinar a posição de cada junta, a partir de uma dada posição e orientação do efetuador final no espaço. A cinemática inversa comumente é mais complexa visto que, ao contrário da direta onde cada solução de juntas resulta em apenas uma solução no espaço, uma posição no espaço cartesiano pode possuir mais de uma solução de juntas. Considerando um robô antropomórfico de seis graus de liberdade, como o da Figura 7, que não possua limites rotacionais nas juntas, há, de forma geral, oito combinações possíveis para cada posição. O método mais comum para resolver estes problemas em robôs com estrutura clássica, como o antropomórfico, e sem redundância, é o método analítico, que se baseia na análise da geometria da cadeia de juntas e elos, requerendo intuição geométrica e algébrica. Robôs redundantes ou com cadeia cinemática mais complexa por vezes não são possíveis de serem resolvidos com o método analítico, necessitando do uso de métodos mais genéricos e também mais complexos, baseados na integração da cinemática diferencial [12].

Apesar de contar com três robôs antropomórficos industriais da MOTOMAN, há anos o LABSOLDA vem desenvolvendo manipuladores de soldagem, como temas de dissertações, teses e em parceria com empresas.

Desenvolver os próprios manipuladores traz vantagens, principalmente à área de pesquisa, possibilitando maior entendimento e recursos muitas vezes não oferecidos pelos fabricantes industriais, ou oferecidos a preços exorbitantes.

Em 2004 o LABSOLDA colaborou com o grupo de robótica da UFSC que desenvolveu o Roboturb, um robô antropomórfico para recuperação de pás de turbinas de hidrelétricas por meio de revestimento com soldagem. O sistema, devido à redundância cinemática, possibilitava a operação em ambientes confinados, dentro das turbinas, evitando colisões, e contava com um sistema de sensoriamento laser, que gerava as trajetórias automaticamente para preenchimento das regiões afetadas por corrosão ou cavitação, com processo plasma alimentado [14,13]. Contudo, após o final do projeto o LABSOLDA voltou-se ao desenvolvimento de manipuladores cartesianos.

2.3 MOVIMENTO DE OSCILAÇÃO DA TOCHA

A oscilação em soldagem é usada frequentemente perpendicular à direção do cordão, movendo a tocha de um lado para o outro, Figura 10, formando trajetórias triangulares ou trapezoidais, normalmente com o objetivo de aumentar a largura do cordão de solda, preencher juntas maiores, entre outros fatores.

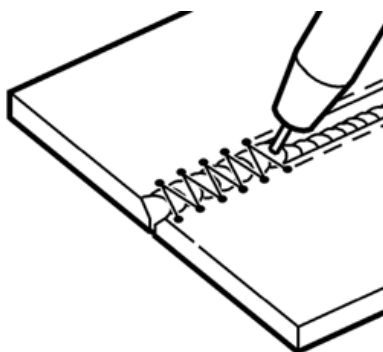


Figura 10 – Oscilação triangular em soldagem [15]

A oscilação *switch back* consiste em movimentar a tocha na direção longitudinal do cordão, Figura 11, fazendo movimentos de avanço e retrocesso. A velocidade e amplitude em cada fase do movimento podem variar ou manter-se a mesma [16].

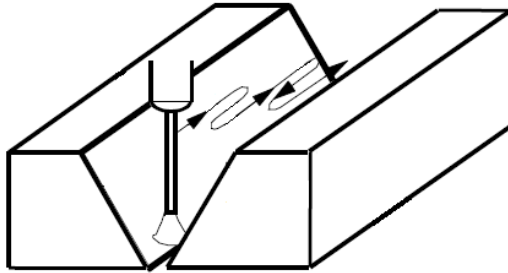


Figura 11 – Oscilação *switch back* [17]

Na soldagem MIG/MAG, autores citam que tal tipo de movimentação gera uma primeira deposição no momento do avanço que dá sustentação ao depósito dado no retrocesso, evitando o *burn-through* (vazamento da junta) mesmo sem utilização de cobre-junta (*backing*) [17,19,18].

Dutra et al. [20] sincronizaram o movimento de avanço e retorno com a troca da polaridade da corrente de soldagem no processo MIG/MAG, avançando com polaridade negativa, onde há alta taxa de fusão do eletrodo com baixa diluição, e retornando com positiva, dessa forma evidenciando o efeito citado por Eguchi et al [17] de evitar o vazamento da junta e conseguindo excelentes resultados na soldagem de juntas circunferenciais de rodas metálicas de tratores.

Yamane et al [21] e Eguchi et al [17] combinaram a técnica *switch back* com a oscilação transversal convencional, para juntas com chanfro em V sem *backing* na soldagem MIG/MAG e verificaram que a sincronização da pulsação da corrente com a oscilação transversal, mantendo a corrente baixa no centro e aumentando-a nos flancos (Figura 12), permitiu fundir adequadamente as bordas das juntas sem ocorrer vazamento ou destruição da raiz.

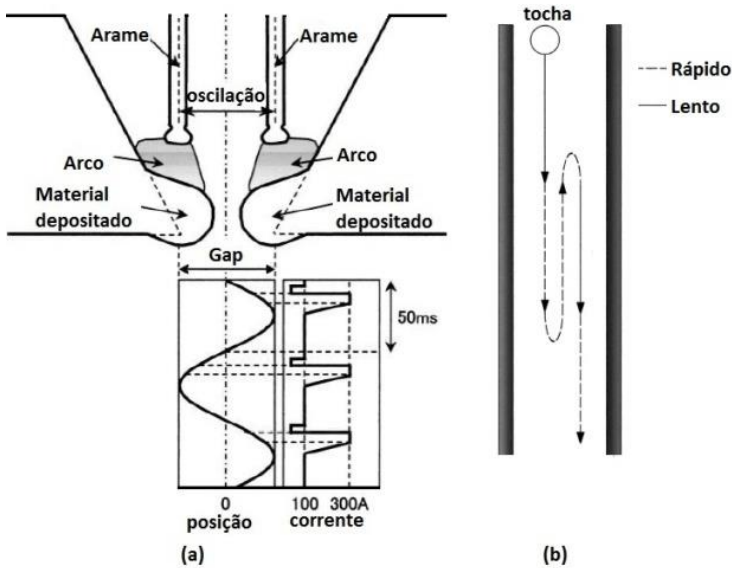


Figura 12 – Sincronização da corrente com a oscilação transversal em (a) e a oscilação *switch back* com variação da velocidade em (b) [21].

A sincronização da corrente com a oscilação transversal na soldagem MIG/MAG aparece também na patente de Peters et al [22] e no trabalho de Dutra et al. [23], aonde sincronizam, ao invés de a intensidade de corrente, a polaridade, em negativa para o meio do cordão e positiva para os flancos (Figura 13) obtendo bons resultados para chanfros em V e revestimento respectivamente.

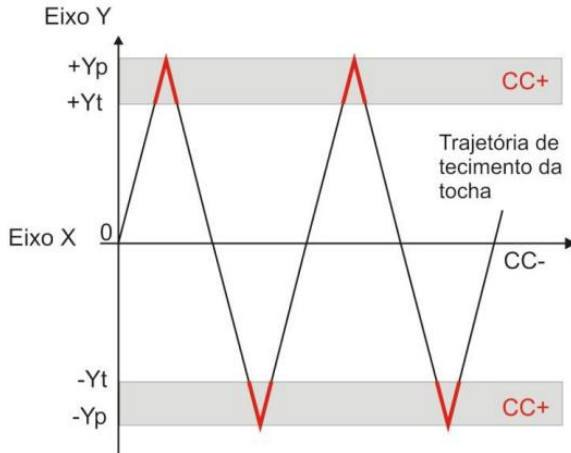


Figura 13–Oscilação triangular com sincronização da polaridade com o movimento [23].

Estudos desenvolvidos também mostraram que a técnica *switch back* promove um aumento da velocidade limite de soldagem e melhor controle da raiz da solda no processo MIG/MAG [16,19]. Contudo, não se encontrou na literatura referências do uso deste método de oscilação especificamente no processo TIG, com ou sem pulsação de corrente.

Kaneko [19] fez simulações numéricas, demonstrando o efeito térmico na peça, evidenciando que o tamanho máximo da poça na parte inferior fica menor quando usado a oscilação *switch back*, comparado com a convencional com mesma intensidade de corrente e mesma velocidade resultante, Figura 14. O autor concluiu que este é o principal motivo de o método evitar o *burn-through* na soldagem de raiz no MIG/MAG e também atribui efeitos benéficos ao fato do arco elétrico distanciar-se do centro da poça em certos momentos, diminuindo as perturbações causadas pela pressão.

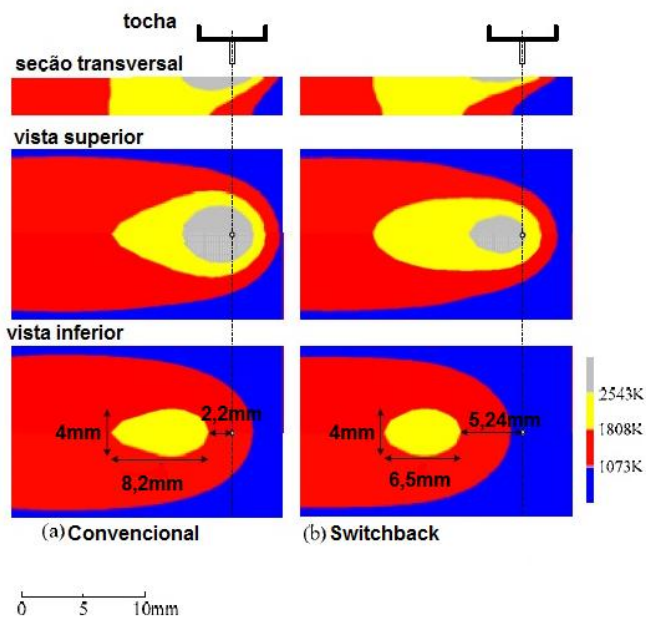


Figura 14 - Distribuição de temperatura quando o tamanho da poça atinge o tamanho máximo [19].

Não foram encontrados estudos dos efeitos da técnica *switch back* no processo TIG.

3 READEQUAÇÃO TECNOLÓGICA DO ROBÔ

O Reis RV-15 é um robô do tipo antropomórfico com seis graus de liberdade e capacidade de carga de 15 kg, fabricado em 1987 pela empresa alemã Reis Robotics. Seus circuitos de acionamentos, além de estarem obsoletos, estavam em péssimo estado de conservação, como pode ser visto na Figura 15.

Apesar das péssimas condições do conjunto eletroeletrônico, a mecânica é robusta e continua em bom estado de conservação, assim como seus seis servo motores DC. Os referidos servo motores são do tipo DC de fluxo axial, conhecidos como "disco" ou "panqueca", pela sua característica radialmente largo e axialmente curto. Esse tipo de atuador elétrico proporciona excelente relação torque/inércia e baixíssima indutância devido a não presença de material ferromagnético nas bobinas do rotor (*ironless*), resultando em excelente velocidade de resposta [24].

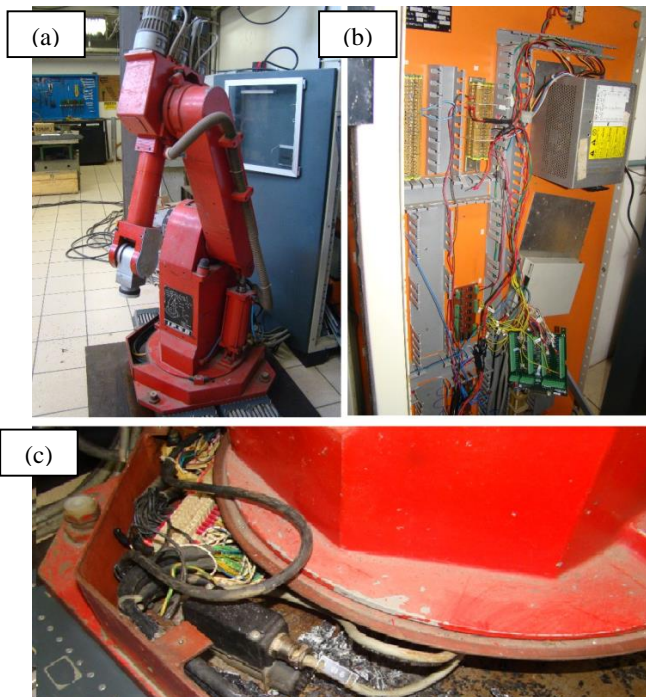


Figura 15- Fotos tiradas em maio de 2013 demonstrando a situação precária do robô: braço robótico (a), painel eletroeletrônico (b) e base do braço robótico (c)

3.1 SISTEMA MECÂNICO

O projeto do sistema mecânico não foi alterado, por estar em bom estado de conservação e atender as necessidades do projeto.

O sistema original é composto de conjuntos de polias e correias sincronizadoras que são usadas para transmitir o movimento dos motores até os *harmonic drives* com redução de 100:1. Os eixos 2 e 3 do robô (ombro e cotovelo) possuem freios eletromagnéticos para evitar que o robô se movimente por ação da gravidade quando desligado ou quando houver interrupção no fornecimento de energia elétrica. O servo motor do ombro é auxiliado por um cilindro pneumático para compensar a ação da gravidade sobre o robô.

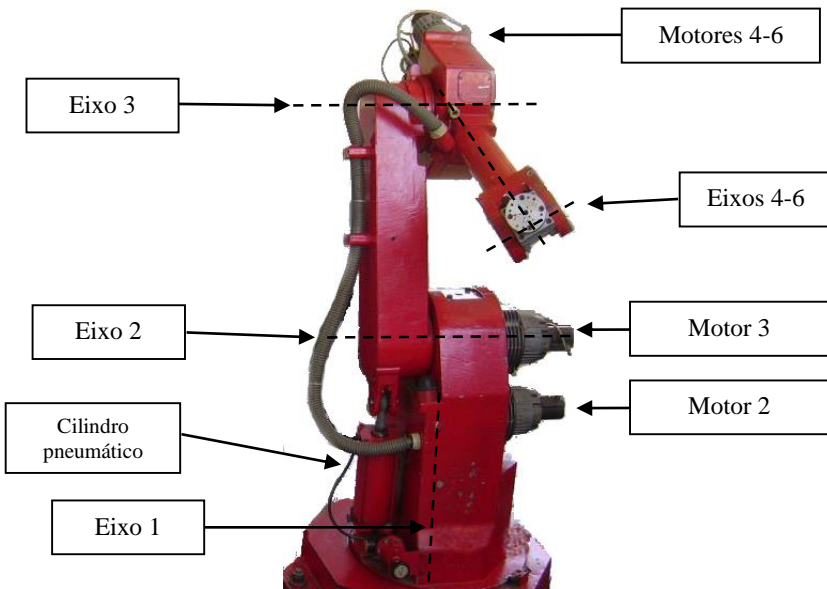


Figura 16 – Estrutura do braço robótico

Apenas o regulador de pressão do cilindro pneumático que estava quebrado e alguns parafusos oxidados precisaram ser substituídos. Houve também manutenção na camisa do atuador pneumático que apresentava sinais de corrosão.

3.2 SISTEMA ELETROELETRÔNICO

O sistema eletroeletrônico foi praticamente todo reformulado. Inspirado no trabalho de Bonin [25], os seis antigos drivers analógicos foram substituídos

pelos servo drivers VSD-e160 da *Granite devices*, comandados via SPI (*serial peripheral interface*) simultaneamente pela porta paralela de um computador. A malha de controle foi fechada localmente em cada servo driver, facilitando o desenvolvimento do software, que precisa somente calcular e enviar os comandos de posição e velocidades, Figura 17.

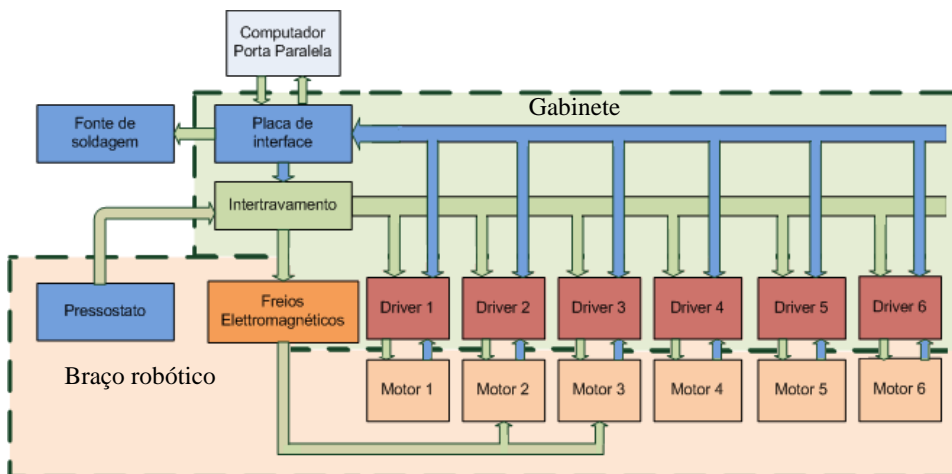


Figura 17 - Diagrama de blocos do sistema

A comunicação via SPI é uma forma de transmissão de dados de forma serial síncrona: possui os sinais MOSI (*master output/slave input*) e MISO (*master input/slave output*) que transmitem os dados de forma binária, sincronizados por um sinal de CLOCK que indica, no momento da transição, que o bit está pronto e deve ser lido pelo receptor, Figura 18. Dessa forma a comunicação funciona mesmo com variações na frequência de transmissão.

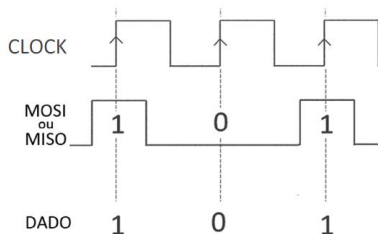


Figura 18 - Funcionamento da transmissão serial síncrona [25]

Contudo, utilizando o programa padrão fornecido pelo fabricante, com uma porta serial individual para cada driver, há defasagem e variações de frequência do sinal de CLOCK, naturalmente sendo um problema para trajetórias multieixo. Bonin [25] solucionou o problema utilizando a porta paralela do computador como várias interfaces SPI com um sinal de CLOCK comum para todos os drivers, garantindo que os comandos cheguem exatamente ao mesmo tempo em todos os eixos.

Os novos drivers VSD-e160 também são muito mais compactos que os drivers originais, Figura 19, otimizando o espaço e distribuição dos componentes, Figura 24.

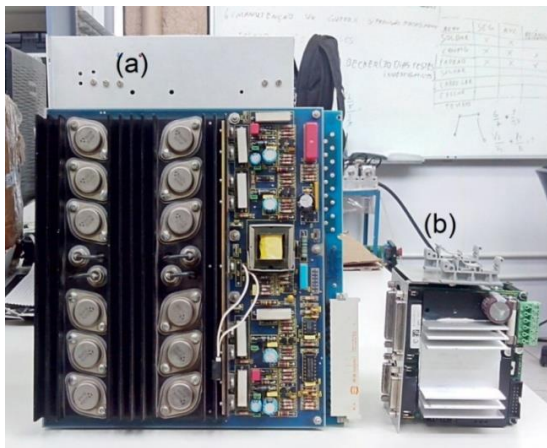


Figura 19- Antigo driver analógico (a) e o novo driver adquirido (b)

Os servo motores DC *ironless*, MAVILOR MO-200 e MO-800, foram mantidos por estarem em boas condições, contudo a baixíssima indutância do rotor faz com que a corrente varie abruptamente, podendo causar danos ao sistema de potência e até mesmo vibrações se o período de chaveamento do driver for maior que o tempo necessário para retirar o rotor da inércia, podendo prejudicar o desempenho e causar desgaste prematuro de componentes mecânicos, como rolamentos.

Tabela 1 - Características dos servo motores

<i>Parâmetros</i>	<i>MO-800</i> <i>(Eixos 1-3)</i>	<i>MO-200</i> <i>(Eixos 4-6)</i>
Tensão nominal (V)	106	40
Corrente (A)	9,2	7
Torque (N.m)	3,65	0,64

Torque de pico (N.m)	18	6,4
Velocidade nominal (RPM)	3000	3000
Velocidade máxima (RPM)	6000	6000
Inércia do rotor (g.cm ²)	7925	1400
Indutância (uH)	211	102

Foram feitas simulações com auxílio da ferramenta *Simulink* do Matlab e os dados fornecidos pelo *datasheet* de um dos motores (ANEXOS A e B). O resultado, Figura 18, demonstra que a baixa indutância combinada a baixa inércia do rotor, chaveados em 20 kHz (frequência de chaveamento do driver [26]) causariam vibrações.

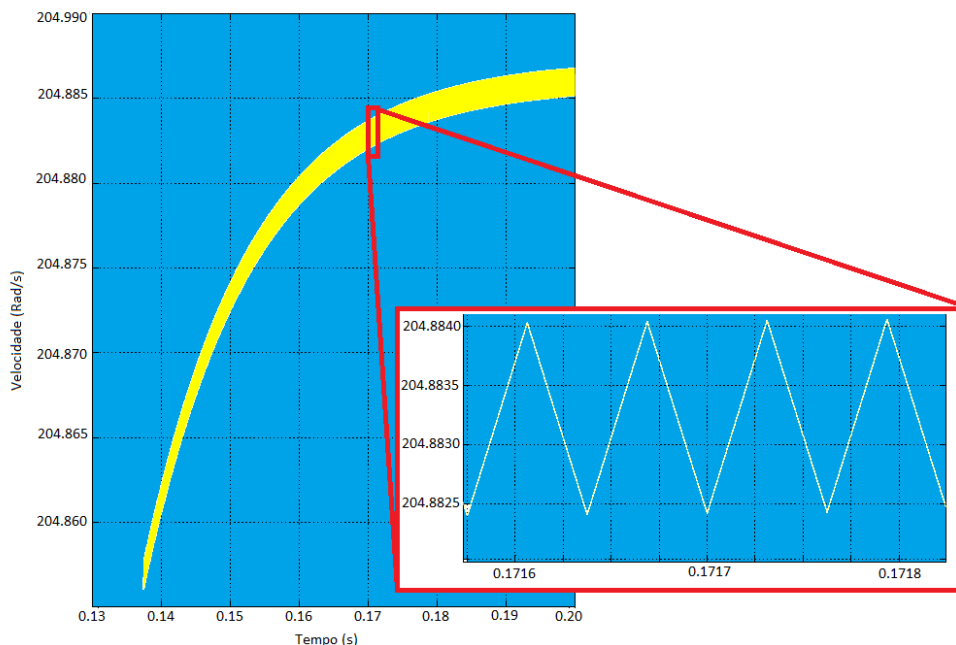


Figura 20 - Resposta em velocidade do servo motor do eixo 6 com um PWM de 20 kHz e razão cíclica de 50%.

Para solucionar o problema foram utilizados indutores de 5 mH em série com os motores. Os resultados das novas simulações demonstraram a minimização das vibrações, Figura 21.

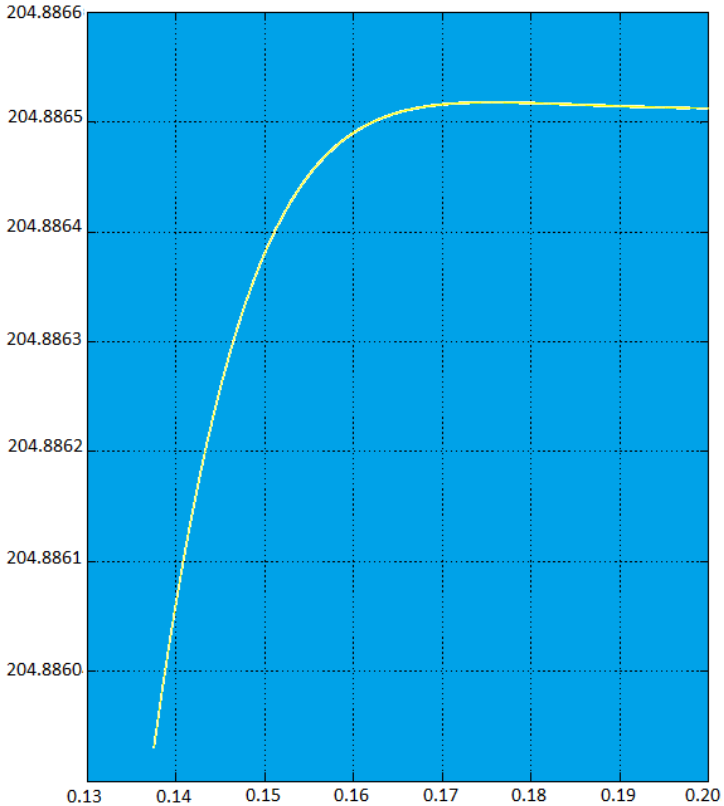


Figura 21 - Resposta em velocidade do servo motor do eixo 6 em série com indutor de 5 mH com um PWM de 20 kHz com razão cíclica de 50%

Assim como os servo motores DC, também foram mantidos os antigos *encoders* ópticos incrementais, de 1000 linhas por revolução. O modelo original do robô possui além dos canais "A", "B" e "Z", diferenciais, adicionalmente um canal "Y", usado como "HOME".

Assim como no trabalho de Bonin [25] foi desenvolvida uma placa para isolar, amplificar e distribuir os sinais de *CLOCK*, *MOSI* e *MISO* da porta paralela do computador para os seis drivers, Figura 22. A placa possui, além da comunicação SPI, entradas e saídas digitais isoladas, e circuitos de proteção que desligam a potência em caso de falha.

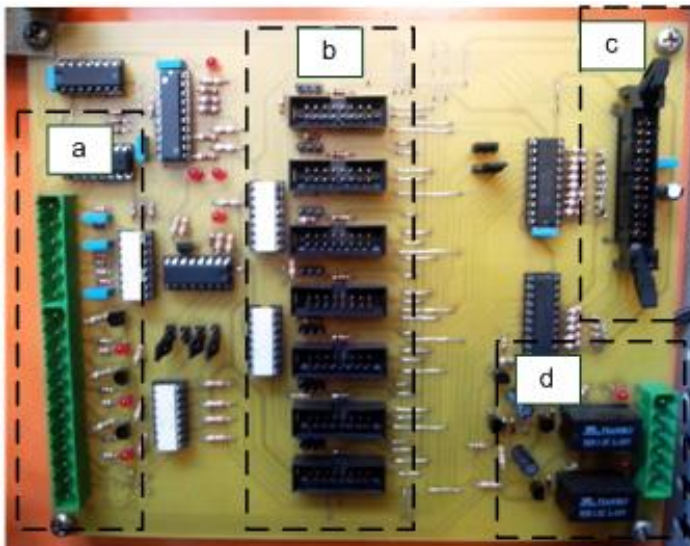


Figura 22 - Placa de interface: entradas e saídas isoladas (a), conexão para os drivers (b), conexão para a porta paralela (c) e intertravamento (d)

O circuito lógico de potência e intertravamento, Figura 23, foi pensado para garantir a segurança do operador e também do robô. A potência só é disponibilizada pelas contactoras principais (K1 e K2) aos motores, se o botão de emergência (E) não estiver pressionado, a pressão do cilindro pneumático (Pr) estiver acima de 4 bar e o computador estiver enviando um sinal de presença (CP). Depois de energizado, um relé temporizador (KT) aguarda cerca de 2 segundos e, se não houver falhas, fecha a auto retenção e libera os freios dos eixos 2 e 3 (FR). A potência dos motores e os sinais dos encoders são separados, em cabos diferentes e blindados, para evitar ruídos causados pela indução eletromagnética originada da variação abrupta de corrente, em especial na reversão do sentido do movimento.

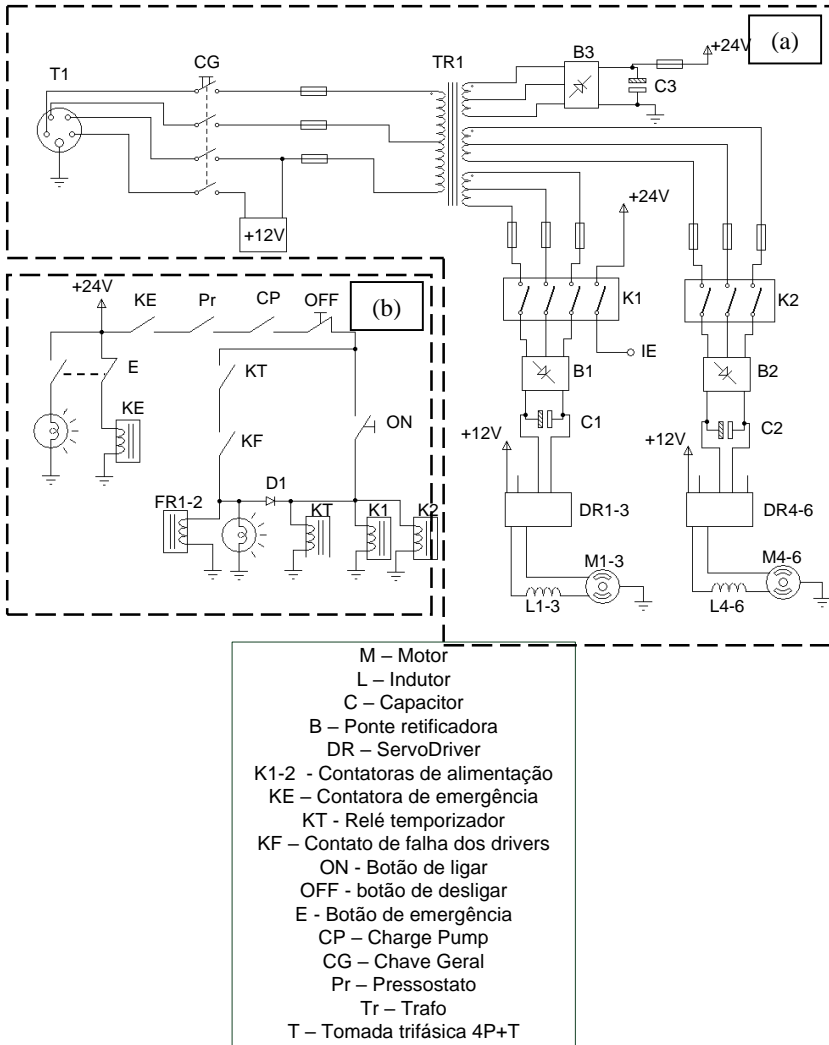


Figura 23 - Circuito lógico de potência (a) e intertravamento (b)

A distribuição dos componentes no gabinete foi planejada com o auxílio do software de desenho 3D *Solidworks*. O canto superior direito foi reservado para colocação da placa-mãe do computador do padrão mini ATX, com dimensões menores que as convencionais, permitindo que todo o sistema ficasse alojado dentro do gabinete. Mas para economia de recursos, foi utilizado um computador pessoal já montado, externo ao gabinete.

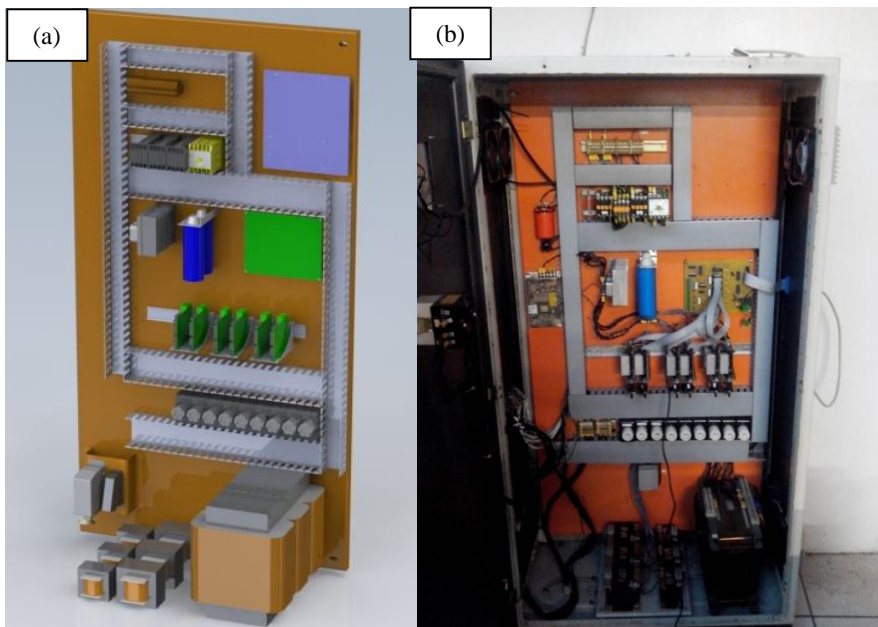


Figura 24 - Gabinete eletrônico modelado no *SolidWorks* (a) e gabinete após o *retrofitting* (b)

3.3 DESENVOLVIMENTO COMPUTACIONAL

Para operar o robô de forma fácil e intuitiva foi desenvolvido um software em linguagem de programação C# (ou *C sharp*) com o software de programação Microsoft Visual Studio. Esta plataforma foi selecionada pela facilidade no desenvolvimento da interface gráfica e programação orientada a objeto de forma intuitiva, agilizando o desenvolvimento.

O software desenvolvido é responsável por fazer a interface homem-máquina, gerar as trajetórias conforme desejado pelo usuário, converter os pontos da trajetória do sistema cartesiano para o sistema de juntas do robô e enviar os comandos de posição pela porta paralela, sincronizadamente para todos os drivers em intervalos de tempo predefinidos. Por tratar-se um robô clássico e de cinemática conhecida, os parâmetros de DH e de cinemática inversa foram apenas adaptados da obra de Siciliano et al.[12].

Os comandos precisam ser enviados em intervalos de tempo precisamente conhecidos e calculados, para garantir um movimento suave e contínuo do robô. Porém, ao mesmo tempo é preciso fazer o controle de entradas

e saídas, verificação do sinal de emergência, interface com o usuário e calcular as trajetórias. A grande dificuldade do trabalho é manter o controle temporal preciso, executando todas essas operações em um sistema operacional para uso pessoal (*Windows 7*), que dificulta o controle de interrupções e tem funções nativas que concorrem com o programa desenvolvido.

A solução foi implementar o *multithreading*, ou multitarefa, que é a utilização de *Threads*, ou tarefas, concorrentes dentro do programa principal, funcionando como programas independentes que partilham o mesmo processador (é o que os sistemas operacionais fazem para permitir o uso de vários programas ao mesmo tempo). Para um controle mais preciso, é possível definir prioridades para cada *thread*: muito alta, alta, normal, baixa ou baixíssima.

Apesar de a linguagem possuir funções nativas para o uso de *threads* temporizadas (classes *System.Threading.Timer* e *System.Threading.TimerCallback*), percebeu-se que usá-las implica em um atraso na temporização, cada vez que as tarefas são reinicializadas, sendo um problema para tarefas críticas. Para contornar o problema, as *threads* são inicializadas somente uma vez, rodando em *loop*, e verificando a temporização através do relógio do processador (classe *System.Diagnostics.Stopwatch*), conforme fluxograma apresentado na Figura 25.

Em 2003, logo que a Microsoft disponibilizou o C#, como uma nova linguagem de programação do Visual Studio, Lutz [27] citou-a como uma boa opção para programação de interfaces, mais intuitivo que o C++, porém criticou seu desempenho para realizar tarefas com controle preciso de tempo, comparando-o ao Java e classificando-o como uma má opção para estes casos. Porém, tanto software quanto o hardware dos computadores evoluiu muito rapidamente, permitindo tal avanço.

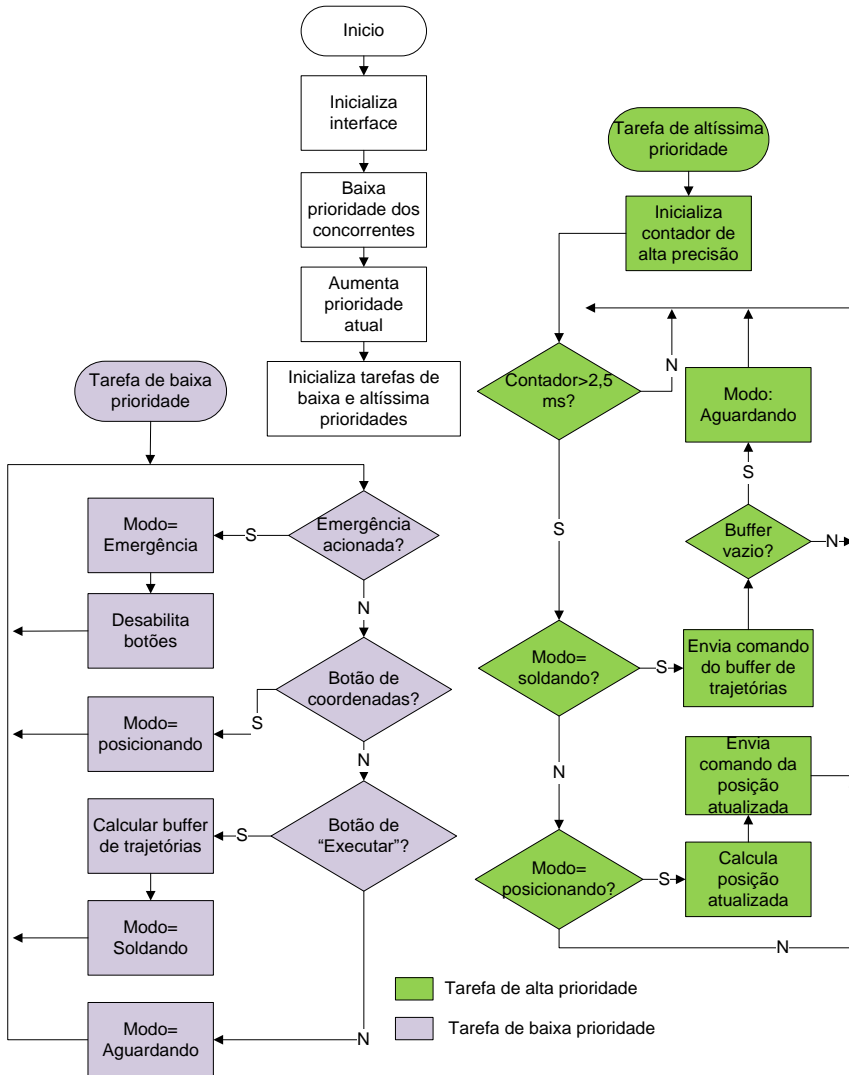


Figura 25 - Fluxograma básico do programa de operação do robô

O usuário pode mover e posicionar o efetuator do robô usando os botões de coordenadas: *X*, *Y*, *Z* (posição) e *Roll*, *Pitch*, *Yaw* (orientação), e marcar os pontos de início e fim do processo de soldagem em uma tela *touch screen*, que facilita acompanhar o movimento do robô de perto para ajustes finos

de distâncias em relação. Na mesma tela o usuário fornece os parâmetros desejados: velocidade de soldagem, tipo e parâmetros da oscilação da tocha e dá início ao processo.

Para facilitar a repetição de ensaios, é possível salvar os pontos da trajetória em um arquivo de texto (*.txt) e carregá-los novamente a qualquer momento. O programa salva cada ponto da trajetória em uma linha. As coordenadas *X*, *Y* e *Z* são salvas em milímetros e os ângulos *Roll*, *Pitch* e *Yaw* em radianos, separados pelo caractere "/", Figura 26. Essa alternativa também permite ao usuário fazer a programação "offline", criando um arquivo em outro computador, com as posições desejadas e passando para o computador que controla o robô através de um *pen drive*.

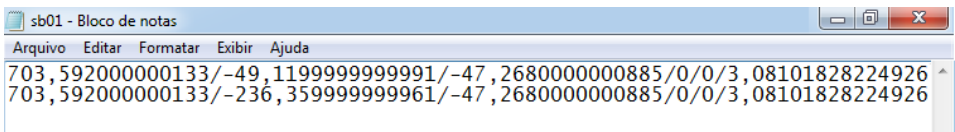


Figura 26 - Arquivo *.txt com duas posições salvas

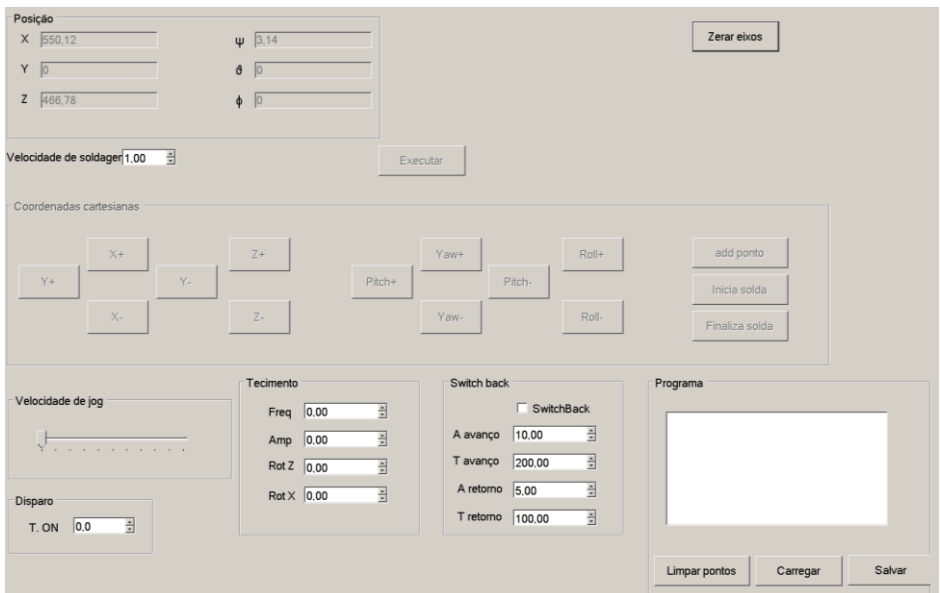


Figura 27 - Tela do programa de operação

Para enviar os comandos para os drivers o fabricante fornece uma biblioteca em C++ com o protocolo de comunicação e que originalmente envia

os comandos por um conversor de USB para SPI. Contudo, assim como relatado, não há garantia da simultaneidade dos comandos para todos os drivers, prejudicando o controle multiteixos e fazendo necessárias modificações na biblioteca original, como proposto por Bonin [25]. O código fonte foi modificado para, ao invés de enviar os comandos diretamente para os drivers, apenas retornar a sequência de bits do dado comando, que são armazenados em um *buffer* enviado posteriormente de forma sincronizada a cada pino da porta paralela. Para utilizar a biblioteca original, em C++, com o novo programa, em C#, foi necessário transforma-la em um arquivo de extensão .dll (*dynamic link library*), dessa forma as funções podem ser usadas de forma compartilhada e chamadas em programas desenvolvidos em plataformas diferentes.

O software desenvolvido permite escolher: movimentação linear, com oscilação senoidal transversal ou *switch back*.

Os parâmetros de entrada fornecidos pelo usuário para formar a trajetória *switch back* são: amplitude de avanço, amplitude de retorno, tempo de avanço e tempo de retorno. Dessa forma o processo fica mais flexível, facilitando o desenvolvimento enquanto o processo está em fase de estudo, podendo fazer avanços e retrocessos com velocidade e amplitudes distintas. A velocidade resultante do processo é calculada automaticamente pelo programa, segundo a Equação 1, e exibida na tela para o usuário.

$$v_{m\acute{e}dia} = \frac{d_{avan\c{c}o} - d_{retorno}}{t_{avan\c{c}o} + t_{retorno}} \quad (1)$$

Com o intuito de deixar o movimento suave, principalmente devido a sensibilidade do processo TIG quanto a variação de altura, foi escolhido o perfil de trajetória cicloidal, Figura 28, que oferece um perfil de aceleração contínuo (a aceleração parte e finaliza no zero) e consequentemente há pouca variação de forças inerciais do sistema e menos vibrações [28].

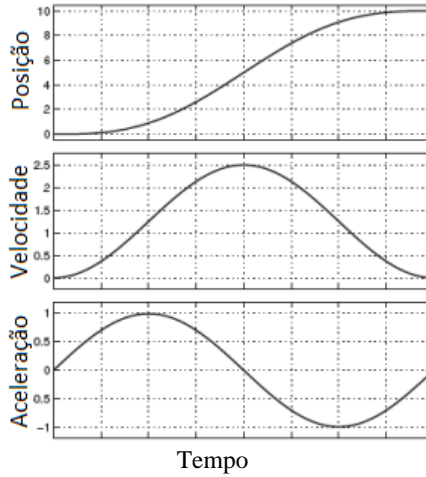


Figura 28 - Perfil de posição, velocidade e aceleração de uma trajetória cicloidal [28]

O algoritmo para o cálculo das trajetórias pode ser observado no ANEXO A.

4 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

4.1 ENSAIOS DE CALIBRAÇÃO

Para avaliar a movimentação do robô foi utilizado um sistema de medição de deslocamento Burster 8713-50, com 50 mm de curso, que funciona como um resistor variável (trimpot), convertendo o deslocamento em variação de resistência, formando um divisor de tensão. A resistência varia de 0 a 1 k Ω linearmente, com incerteza expandida (95%) de 0,0200 mm, calibrado em laboratório certificado, ANEXO B.

Foi desenvolvido um sistema de aquisição que agrega o sensor, conectando o potenciômetro ao conversor analógico digital de 10 bits de um microcontrolador ATmega 328, que adquire e converte a tensão com uma taxa de aquisição de 1 kHz, com resolução de 0,05mm e envia para computador pela porta serial com conversor USB. No computador foi desenvolvido um software, Figura 29, que recebe o valor enviado, exibe graficamente e permite salvar em uma planilha do excel para análises posteriores.

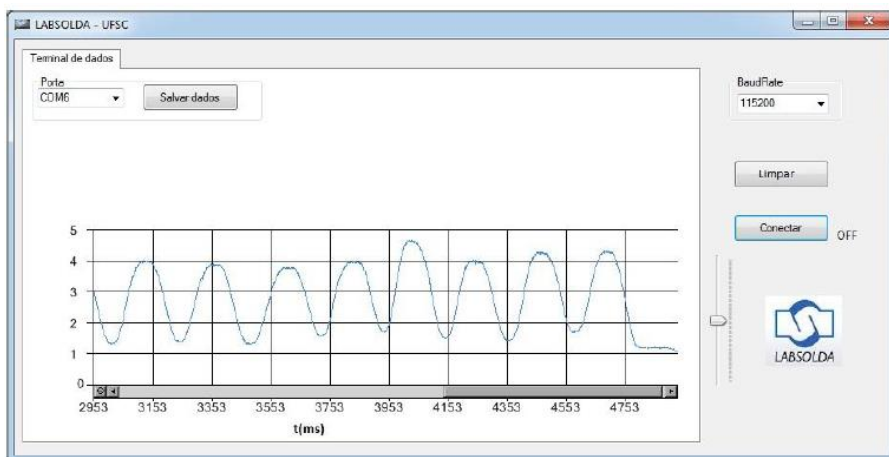


Figura 29 - Software de aquisição desenvolvido

Colocou-se o potenciômetro alinhado ao movimento do robô com a ajuda de um esquadro, conforme Figura 30. Foram feitos ensaios com velocidades de 30 cm/min (5 mm/s) com movimentação linear. Esta velocidade foi selecionada por ser a mesma utilizada posteriormente nos ensaios com soldagem TIG. A Tabela 2 apresenta os resultados obtidos em cinco medições consecutivas, calculando a velocidade média em um trecho de 50 mm.

Tabela 2 - Resultados das medições de velocidade

<i>Ensaio</i>	<i>V programada (mm/s)</i>	<i>V medida (m/s)</i>	<i>Desvio padrão</i>
1	5,0	5,0	0,000039
2	5,0	5,0	
3	5,0	5,0	
4	5,0	5,0	
5	5,0	5,1	

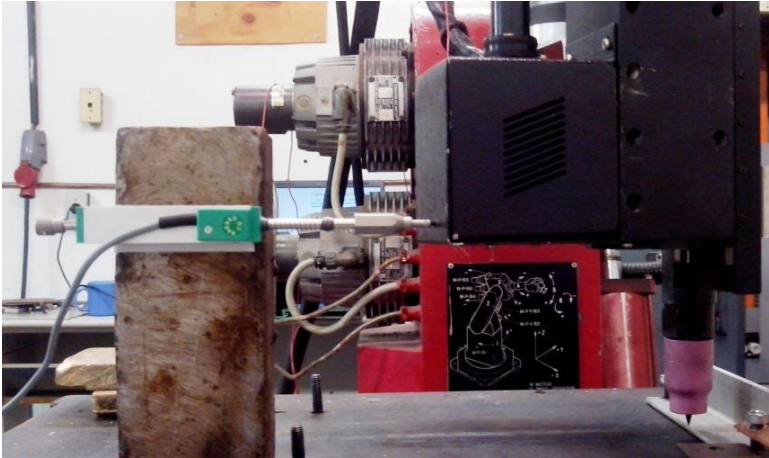


Figura 30 - Sistema de medição montado no robô Reis-RV 15

Para comparação fez-se o mesmo ensaio com mesma velocidade equivalente e oscilação *switch back*, com avanço programado em 10 mm em 300 ms e retorno de 7,5 mm em 200 ms. O resultado das medições foi comparado com a ajuda do Excel através da ferramenta de exibição da linha de tendência linear com equação. Como pode se observar na Figura 31, as linhas de tendência têm exatamente os mesmos coeficientes angulares (0,0050 mm/ms), demonstrando que as velocidades foram muito próximas, exatamente como desejadas.

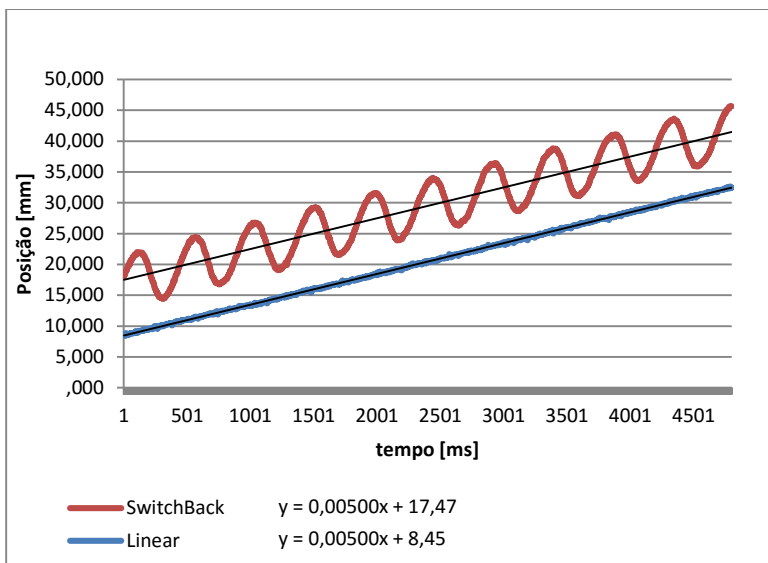


Figura 31 - Medição do deslocamento linear e *switch back* com linha média

Os testes do sinal de sincronismo foram obtidos através do sistema de aquisição para processos de soldagem SAP, com taxa de aquisição de 5 kHz [29]. Foram utilizados os parâmetros de oscilação *switckback* com avanço programado de 10 mm em 300 ms e retorno de 7,5 mm em 200 ms. Os parâmetros de soldagem foram de 325 A no avanço e 260 A no retorno. Com os oscilogramas, Figura 32, foram medidos os tempos de pulso e de base, comparando com os programados, Tabela 3 e Tabela 4.

Tabela 3 - Medições dos tempos de avanço

Medição	ta programado (ms)	ta medido (ms)	Desvio padrão
1	300	300	0,55
2	300	300	
3	300	301	
4	300	301	
5	300	300	

Tabela 4 - Medições dos tempos de retorno

Medição	tr programado (ms)	tr medido (ms)	Desvio padrão
1	200	201	0,55
2	200	200	
3	200	200	
4	200	200	
5	200	201	

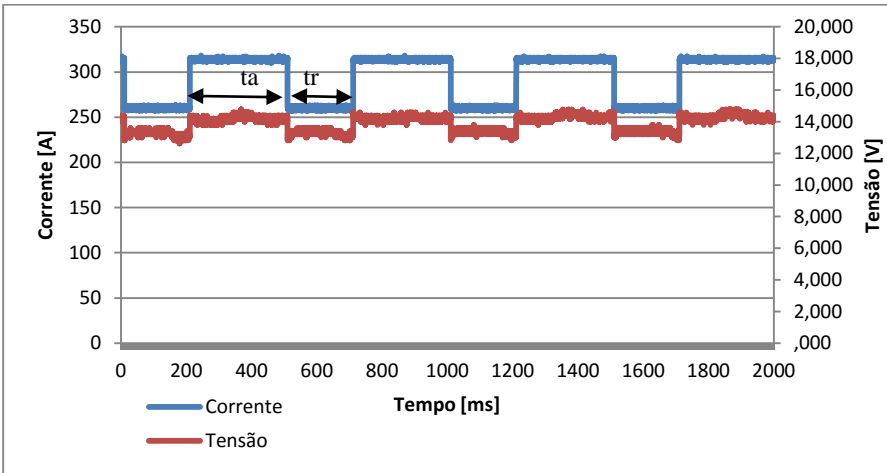


Figura 32 - Oscilogramas de corrente e tensão pulsadas

Os resultados de todos os testes de calibração foram muito satisfatórios, demonstrando que o robô era preciso o suficiente para dar continuidade à pesquisa da soldagem com *switch back* sincronizado no processo TIG.

Apesar de conhecidos os problemas de confiabilidade na execução deste tipo de trajetória, foi programada uma trajetória *switch back* no robô Motoman HP-20, com a finalidade de comparação. Os parâmetros programados foram: avanço de 10 mm com velocidade de 60 cm/min (10 mm/s) e retrocesso de 5 mm com mesma velocidade.

O esperado no teste seria uma velocidade resultante de 20 cm/min (3,33 mm/s), mas como pode ser observado no gráfico da Figura 33, o resultado foi aproximadamente 15 cm/min (2,5 mm/s), cerca de 25% de erro. Estes ensaios enaltecem a importância e a vantagem do desenvolvimento do software de controle para garantir a qualidade e confiabilidade do estudo do processo.

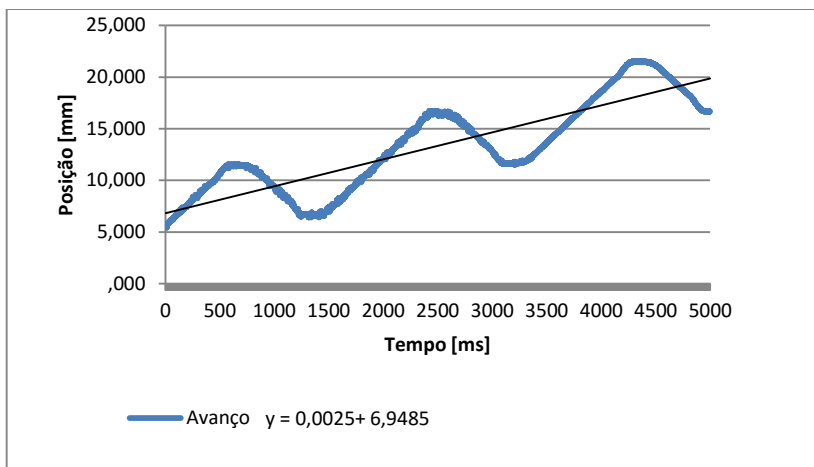


Figura 33 - Trajetória *switch back* programada com 20 cm/min (3,33 mm/s) resultantes no Motoman HP-20

4.2 ENSAIOS DE SOLDAGEM

Todos os testes com soldagem foram realizados nas mesmas condições, descritas no Quadro 1, a abertura do arco foi feita por contato, manualmente com um eletrodo de tungstênio. Os parâmetros foram escolhidos baseados nos testes de Schwedersky [1], que demonstraram que as seguintes condições combinadas configuram um limiar para ocorrência de defeitos com o TIG usado de forma convencional. Cada teste foi executado duas vezes, assim eliminando conclusões precipitadas que possam ocorrer por erros aleatórios.



Figura 34 – Bancada montada utilizada para os ensaios

Quadro 1- Parâmetros e equipamentos usados em todos os testes

Fonte	IMC digitec 600
Eletrodo	Ø 6,35 mm (1/4") de Tungstênio + 2% Tório
Ângulo eletrodo-peça	90°
Distância eletrodo-peça	3 mm
Ângulo de afiação do eletrodo	30° (Figura 35)
Gás	100% Ar
Vasão de gás	15 l/min
Corrente Eficaz	300 A
Tempo de subida da corrente	3 s
Tempo de descida da corrente	3 s
Velocidade resultante de soldagem	0,005 m/s (30 cm/min)
Material base	aço carbono ABNT 1020 12,27mm (1/2") x 300 mm x 75 mm
Posição de soldagem	plana

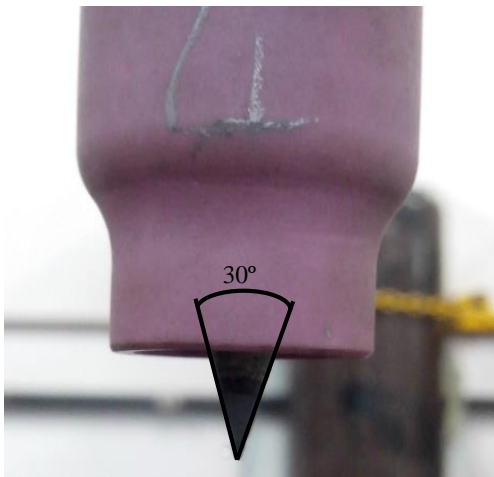


Figura 35 - Afição do eletrodo utilizada em todos os ensaios

O teste realizado com deslocamento linear, como esperado, apresentou formação de defeito característico do *humping* e repetiu-se em novo teste com os mesmos parâmetros, como pode ser visto na Figura 36.

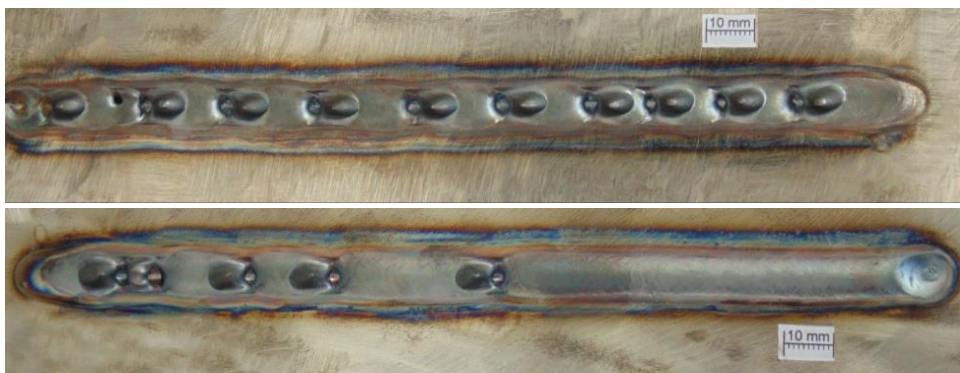
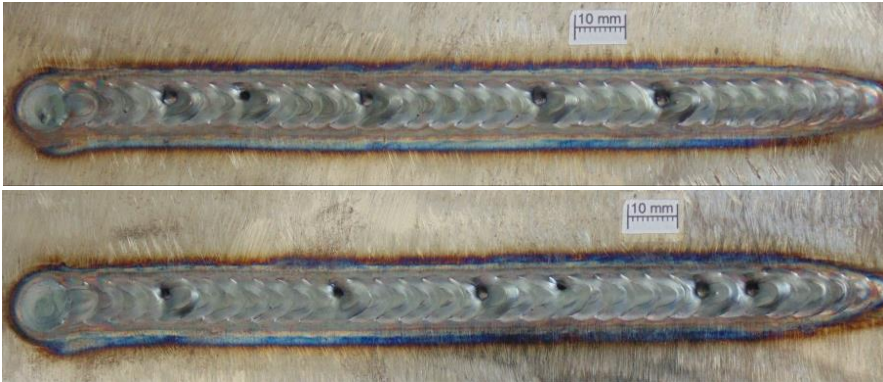


Figura 36 - cordões soldados com deslocamento linear.

Para fazer a soldagem com *switch back* foram calculados parâmetros de corrente, distância e tempo (de avanço e de retorno), Tabela 5, de forma que resultassem na mesma corrente eficaz e velocidade do teste com soldagem linear.

Tabela 5 - parâmetros de soldagem com *switch back* pulsado

	<i>Avanço</i>	<i>Retorno</i>
Corrente	320 A	260 A
Tempo	650 ms	350 ms
Distância	10 mm	5 mm

Figura 37 - Cordões de solda com *switch back* pulsado de acordo com a Tabela 5

Observou-se que apesar de ainda apresentar defeitos, a movimentação do *switch back*, aparentemente, suavizou-os e que talvez se a amplitude de retorno fosse maior, como sugerido no trabalho de Kaneko [19], os resultados poderiam ser melhorados. Para testar tal hipótese foram calculados novos parâmetros de movimentação para uma amplitude maior mantendo os valores resultantes.

Naturalmente, aumentando-se a distância de retorno, tem-se que diminuir os períodos dos movimentos para manter a velocidade resultante.

Tabela 6 - Parâmetros de soldagem com *switch back* pulsado com maior amplitude de movimento

	<i>Avanço</i>	<i>Retorno</i>
Corrente	325 A	260 A
Tempo	300 ms	200 ms
Distância	10 mm	7,5 mm

Os resultados com amplitude maior mostraram resultados significativamente melhores, apesar de apresentar um defeito no segundo corpo de prova, Figura 38.

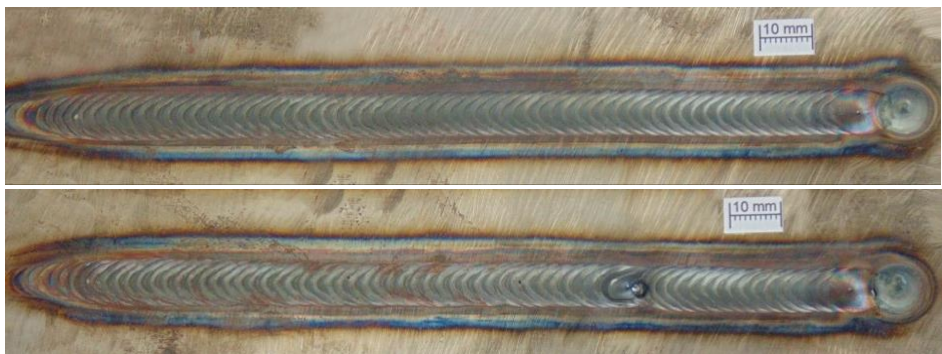


Figura 38 - Cordões de solda com *switch back* pulsado de acordo com a Tabela 6

Para avaliar e comparar o efeito da pulsação sobre o movimento *switch back*, fez-se testes com os mesmos parâmetros da Tabela 6, porém, sem pulsar a corrente, Tabela 7. Os dois corpos de prova apresentaram nenhum defeito. Para sanar dúvidas quanto à repetibilidade do processo, fizeram-se mais quatro ensaios, totalizando seis corpos de prova sem aparecimento de defeitos, Figura 39.

Tabela 7 - parâmetros de soldagem com *switch back* sem pulsação de corrente

	<i>Avanço</i>	<i>Retorno</i>
Corrente	300 A	300 A
Tempo	300 ms	200 ms
Distância	10 mm	7,5 mm



Figura 39 - Cordões de solda com *switch back* de acordo com a Tabela 8

Para avaliar as diferenças, quanto a área fundida, penetração e largura do cordão, foram cortados um corpo de prova de cada parâmetro ensaiado para análise macrográfica, Figura 40. Observou-se que na região cortada, nenhuma peça apresentou defeito. Contudo o corpo de prova com soldagem linear apresentou uma área fundida ligeiramente maior, principalmente devido a maior penetração. Estes resultados condizem com a pesquisa e as simulações realizadas por Kaneko et al.[19], Figura 14, que sugerem que o movimento de *switch back* diminui a penetração do calor na peça e também os efeitos causados pela pressão do arco.

Apesar do defeito ocorrido no cordão soldado com *switch back* pulsado, percebe-se significativa melhora do aspecto superficial em comparação com processo convencional, e a macrografia revelou que este procedimento com pulsação consegue penetração compatível à atingida no processo convencional.

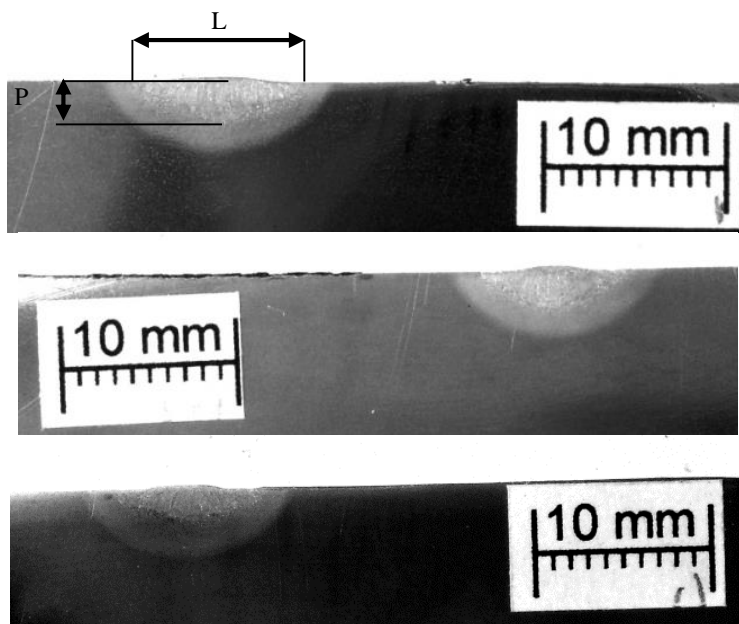


Figura 40 - Macrografias, de cima para baixo: soldagem linear, *switch back* pulsado e *switch back* com corrente constante

Tabela 8 - Resultados das medições das macrografias

Processo	L (mm)	P (mm)	A (mm ²)
Linear	9,3	2,3	16,5
<i>Switch back</i> pulsado	9,0	2,3	14,1
<i>Switch back</i> com corrente constante	9,2	1,9	12,7

Também foram feitos cortes e macrografias no sentido longitudinal dos cordões, com o objetivo de avaliar a regularidade da penetração, Figura 41. Na solda feita com o processo linear, apesar da penetração constante, fica evidente o processo de formação do *humping* descrito por Schwedersky [1]. A solda feita com o processo *switch back* apresenta penetração constante ao longo de toda a região analisada.

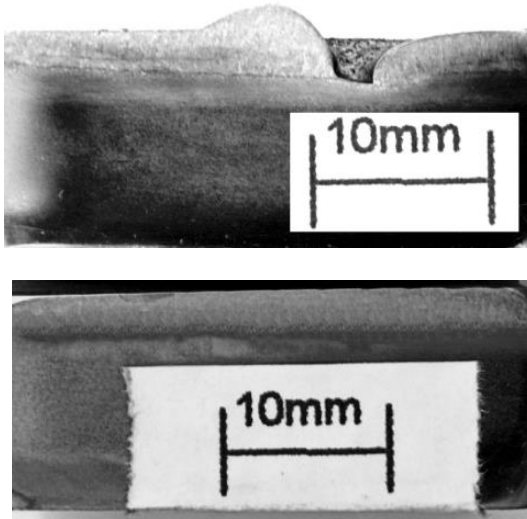


Figura 41 - Macrografias longitudinais, soldagem som TIG linear (acima) e TIG *switch back* com corrente constante (abaixo)

Para tentar avaliar e compreender melhor o processo e o efeito do *switch back*, foram feitas filmagens com câmera térmica dos processos linear, da Figura 36, e *switch back*, da Figura 39.

A câmera FLIR SC7000 foi posicionada perpendicularmente à chapa na parte inferior, filmando o lado oposto ao soldado, Figura 42. As filmagens foram analisadas e as imagens obtidas com o software FLIR ALTAIR, Figura 43. A emissividade da chapa não foi calibrada, apenas considerada a mesma para as duas situações, visto que a finalidade dos testes é apenas comparativa e não de se obter o perfil exato de temperatura.

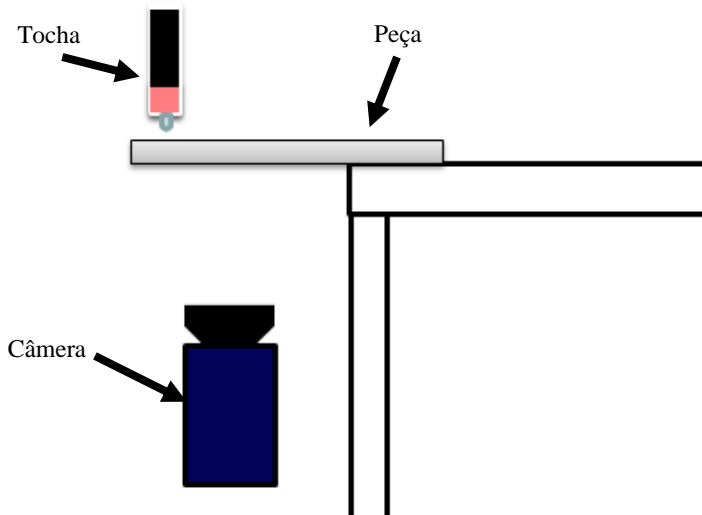


Figura 42 – Montagem da bancada para o ensaio de filmagem térmica

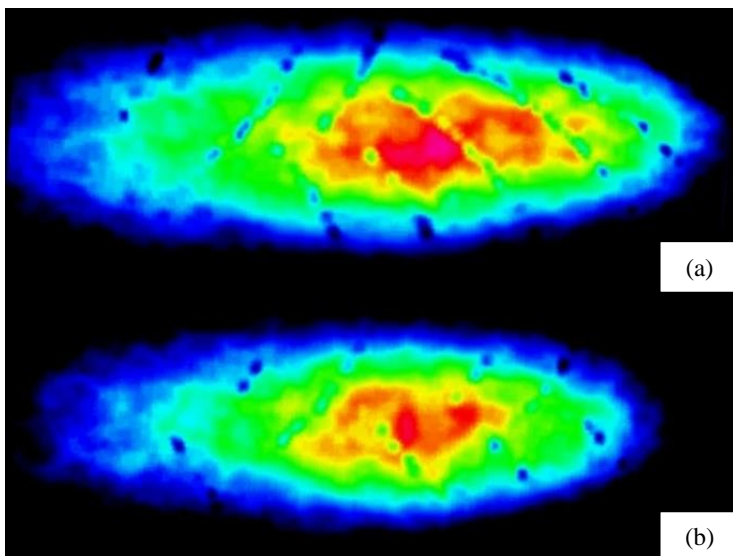


Figura 43 – Distribuição de calor no lado oposto ao soldado, para movimentação linear (a) e *switch back* (b)

Pode-se observar que a área do perfil de distribuição térmica é muito menor para o movimento com oscilação. Novamente confirma-se a tendência do

calor penetrar menos na soldagem com *switch back* em comparação com o movimento linear convencional citada por Kaneko [19].

Os mesmos parâmetros da Figura 36 e da Figura 39 foram testados em juntas de chapas sobrepostas na posição plana, simulando uma aplicação de união similar as aplicadas por Ietka e Schwedersky. As chapas são de aço ABNT 1020 300 mm x 60 mm x 3 mm cortadas a laser. Os resultados da soldagem sem oscilação e com oscilação podem ser vistos na Figura 44 e Figura 45 respectivamente.

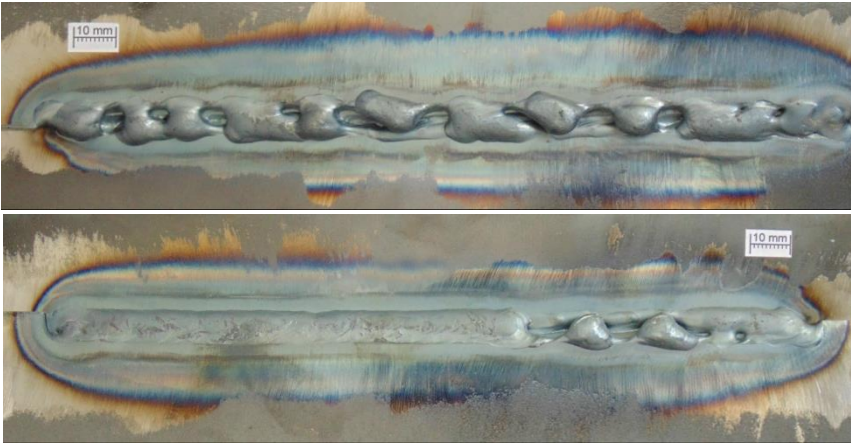


Figura 44 - Soldagem de chapas sobrepostas com movimentação linear

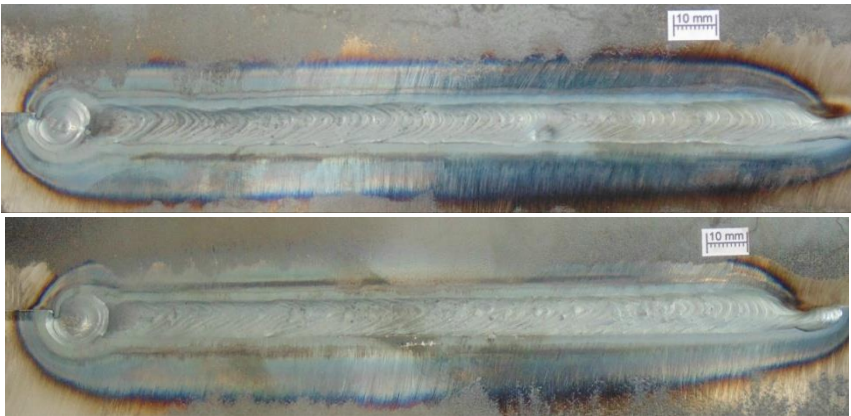


Figura 45 - Soldagem de chapas sobrepostas com oscilação *switch back* de acordo com a Tabela 7

Os resultados em chapas sobrepostas apresentaram o mesmo padrão visto nos ensaios anteriores: soldas descontínuas com a soldagem linear, resolvidas com a utilização da oscilação *switch back* com os parâmetros da Tabela 7.

5 CONCLUSÃO

O trabalho realizado apresentou pesquisa e resultados de diversas áreas do conhecimento de engenharias, partindo do desenvolvimento eletroeletrônico e do software do manipulador, até os testes com a soldagem *switch back* no processo TIG autógeno e a avaliação de seus efeitos na poça de fusão. Dentre a conclusões obtidas destacam-se:

- i. Os robôs industriais comerciais avaliados apresentam certa deficiência para programação de trajetórias especiais de forma intuitiva e confiável, o que dificulta seu uso em áreas como a pesquisa acadêmica e desenvolvimento de inovações em processos de soldagem.
- ii. Desenvolver o próprio software de geração das trajetórias traz vantagens em relação a utilizar robôs industriais comerciais, em especial quanto a confiabilidade da trajetória executada.
- iii. A estratégia da utilização da SPI com CLOCK comum com aos *servo drivers* VSD-e160 mostrou-se eficaz na execução de trajetórias multieixo.
- iv. O programa desenvolvido em C# mostrou-se robusto, rodando com qualidade mesmo em um sistema operacional de uso pessoal *Windows*.
- v. Os testes de verificação das trajetórias geradas pelo robô deixaram claro que tanto o software quanto o hardware se comportaram de forma exata e repetitiva, adequado ao ambiente de pesquisa e desenvolvimento.
- vi. Os resultados dos testes com soldagem *switch back* demonstraram uma forte tendência à diminuição do aparecimento de descontinuidades, melhorando a distribuição do calor e diminuindo os efeitos causados pela elevada pressão do arco, tanto nos ensaios sobre chapa como na união de chapas sobrepostas.
- vii. Quando testado com a amplitude do movimento de retrocesso maior do que a metade do avanço, obtiveram-se os melhores resultados quanto à diminuição da formação de defeitos.
- viii. Os melhores resultados com *switch back* foram obtidos mantendo-se a corrente constante e não a pulsando sincronamente com o movimento.
- ix. Apesar da diminuição dos defeitos, há também significativa diminuição da penetração quando utilizado o método *switch back* com corrente constante, confirmados pelas macrografias

e filmagem térmica. As macrografias sugerem que a pulsação da corrente combinada com o movimento consegue diminuir este efeito.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As sugestões para trabalhos futuros podem dividir-se em melhorias no controlador do robô e aprofundamento do estudo dos efeitos do *switch back* para o TIG.

Sugestões para desenvolvimento do robô:

- i. Melhorar o software de geração de trajetórias para inclusão de múltiplos pontos intermediários com interpolação do tipo *spline*. O programa atual gera apenas trajetórias como segmentos de reta entre os pontos marcados pelo usuário, o que praticamente impossibilita soldagem de superfícies complexas.
- ii. Implementação de código para impedimento de singularidades e de execução de trajetórias além dos limites físicos do sistema. O sistema atual permite a programação de trajetórias com velocidades e acelerações acima das capacidades dos acionamentos.
- iii. Desenvolver um sistema para monitoramento dos encoders enquanto desligado, eliminando a necessidade de zerar os eixos a cada reinicialização.
- iv. Implementação de algoritmos de correção automáticas de trajetórias.
- v. Melhorar a interface gráfica com o usuário, tornando-a mais ergonômica e intuitiva.
- vi. Calibrar a posição “zero” do robô com ferramentas mais adequadas, garantindo o paralelismo e perpendicularidade das juntas.

Sugestões para estudos da oscilação *switch back* no TIG:

- i. Utilizar um sistema específico para oscilação da tocha para acoplar ao flange do robô. Desta forma o robô ficaria responsável apenas pela movimentação linear permitindo testes com velocidades de soldagem maiores.
- ii. Estudar os efeitos da trajetória *switch back* com maiores velocidades e diferentes misturas gasosas ($Ar+He$ ou $Ar+H_2$).
- iii. Estudar os efeitos das variações das velocidades de avanço e retrocesso.
- iv. Estudar a viabilidade de aplicar a técnica *switch back* em situações industriais, como a selagem de compressores estudada por Ietka [2] e Schwedersky[1].

- v. Estudar os efeitos metalúrgicos da utilização da técnica de *switch back*.

REFERÊNCIAS

- [1] SCHWEDERSKY, M. B. **Um Estudo da Eficiência e Produtividade dos Principais Processos de Soldagem a Arco**. [s.l.] dissertação (mestrado em engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2011a.
- [2] IETKA, M. F. **Avaliação da Soldagem TIG no Selamento de Compressores Herméticos para Refrigeração**. [s.l.] dissertação (mestrado em engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010b.
- [3] WEIZENMANN, G. D. S.; DUTRA, J. C.; SILVA, R. H. G. E. Sistema para verificação de trajetórias de oscilação em soldagem automática. **VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, 2014c.
- [4] PIRES, J. N. et al. Welding robots. **IEEE Robotics Automation Magazine**, v. 10, n. 2, p. 45–55, 2003d.
- [5] MESSLER, R. W. **Principles of Welding - Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy**. [s.l.] Wiley-VCH, 1999e.
- [6] NGUYEN, T. C. et al. High speed fusion weld bead defects. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 11, n. 6, p. 618–633, 1 nov. 2006f.
- [7] MENDEZ, P. F. **Order of Magnitude Scaling of Complex Engineering Problems , and its Application to High Productivity Arc Welding**. [s.l.] Tese (doutorado em Engenharia) Massachusetts Institute of Technology, 1999g.
- [8] SICILIANO, B.; KHATIB, O. **Springer Handbook of Robotics**. [s.l.] Springer Berlin Heidelberg, 2008h.
- [9] **The North American Robotics Market, Year 2012 Results**. RIA - Robotics Industries Association, , 2012i.
- [10] PIRES, J. N.; LOUREIRO, A.; BÖLMSJO, G. **Welding Robots - Technology, System Issues and Applications**. London: Springer-Verlag, 2006j.

- [11] CARVALHO, R. S. **Robô CNC para a Automação da Soldagem MIG/MAG em Posições e Situações de Extrema Dificuldade**. [s.l.] dissertação (mestrado em engenharia) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2009k.
- [12] SICILIANO, B. et al. **Robotics - Modelling, Planning and control**. [s.l.] Springer, 2009l.
- [13] SIMAS, H. **Planejamento De Trajetórias E Evitamento De Colisão Em Tarefas De Manipuladores Redundantes Operando Em Ambientes Confinados**. [s.l.] tese (doutorado em engenharia) - Universidade Fderal de Santa Catarina, 2008m.
- [14] BONACORSO, N. G. **Automatização dos processos de medição de superfícies e de deposição por soldagem visando recuperação de rotores de turbinas hidráulicas de grande porte**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, 2004n.
- [15] MORRET, B. **How to Improve Your Welds: Helpful hints for GMAW**. Disponível em: <<http://www.thefabricator.com/article/arcwelding/how-to-improve-your-welds--helpful-hints-for-gmaw>>. Acesso em: 1 out. 2013o.
- [16] ALMEIDA, H. A. L. DE; MOTA, C. A. M. DA; SCOTTI, A. Efeitos do Comprimento de Reversão e do Ângulo de Ataque sobre a Estruturade solidificação do cordão em soldagem MIG/MAG com “Switch Back”. **Soldagem e Inspeção**, v. 17, p. 123–137, 2012p.
- [17] EGUCHI, K. et al. **Sensing of Arc Length and Wire Extension Using Neural Network in Robotic Welding** Rough Sets and Current Trends in Computing. **Anais...**1998q
- [18] YAMANE, S. et al. Feed forward control of back bead and bead height in narrow gap robotic welding. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 10, n. 1, p. 23–26, 1 fev. 2005r.
- [19] KANEKO, Y. et al. Numerical Simulation of MIG Weld Pool in Switch Back Welding. **Journal of the Japan Welding Society**, v. 25, p. 372–380, 2007s.
- [20] DUTRA, J. C. et al. Automating a Wheel Manufacturing Operation. **Welding Journal**, n. June, p. 76–84, 2014t.

- [21] YAMANE, S. et al. Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate. **Science and Technology of Welding and Joining**, v. 9, n. 2, p. 138–148, 1 abr. 2004u.
- [22] PETERS, S. R. **Welder with Positional Heat Control and Method of Using Same**, 2008v.
- [23] DUTRA, J. C. et al. Improving Surfacing Performance with GMAW The synchronized polarity gas metal. **Welding Journal**, n. Maio, p. 42–47, 2013w.
- [24] MARTIN, C. A. **Acionamentos Eletromecânicos em Automação de máquinas e instrumentos**. [s.l.] Universidade Federal de Santa Catarina, [s.d.].
- [25] BONIN, C. **Proposta de um sistema de baixo custo para o controle de movimentos em estruturas multieixos**. [s.l.] dissertação (mestrado em engenharia) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina, 2013y.
- [26] **Fluxeon VSD-E & VSD-XE 160 - For drive revision 2. Manual Ver. 1.05**. Granite Devices, , [s.d.].
- [27] LUTZ, M. H.; SERVICES, S. H. C # and the . NET Framework : Ready for Real Time ? **IEEE Software**, 2003aa.
- [28] BIAGIOTTI, L.; MELCHIORRI, C. **Trajectory Planning for Automatic Machines and Robots**. [s.l.] Springer Verlag, 2008ab.
- [29] **SAP v 4.01 - Manual do Sistema**. IMC Soldagem, , 2005ac. Disponível em: <http://www.imc-soldagem.com.br/manuais/manual_sap_v40.pdf>

ANEXO A - Códigos para geração da trajetória *switch back*

```

double[] cicl_inc(double D, double T)//calcula o incremento
cicloidal
{
    int N = Convert.ToInt32(T / parallel_Time)+1;
    double[] p = new double[N];
    double[] v = new double[N-1];
    double add = Math.PI/(N-1);
    double Ang=0;
    for (int a = 0; a < N; a++)
    {
        p[a] = -C(Ang)*D/2;
        Ang += add;
    }
    for (int a = 0; a < N-1; a++)
        v[a] = p[a+1] - p[a];
    return v;
}

```

```

double[] SB_linha(double distancia, double da, double ta, double
dr, double tr) //calcula uma trajetória em linha
{
    double va = da / ta;
    double vr = dr / tr; // mm/ms
    double vm = (da - dr) / (ta + tr); //velocidade média
mm/ms
    double tempo = distancia / vm;
    double cont = Convert.ToInt32(tempo/ parallel_Time);
    double[] inc = cicl_inc(da, ta);
    double[] dec = cicl_inc(dr, tr);

    int na = Convert.ToInt32(ta / parallel_Time);
    int nr = Convert.ToInt32(tr / parallel_Time);
    List<double> pontos = new List<double>();
    pontos.Add(0);
    int a = 1;
    while (a < cont)
    {
        for (int b=0;b<na;b++)
        {
            double beta;
            if (pontos[a-1]+inc[b]>distancia)
                beta = distancia;

```

```

        else
            beta = pontos[a-1]+inc[b];
        pontos.Add(beta);
        a++;
    }
    for (int b = 0; b < nr; b++)
    {
        double beta;
        if (pontos[a-1]+dec[b]>distancia)
            beta = distancia;
        else
            beta = pontos[a-1]-dec[b];
        pontos.Add(beta);
        a++;
    }
}
double[] C = new double[pontos.Count];
pontos.CopyTo(C);
return C;
}

```

coordenadas[] SB(coordenas inicio, coordenadas final, double da, double ta, double dr, double tr) //calcula trajetória swicth back

```

{
    double deltaX = final.x-inicio.x;
    double deltaY = final.y-inicio.y;
    double deltaZ = final.z-inicio.z;

    double deltaRoll = final.roll-inicio.roll;
    double deltaPitch = final.pitch-inicio.pitch;
    double deltaYaw = final.yaw - inicio.yaw;

    double dist_linear = Math.Sqrt(deltaX * deltaX +
deltaY * deltaY + deltaZ * deltaZ);

    double[] Linha = SB_linha(dist_linear, da, ta, dr,
tr);

    double[,] rot = {{1,0,0},
                    {0,1,0},
                    {0,0,1}};

    rot[0, 0] = final.x - inicio.x;

```

```

rot[1, 0] = final.y - inicio.y;
rot[2, 0] = final.z - inicio.z;

double modulo = Math.Sqrt(rot[0, 0] * rot[0, 0] +
rot[1, 0] * rot[1, 0] + rot[2, 0] * rot[2, 0]);

rot[0, 0] = rot[0, 0] / modulo;
rot[1, 0] = rot[1, 0] / modulo;
rot[2, 0] = rot[2, 0] / modulo;

double Calpha = rot[0, 0]/Math.Sqrt(rot[0, 0] *
rot[0, 0] + rot[1, 0] * rot[1, 0]);
double Salpha = rot[1, 0]/Math.Sqrt(rot[0, 0] *
rot[0, 0] + rot[1, 0] * rot[1, 0]);

double Sbeta = rot[2, 0];
double Cbeta = Math.Sqrt(rot[0, 0] * rot[0, 0] +
rot[1, 0] * rot[1, 0]);

double beta = -atan2(Sbeta, Cbeta);

double[,] rot_beta = {{C(beta), 0, S(beta)},
                      {0, 1, 0},
                      {-S(beta), 0, C(beta)}};

double[,] rot_alpha = {{Calpha, -Salpha, 0},
                       {Salpha, Calpha, 0},
                       {0, 0, 1}};

rot = Matrix.Multiply(rot_alpha, rot_beta);

coordenadas[] coord = new coordenadas[Linha.Length];
for (int a=0; a<Linha.Length; a++)
{
    double[] vet = {Linha[a],0,0};
    if (a == 0)
        coord[a].dir = true;
    else
    {
        if (Linha[a]>Linha[a-1])
            coord[a].dir = true;
        else
            coord[a].dir = false;
    }
}

```

```
vet = Matrix.Multiply(rot, vet);
coord[a].x = inicio.x + vet[0];
coord[a].y = inicio.y + vet[1];
coord[a].z = inicio.z + vet[2];
coord[a].roll = inicio.roll;
coord[a].pitch = inicio.pitch;
coord[a].yaw = inicio.yaw;
coord[a].weldOn = true;
}
return coord;}
```


ANEXO B – Certificado de calibração do sensor de deslocamento

	Laboratório de METROLOGIA DIMENSIONAL Pertencente à Rede Brasileira de Calibração	 CAL 0034
<h1>Certificado de Calibração</h1>		
Data da Calibração: 27/10/14	n. 3608/14	
Data da Emissão: 27/10/14		
Página: 1 de 2		
1. CONTRATANTE: UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA Conjunto Universitário, s/n - Florianópolis - SC		
2. SOLICITANTE: O mesmo		
3. COMPARADOR ELETRÔNICO DE DESLOCAMENTO CALIBRADO (SMC):		
3.1. TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO: N° Série (fabricante): 87 132302420 N° Identificação (solicitante): 87 132302420 Intervalo de Medição: (0 a 50) mm Resolução: 0,01 mm		
4. PADRÃO UTILIZADO (SMP):	5. PROCEDIMENTO INTERNO DE CALIBRAÇÃO: PC-124	
4.1. Máquina de Medir Longitudinal N° Registro (CERTI): RL 0630 U: 0,00019 mm Rastreabilidade Metrológica: Certificado de Calibração CERTI 018214, de 31/01/14, válido até 01/15.	Foram realizados no mínimo 3 ciclos de medição em pontos distribuídos em toda a faixa de medição do comparador eletrônico de deslocamento, no sentido crescente e decrescente. O comparador foi montado em oposição ao sensor do SMP, cumprindo o princípio de Albee. Os pontos de medição pré-estabelecidos foram referenciados pelo comparador, verificando-se a indicação no SMP.	
Observações: Condições Ambientais Durante a Calibração: - Temperatura: (20,0 ± 0,3) °C - Umidade Relativa do Ar: (50 ± 10) %RH	A incerteza expandida de medição (U) relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k, o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (ν_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e ν_{eff} são apresentados na tabela de resultados.	
<small>Este certificado atesta aos requisitos de acreditação pelo IAP04, que avaliou o desempenho do laboratório e compromete sua responsabilidade a padrões nacionais de medição. A parte é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo (AR-M) entre os Laboratórios de Metrologia Dimensional e de Acústica da Rede Brasileira de Calibração. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao momento e condições em que foi emitido, não sendo válido e suscetível de ser utilizado para fins de calibração em qualquer outro momento de controle metrológico. A CERTI assume a responsabilidade de emitir certificados, desde que qualquer órgão sempre obedecer ao Conselho Arbitral. O órgão de metrologia, quando notificado, não faz parte integrante do procedimento de acreditação.</small>		
Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI		
Companhia Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC	Setor C CEP: 88040-970 Florianópolis - SC Caixa Postal 5013	Tel.: +48 3238 2124 Fax: +48 3238 2119 metrologia@certi.org.br www.certi.org.br
Fundação CERTI CNPJ 78.626.363/0001-24 Insc. Est. 251.378.241 Insc. Mun. 60.111-6		

Código do Nome da Característica Valor
 RL 0533 Incerteza 0,0003000

PLANILHA DE CÁLCULO DE INCERTEZAS							Comp. (mm): V. temp.:	
Serviço n.º:							12	0,3
360B/74	COMPONENTES DE INCERTEZA						U [mm]	V
U_{inf}	lim do SMP	(mm)	Prob.	Divisor	C	0,00015	50	
U_{temp}	Varição da temperatura ambiente	0,00004	Normal	1,732	1	0,00002	Infinito	
U_{A}	Incerteza padrão tipo A	0,00776	Normal	1,000	1	0,00776	3	
$U_{\text{Rescomp. Est.}}$	Erro de res. Comp. Est. (1/2 div. de escala)	0,00500	Retangular	1,732	1	0,00289	Infinito	
$U_{\text{Res. ABBE}}$	Erro de resolução do SMP	0,00500	Retangular	1,732	1	0,00289	Infinito	
$U_{\text{alinh.}}$	Erro de alinhamento	0,00003	Retangular	1,732	1	0,00002	Infinito	
	Erro na Determinação da Correção	0,00010	Retangular	1,732	1	0,00006	Infinito	
U_c	Incerteza Combinada		Normal			0,00877	5	
U_{95}	Incerteza Expandida		k = 2,55			0,0200		
							0,0300	

MMETRO