

# Desenvolvimento de um braço robótico portátil para a execução de soldagens automatizadas

Nelso Gauze Bonacorso<sup>1</sup>, Ivan Luiz Hubert<sup>2</sup>, Vitor Pinto da Cunha<sup>3</sup>, Igor Anes Romero<sup>4</sup>, Giancarlo Hedlund Rosa<sup>5</sup>, Laís Cindy Krüger<sup>6</sup>, Rafael Pereira Pires<sup>7</sup>, Maurício Cesar Marcolin de Campos<sup>8</sup>

<sup>1</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Professor DAMM, Campus Florianópolis, [nelso@ifsc.edu.br](mailto:nelso@ifsc.edu.br)

<sup>2</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Mestrando DAMM, Campus Florianópolis, [ivan.hubert@gmail.com](mailto:ivan.hubert@gmail.com)

<sup>3</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Aluno IC DAMM, Campus Florianópolis, [bls\\_vitor@hotmail.com](mailto:bls_vitor@hotmail.com)

<sup>4</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Aluno IC DAMM, Campus Florianópolis, [igor\\_romero01@hotmail.com](mailto:igor_romero01@hotmail.com)

<sup>5</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Aluno IC DAMM, Campus Florianópolis, [gian.falcko@yahoo.com.br](mailto:gian.falcko@yahoo.com.br)

<sup>6</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Aluna IC DAMM, Campus Florianópolis, [laiskruger11@hotmail.com](mailto:laiskruger11@hotmail.com)

<sup>7</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Mestrando DAMM, Campus Florianópolis, [rafalepp@gmail.com](mailto:rafalepp@gmail.com)

<sup>8</sup>Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), Aluno IC DAMM, Campus Florianópolis, [mauriciocmcampos@gmail.com](mailto:mauriciocmcampos@gmail.com)

**RESUMO:** O presente artigo trata do projeto e construção de um braço robótico cartesiano dedicado a execução de procedimentos tradicionais e avançados de soldagem a arco elétrico. Este equipamento mecatrônico possui uma cadeia cinemática mista de cinco graus de liberdade. Os três primeiros eixos do robô (X, Y e Z) são lineares com conexões do tipo série e os últimos eixos (A e B) produzem movimentos angulares pelo acionamento paralelo. Suas vantagens em relação aos manipuladores atuais e os robôs antropomórficos estão na flexibilidade de execução das mais variadas trajetórias de soldagem, na facilidade de operação, leveza, facilidade de transporte e instalação em campo. Possui rigidez, grande velocidade de operação e, por ser modular, pode ter seu eixo X estendido. Com estas vantagens será possível produzir soldagens de união ou de revestimentos com qualidade e produtividade.

**Palavras-chave:** Automação da soldagem, Cadeia cinemática mista, Metodologia de projeto.

## Introdução

A soldagem a arco elétrico é o processo de fabricação e também o de manutenção mais utilizado em vários setores da economia brasileira, tais como: automobilístico, naval, elétrico (recuperação por revestimento de caldeiras em termoelétricas e de turbinas hidráulicas em hidroelétricas), transporte e armazenagem de petróleo e gás, etc. Com exceção do automobilístico,

em todos os outros setores o tipo de soldagem predominante é o manual onde a produtividade é baixa e a qualidade das uniões depende fortemente da habilidade do soldador. Essa realidade gera dois grandes problemas. O primeiro é a dependência de mão-de-obra especializada de soldadores, porém há cada vez menos soldadores preparados para o mercado de trabalho. Este fato é a causa raiz do segundo problema que é a busca por qualidade e produtividade, que acaba levando a necessidade de investimento em equipamentos de movimentação automática como robôs e manipuladores dedicados à soldagem.

A escassez de soldadores no Brasil é explicada pela forma de contratação deste profissional que, na maioria das vezes, é somente por obra e pela natureza altamente insalubre desta profissão: exposição direta à radiação emitida pelo arco elétrico, gases tóxicos provenientes de reações químicas e respingos de gotas de metal fundido. Além disso, o soldador realiza muitas tarefas como ajustar parâmetros de soldagem, controlar a qualidade do cordão de solda e guiar a tocha em posições desconfortáveis. O conjunto destas tarefas deixam os soldadores fadigados rapidamente refletindo em uma baixa produção. Um exemplo típico é a construção naval, onde 70% dos estaleiros nacionais utilizam somente a soldagem manual. Com a crescente demanda neste setor, será necessário, segundo Fedele (2000), sanar os problemas mencionados para tornar a indústria naval mais competitiva em termos de preço e qualidade do que os concorrentes internacionais. Cabe ressaltar que essa vantagem dos concorrentes internacionais é principalmente devido ao uso de procedimentos automáticos de soldagem na maioria de suas aplicações.

Uma solução natural para o aumento da competitividade do setor naval brasileiro seria o uso de robôs industriais de soldagem. Entretanto, o problema na utilização destes robôs de soldagem segundo Pires et al. (2006) está interligado ao fato dos mesmos terem dificuldades de operação em ambientes confinados, espaço de trabalho reduzido, 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 como as de fabricação de automóveis.

Para a soldagem automática em campo, é aconselhável, segundo os fabricantes internacionais (Dyna Torque (2013), Polysoude (2013) e Bug-o Systems (2013)) o uso de manipuladores dedicados com uma concepção mecânica diferenciada. Esta por sua vez, tende a suprir os requisitos de robustez, facilidade de transporte e instalação. Entretanto, a grande maioria dos manipuladores comerciais citados não são suficientemente flexíveis, rápidos e precisos para executar procedimentos mais avançados da soldagem a arco elétrico. Os manipuladores de soldagem que se

aproximam destas características desejáveis são provenientes do exterior com elevado custo de aquisição e de manutenção, o que torna pouco atrativo a sua aquisição.

O termo flexível citado refere-se à capacidade que o manipulador possui de posicionar e orientar a tocha de soldagem com o objetivo de executar deposição de material em ambiente confinado e nas distintas posições de soldagem: plana, horizontal, vertical e sobre cabeça. Outro aspecto desejável da flexibilidade é a capacidade que o manipulador possui em se adaptar ao comprimento da junta a ser preenchida. A expansão de seu curso com o uso de trilhos modulares é a forma geralmente encontrada de atender a esse requisito.

A qualidade de ser rápido, como citado anteriormente, significa o manipulador executar deslocamentos com velocidade da ordem de 0,5 m/s para minimizar os tempos gastos em posicionar a tocha no início de cada cordão de solda. Nos movimentos de oscilação da tocha nos sentidos longitudinal ou/e transversal do cordão de solda são também requeridas velocidades desta ordem dos respectivos eixos para satisfazer os parâmetros de frequência e amplitude de oscilação.

A folga entre as partes móveis das transmissões de movimento de cada eixo do manipulador e a falta de rigidez de sua estrutura mecânica reduz a precisão de posicionamento da tocha citada anteriormente e, conseqüentemente, limita o desempenho do equipamento. Uma das conseqüências visíveis destes problemas mecânicos nos manipulador é o excesso de respingo em peças soldadas durante o movimento de oscilação da tocha que, além do desperdício de material, representa uma redução de qualidade.

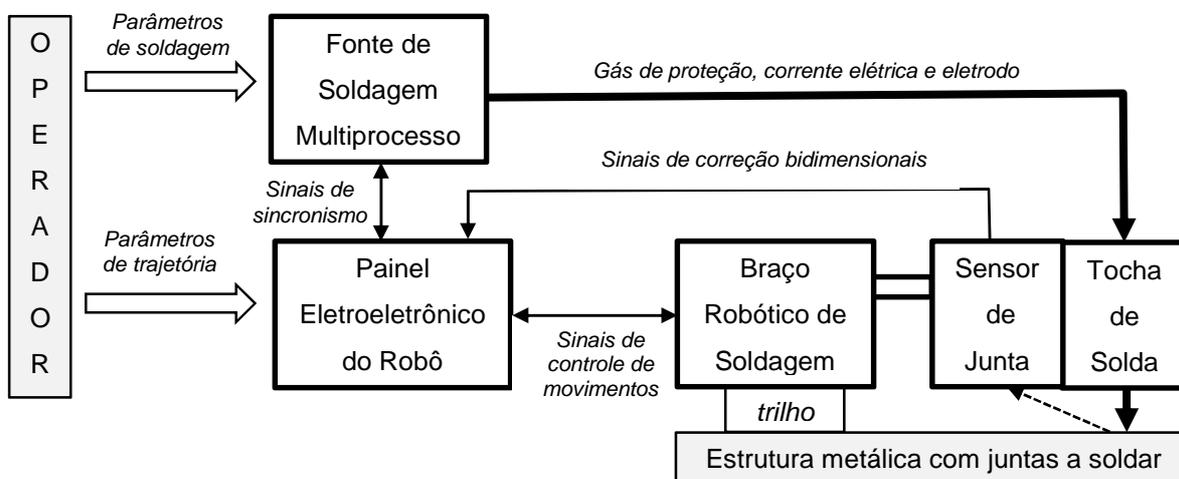
A comunicação limitada ou inexistente com a fonte de soldagem e o sensor de seguimento de junta é outro aspecto que inviabiliza a execução de procedimentos avançados de soldagem a arco elétrico. Geralmente, os manipuladores comerciais apenas fornecem sinais de comando de ligar e desligar o arco elétrico não oferecendo a possibilidade de enviar comandos importantes para a fonte como o da troca de parâmetros de soldagem ou de processo de forma sincronizada com a trajetória da tocha. Tal sincronismo, de acordo com a literatura, proporciona vantagens referentes à qualidade e produtividade tanto de procedimentos de preenchimento com passe de raiz (YAMANE et al., 2004) quanto os de revestimento de superfícies (DUTRA et al., 2013).

Na construção naval e também nos outros setores de fabricação por soldagem a arco elétrico, as juntas são preparadas geralmente sem o controle de qualidade dimensional. Desvios de posicionamento, horizontal e vertical, da linha central da junta e excesso ou falta de afastamento, *gap*, são alguns exemplos de problemas dimensionais nas juntas. Além disso, as juntas sofrem alterações de geometria e mudanças de posição quando soldadas (AWS D3.5, 2006), evidenciando ainda mais, a necessidade de correção da trajetória original durante a execução da soldagem.

Apenas equipamentos automáticos, como robôs ou manipuladores, não é garantia de sucesso nos procedimentos de soldagem, devido aos problemas supracitados referentes às juntas. Assim, para garantir alto índice de qualidade é preciso integrar a estes equipamentos dispositivos para identificar as variações dimensionais das juntas e realizar as devidas correções na trajetória de soldagem. Essa correção de trajetória de soldagem pode ser executada de duas formas: manual ou automática.

Na forma manual, o operador do sistema fica sempre olhando a execução do cordão de solda e realiza, quando houver necessidade, a correção tanto na velocidade de soldagem quanto no posicionamento e na orientação da tocha. Esse recurso de correção, existente na maioria dos manipuladores de soldagem, é realizado via interface homem-máquina (IHM) conectada ao painel de controle de movimento do manipulador. A desvantagem desta forma de correção é que o operador torna-se um dispositivo funcional de um único sistema ficando impossibilitado de operar outros sistemas de soldagem em paralelo a fim de se obter maior produtividade. A forma automática de seguimento de junta é um recurso que não existe na maioria dos manipuladores de soldagem. Ela pode ser implantada pela leitura direta das variáveis do arco ou pelo uso de um sensor externo de junta como os de tecnologia laser.

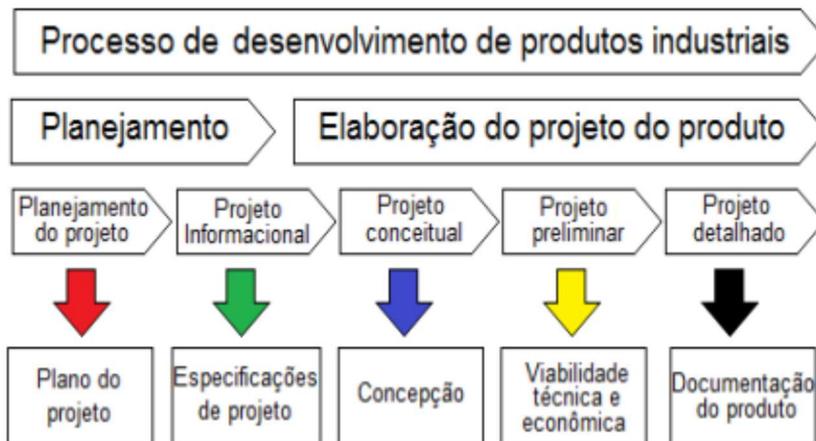
Com base no supracitado, conclui-se que não há uma solução robusta em termos de sistema robotizado portátil dedicado à soldagem que possa executar os procedimentos necessários para o aumento de qualidade e produtividade. Assim, o presente artigo descreve o desenvolvimento de um braço robótico de soldagem e seu painel eletroeletrônico, Figura 1, para a execução de procedimentos, tradicionais e avançados, de soldagem automatizada.



**Figura 1:** Diagrama funcional do sistema robotizado de soldagem proposto.

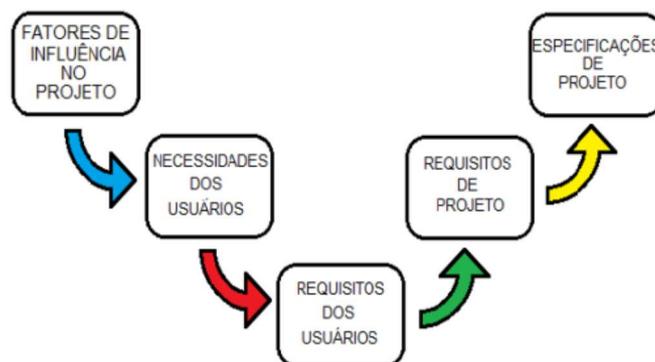
## Metodologia de Desenvolvimento

O desenvolvimento deste braço robótico seguiu o modelo de referência do PRODIP - Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos (Back, 2008) nas fases de planejamento do projeto, projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado, Figura 2.



**Figura 2:** Sequência de etapas do processo de desenvolvimento de produtos industriais.

No projeto informacional, através da ferramenta QDF - *Quality Function Deployment* foram definidas as especificações de projeto baseadas nos requisitos operacionais das aplicações, Figura 3, tanto para o braço robótico quanto para o seu painel eletroeletrônico. Nesta fase, também foi realizada uma busca das especificações técnicas dos equipamentos comerciais.



**Figura 3:** Fluxo de informações na fase do projeto informacional.

As especificações de projeto do braço robótico foram: cadeia cinemática modular com cinco graus de liberdade, servo acionamento elétrico com freio e controle em malha fechada de posição, transmissões de movimentos isentos de folgas mecânicas, resolução menor que 0,1 mm para os eixos lineares e, menor que 0,05 graus para os eixos rotativos, velocidade de posicionamento da

tocha de soldagem maior que 600 mm/s, massa total de 12 kg com capacidade de carga maior que 3 kg, possibilidade de expansão por trilho modular linear, espaço mínimo de trabalho de 1000 mm em X, 200 mm em Y e 100 mm em Z com capacidade mecânica de execução de oscilações transversais, longitudinais e combinadas.

As especificações de projeto do painel eletroeletrônico foram: compacto e modular para facilitar o transporte e manutenções, hardware de PC, servo drivers com interpolação interna e comandos de movimento em alto nível para a criação de softwares para parametrização, geração e correção de trajetória de soldagem, correção de trajetória de soldagem em tempo menor que 50 ms, geração de trajetórias com ou sem oscilação da tocha, geração de sinais de sincronismo vinculados com a trajetória para fonte de soldagem e equipamentos periféricos, interface com a fonte de soldagem para envio do comando de ligar/desligar o arco, receber o sinal de confirmação de arco aberto e envio de sinais para troca de parâmetros ou processo de soldagem de forma sincronizada com a trajetória gerada, interface com o operador para programação e correção manual da trajetória de soldagem, interface com o sensor de seguimento de junta para receber os sinais elétricos de correção bidimensional da posição da tocha de soldagem e circuito de proteção do sistema robótico.

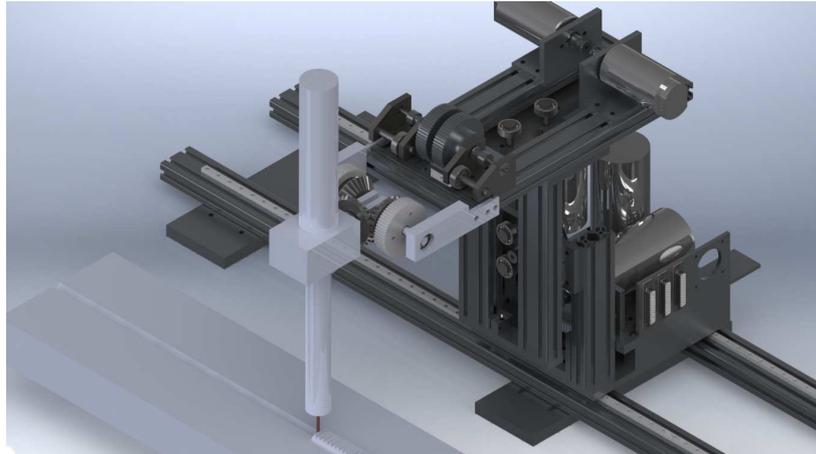
## **Descrição do Desenvolvimento dos Módulos**

Com base nestes dois conjuntos de especificações de projeto, o desenvolvimento do produto foi dividido nos módulos: mecânico, eletroeletrônico e de programação. Os dois primeiros módulos, tema deste artigo, foram desenvolvidos simultaneamente, enquanto que o módulo de programação está atualmente em desenvolvimento.

### **Módulo Mecânico**

Para facilitar a fabricação do manipulador foi usado em seu projeto perfis de alumínio 20x20 mm e 20x40 mm além de guias lineares e patins, Figura 4. O robô possui os eixos lineares de posicionamento X, Y e Z responsáveis pelo posicionamento e também possui os eixos de *Pitch* e *Roll* para orientação da tocha de soldagem.

O movimento nos eixos lineares Y e Z é feito por meio de servo motores DC sem escova e a transmissão utilizada é feita por meio de polia e correia dentada fechada, aumentando o torque devido à utilização de uma redução 3:1. Para fazer a transição do movimento rotacional da saída do redutor para o movimento linear Y e Z, foram usadas transmissão de movimento do tipo polia e correia dentada aberta.



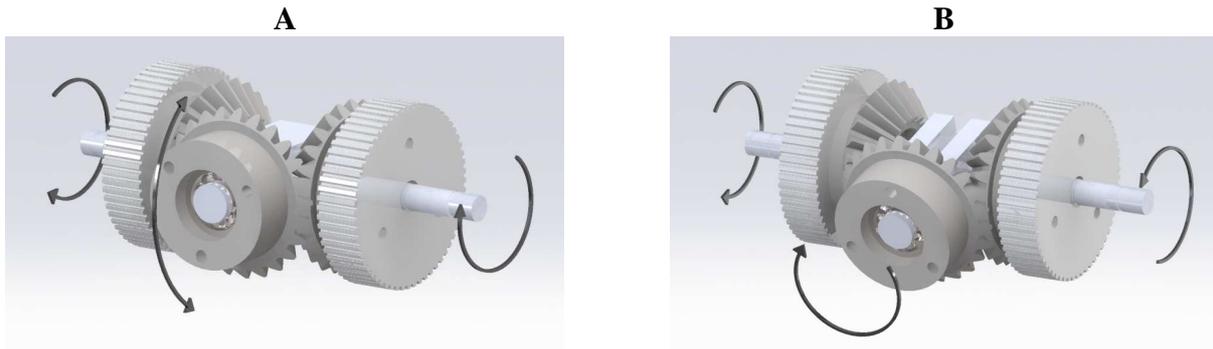
**Figura 4:** Modelo CAD da cadeia cinemática do robô cartesiano.

Para o movimento no eixo linear X foi desenvolvido uma concepção inovadora com a utilização de correia e polia dentada e uma cremalheira com o mesmo perfil de dente de uma polia, Figura 5. Esse sistema de transmissão de movimento é isento de folga e, cada rotação do servo motor produz um deslocamento de 10 mm do eixo X.



**Figura 5:** Foto do sistema de transmissão de movimento do eixo X.

Para orientação da tocha foi utilizado uma cadeia cinemática paralela para produzir os movimentos angulares de *pitch* e *roll* num espaço reduzido, Figura 6. Neste mecanismo são usadas três engrenagens cônicas. Duas dessas engrenagens são acionadas por dois servos motores via transmissão de movimento do tipo polia e correia dentada. Por sua vez, a engrenagem do flange do robô é movimentada pelo acoplamento com as duas primeiras engrenagens. Ao acionar os servos motores em sentido contrários de rotação o movimento de orientação realizado pelo flange é o *pitch*, Figura 6A, enquanto que se os motores girarem no mesmo sentido o movimento de orientação produzido será o *roll*, Figura 6B.



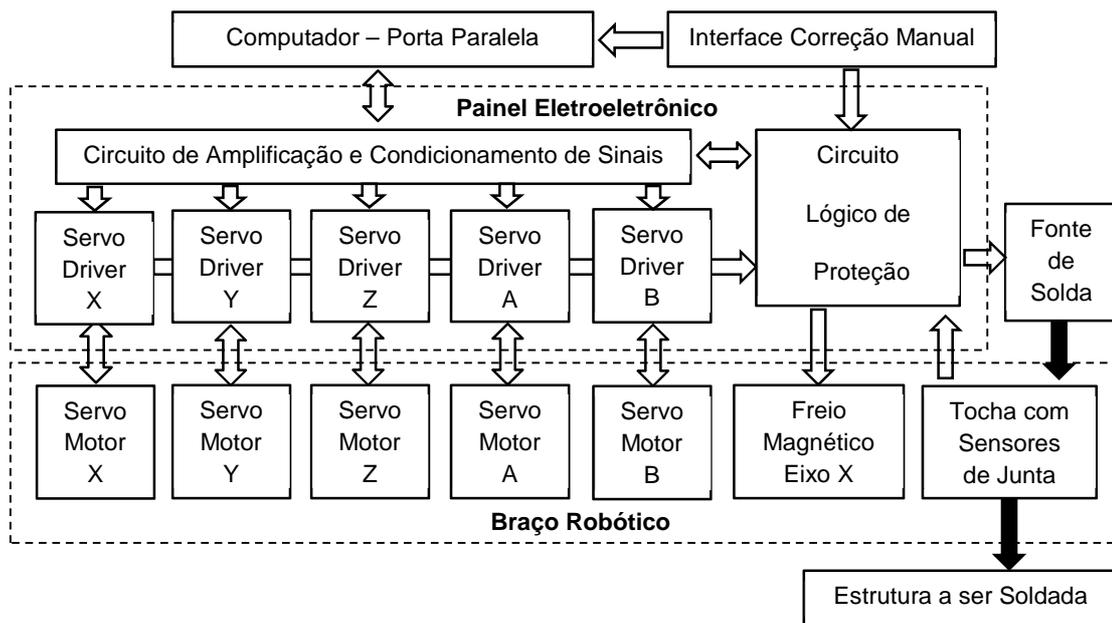
**Figura 6:** Movimentos de orientação do flange do robô: em A o *pitch* e em B o *roll*.

### Módulo Eletroeletrônico

Para o melhor entendimento do funcionamento do braço robótico pela equipe de desenvolvimento foi construído um diagrama funcional, Figura 7, com as referidas comunicações entre os componentes deste sistema automático de soldagem.

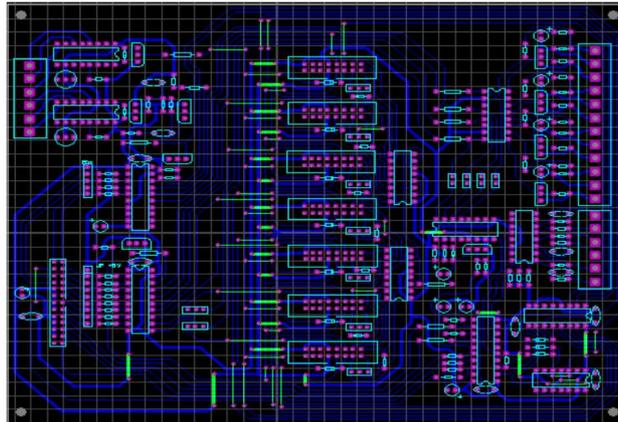
O operador do sistema inicialmente define na fonte de soldagem o processo a ser aplicado e seus parâmetros. No computador o operador configura a trajetória de soldagem e pode corrigir seus parâmetros de movimento em tempo de execução via a interface de correção manual.

Foi projetado, Figura 8, e construído a placa eletrônica do circuito de amplificação e adequação de sinais, conforme pode ser visto na porta do painel eletroeletrônico da Figura 9, devido à incompatibilidade entre os sinais elétricos de entrada e de saída da porta paralela do PC e os dispositivos: servos drivers e o circuito lógico de proteção.



**Figura 7:** Diagrama de blocos funcional do robô cartesiano de soldagem.

Os servos drives VSD-E do fabricante Granite Devices foram usados em função de suas características: suportar vários tipos de motores (passo, servo DC com e sem escovas e servo AC) com potência até 2 HP, aceita comunicação com o controlador via SPI, opção de diferentes modos de controle (posição, velocidade e torque), e busca a posição zero eixo sem o uso de sensor elétrico.



**Figura 8:** Layout da placa do circuito de amplificação e adequação de sinais elétricos.

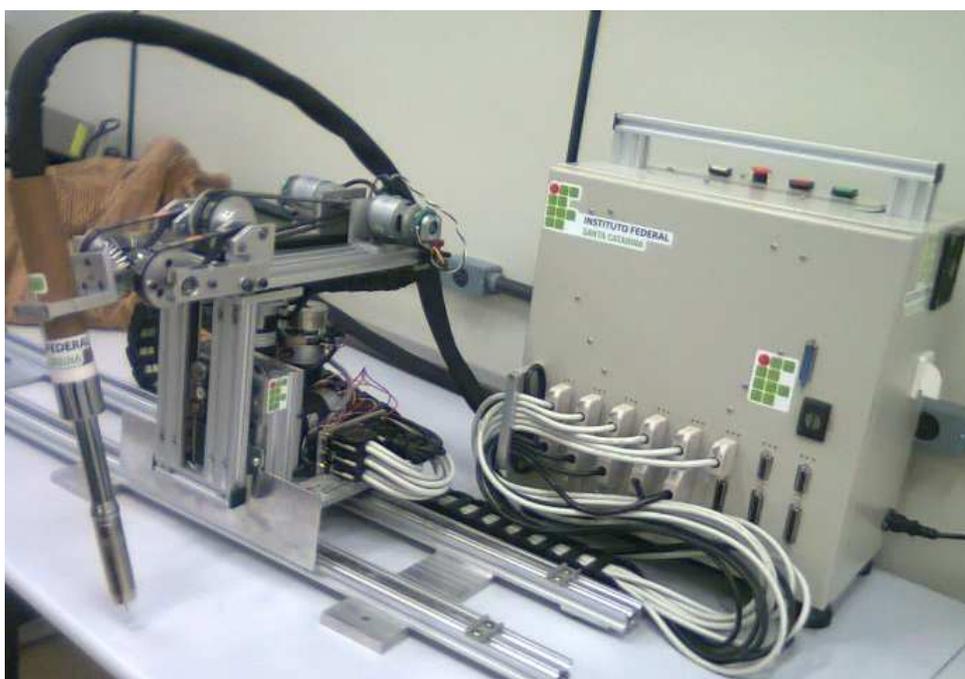
Foi também projetado e construído um painel eletroeletrônico do braço robótico, Figura 9, a partir de um gabinete comercial em aço de 400 x 400 x 250 mm para fixar e proteger as fontes de tensão contínua, os componentes elétricos, as placas eletrônicas e o sistema de refrigeração.



**Figura 9:** Interior do painel eletroeletrônico.

## Resultados Experimentais

Inicialmente foi realizada a integração do módulo mecânico com o eletroeletrônico, conforme mostra a Figura 10. Para isso, foi realizada em primeiro lugar a inserção dos parâmetros dos motores dos eixos do robô via o software *GDtool* fornecido pelo fabricante do servo driver. Os principais parâmetros fornecidos foram: tipo de motor, constante térmica, faixa de tensão elétrica, corrente elétrica média e de pico, número de linhas do encoder, faixa operacional de velocidade e aceleração.

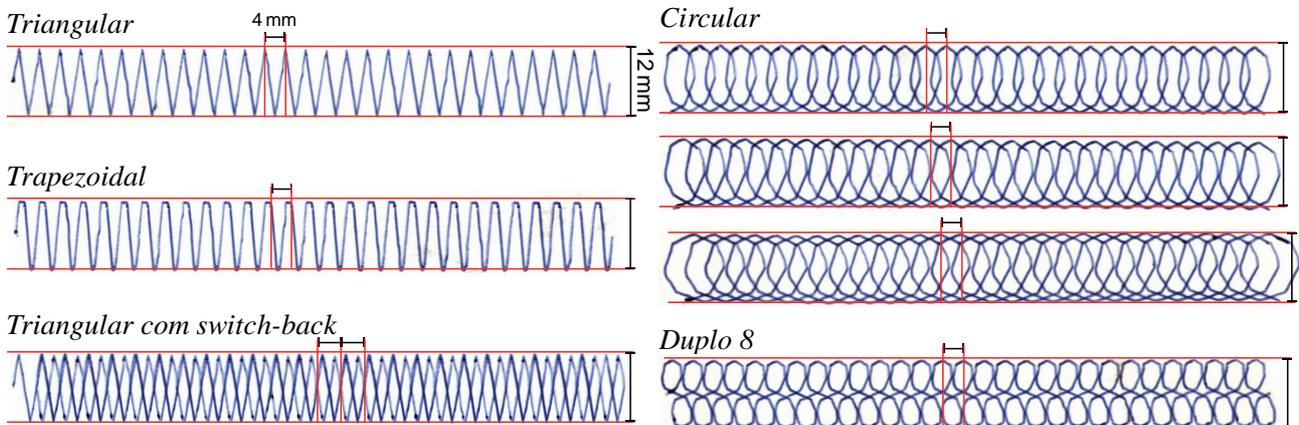


**Figura 10:** Braço robótico de soldagem integrado ao painel de controle de movimento.

Em segundo lugar foi definido para cada um dos cinco motores os valores do compensador PID da malha fechada de controle de posição. Esses valores foram obtidos mediante ensaio de movimento com entrada em degrau de posição com posterior análise da resposta gerada, gráfico posição versus tempo do software. Em terceiro lugar foi configurado a parametrização da busca da posição zero, home, de cada eixo do robô. Neste desenvolvimento não foi utilizado sensor elétrico para detectar essa posição e, sim, a determinação via aumento do erro de posição quando o eixo alcança o início do curso do eixo. Na sequência, foi usado um segundo software do fabricante denominado *SimpleMotion* para testar os comandos de home e de movimentar eixo com posição e velocidade definidas.

Os ensaios de funcionalidade do braço robótico foram divididos em dois tipos, com e sem execução de soldas. A princípio foram conduzidos sem a tocha de soldagem. Uma caneta foi

acoplada ao equipamento e, sobre uma folha de papel, Figura 11, verificou-se a repetição dos movimentos enviados via o computador.

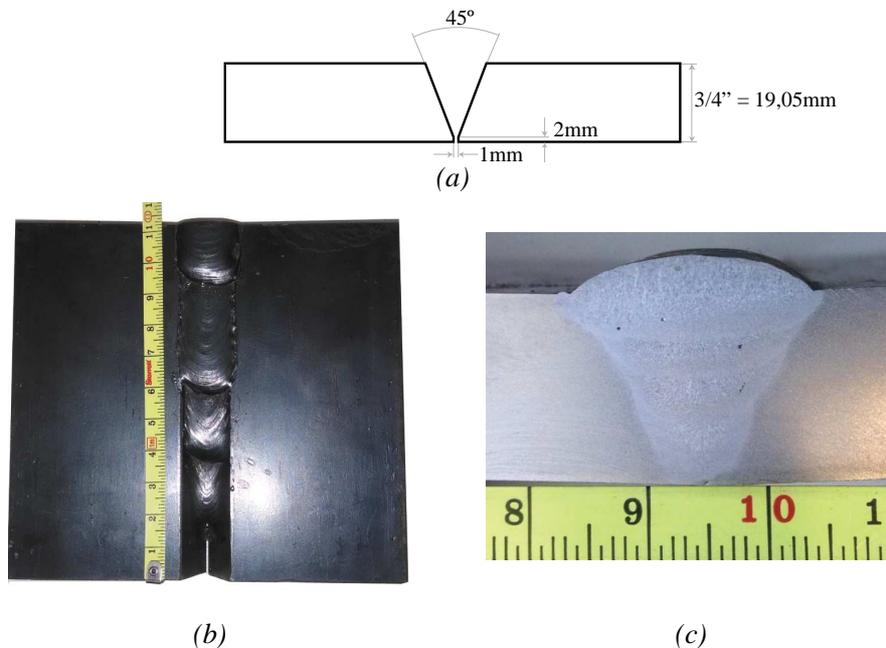


**Figura 11:** Plotagem das trajetórias com caneta afixada ao braço do robô.

Foram executadas as trajetórias triangular, trapezoidal, triangular com *switch back*, circular e duplo oito, como se vê na Figura 11. Todas elas com o mesmo comprimento de onda, de 4 mm, a mesma amplitude, de 12mm, e mesma velocidade de soldagem, de 1mm/s. Na trajetória trapezoidal, o tempo de parada do eixo transversal na extremidade superior é igual ao dobro do inferior. A trajetória triangular com *switch back* foi executada com duas oscilações transversais de avanço por ciclo somando 8 mm de comprimento, sendo o recuo, portanto, executado com uma oscilação de 4 mm. As três circulares foram executadas com diferentes sobreposições, respectivamente, um terço, um meio e dois terços. A trajetória em duplo oito foi construída com base na circular de um meio de sobreposição. Como se pode notar, os erros são desprezíveis, especialmente para soldagem a arco elétrico, em que há maior tolerância a desvios, já que o calor mantém o metal fundido em uma região que circunda o ponto de incidência.

Com o propósito de avaliar o braço robótico foi realizado uma soldagem de topo com chanfro em “V” de 45° na posição plana em chapas com 19,05 mm de espessura, Figura 12a. A soldagem foi realizada com gás de proteção 98% Ar + 2% O<sub>2</sub> com vazão de 18 l/min e, como metal de adição, o arame ER-70S com 1mm de bitola e velocidade de alimentação de 15 m/min. A fonte de soldagem foi programa no modo tensão, em 31V, e a orientação da tocha mantida em 10° de ângulo de ataque, empurrando a poça de soldagem, enquanto o DBCP foi de 20mm. Além do passe de raiz, realizado com oscilação *switch back*, velocidade de soldagem de 7mm/s com 8mm de avanço, 4 mm de recuo e velocidade de avanço igual ao dobro da de recuo, foram executadas outras três camadas de preenchimento, todas com oscilação triangular com velocidade de soldagem de 5mm/s.

As camadas de preenchimento foram realizadas com amplitude crescente na oscilação, respectivamente, de 8mm, 12mm e 16mm, para acompanhar a abertura do chanfro. A Figura 12b mostra a fotografia com vista superior das quatro camadas executadas, enquanto na Figura 12c é apresentado o corte transversal da junta.



**Figura 12:** Soldagem de topo da peça com chanfro em “V”. Em (a) o detalhe da junta, em (b) a visão superior dos quatro cordões de solda e em (c) a macrografia da união.

## Conclusão

A metodologia de projeto foi aplicada corretamente com ênfase nas soldagens de união ou de revestimento em campo. O resultado obtido foi o planejado, ou seja, um equipamento modular, compacto, portátil, flexível, rápido, rígido e leve. Os ensaios operacionais, plotagem de trajetórias e de união por soldagem, validam as tecnologias usadas e a perfeita integração dos módulos: mecânico, eletroeletrônico e computacional.

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

## **Agradecimentos**

Ao IF-SC pelo apoio financeiro, através das bolsas de pesquisa, ao Departamento de Metal Mecânico (DAMM) pela infraestrutura cedida e aos professores, *Erwin Werner Teichmann* e Aurélio da Costa Sabino Netto, pela colaboração prestada.

## **Referências Bibliográficas**

FEDELE, R. A. Soldagem na Indústria Naval Moderna: Materiais e Processos. **Revista Soldagem e Inspeção**. Ano 6. Nº 9 – Suplemento Técnico BR, 2000.

PIRES, J. N.; LOUREIRO, A. & BÖLMSJO, G. **Welding Robots – Technology, System Issues and Applications**. London: Springer, 2006.

BUG-O SYSTEMS. Powerfull Automation Solutions for Welding and Cutting. Disponível em: <http://www.bugo.com/products>, Acesso em: 11 de maio de 2013.

DYNA TORQUE. Automatic Welding System. Disponível em: [http://www.dyna-torque.com/index.php?option=com\\_content&view=article&id=31&Itemid=27](http://www.dyna-torque.com/index.php?option=com_content&view=article&id=31&Itemid=27), Acesso em: 11 de maio de 2013.

POLYSOUDE. Welding Manipulators & Peripherals. Disponível em: <http://us.polysoude.com/manipuladores-de-soldadura-y-perifericos/blog>, Acesso em: 11 de maio de 2012.

YAMANE, S. et al. Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate. **Science and Technology of Welding and Joining**, 2004, v.6, n.2, p.138- 148.

DUTRA, J. C. et al. Improving surfacing performance with GMAW: a method of synchronizing polarity is used for applications that require minimal dilution. **Welding Journal**, May, 2013, p.42-47.

AWS D3.5, Guide to joint design for welding ship hulls. **Welding Journal**, January, 2006, p.33-38.

BACK, N. [et al.]. **Projeto Integrado de Produtos: planejamento, concepção e modelagem**. – Barueri, SP: Manole, 2008.