

SISTEMA AUTOMÁTICO DEDICADO AO APRENDIZADO PRÁTICO E A PESQUISA DE TÉCNICAS DE SOLDAGEM A ARCO

NELSO G. BONACORSO, RAFAEL P. PIRES, IVAN L. HUBERT, CASSIANO BONIN

Laboratório de Solda Elétrica, Departamento Educacional de Metal-Mecânica – DAMM,
Instituto Federal de Ciência, Educação e Tecnologia de Santa Catarina – IF-SC,
Av. Mauro Ramos, 950, Centro, 88.020-300, Florianópolis, SC, Brasil

E-mails: nelso@ifsc.edu.br, rafaelp@gmail.com, ivan.hubert@ifsc.edu.br, cassbonin@ifsc.edu.br

Abstract— This article describes an automatic welding system for application in the teaching and research of joining and cladding procedures of metallic pieces by electric arc. The mechanics, electro-electronic circuits and computational algorithms of a compact mixed kinematic chain manipulator with five degrees of freedom were developed with the aim of assembling this automatic welding system together with a commercial multiprocess power source. The different options of oscillating the torch, the capacity to correct the motion parameters during the execution of the trajectory and the possibility of changing the welding parameters of the power source in synchrony with the oscillation of the torch are its main technological differentials. The operator of this automatic system can create a customized trajectory with oscillation or choose a standardized one of the type: without oscillation, with longitudinal, transversal oscillation and even combinations of both. All these trajectories can be generated along a linear or circular axis inside the work space of the manipulator. The results produced by the prototype of this automatic system with the GMAW process validated its use as a low cost tool for the research and practical learning of welding techniques.

Keywords— trajectory correction, weld teaching, torch oscillation, synchronized polarity, customized trajectory.

Resumo— Este artigo descreve um sistema de soldagem automático para aplicação no ensino e na pesquisa de procedimentos de união e de revestimento de peças metálicas por arco elétrico. A mecânica, os circuitos eletroeletrônicos e os algoritmos computacionais de um compacto manipulador de cadeia cinemática mista com cinco graus de liberdade foram desenvolvidos com o objetivo de compor esse sistema de soldagem automático juntamente com uma fonte de energia multiprocesso comercial. As diferentes opções de oscilar a tocha, a capacidade de correção dos parâmetros de movimento durante a execução da trajetória e a possibilidade de mudança dos parâmetros de soldagem da fonte de energia em sincronia com a oscilação da tocha são os seus principais diferenciais tecnológicos. Os operadores deste sistema automático pode criar uma trajetória com oscilação customizada ou escolher uma padronizada do tipo: sem oscilação, com oscilação longitudinal, transversal e ainda combinações de ambas. Todas essas trajetórias podem ser geradas ao longo de um eixo linear ou circular dentro do espaço de trabalho do manipulador. Os resultados produzidos pelo protótipo deste sistema automático com o processo GMAW validaram o seu uso como uma ferramenta de baixo custo para a pesquisa e para o aprendizado prático de técnicas de soldagem.

Palavras-chave— correção de trajetória, ensino de solda, oscilação da tocha, polaridade sincronizada, trajetória customizada.

1 Introdução

Nos cursos de engenharia nos níveis de graduação e de pós-graduação é fundamental que os conhecimentos teóricos e habilidades práticas sejam ensinados de forma complementar com o objetivo de potencializar a formação dos discentes para o futuro ingresso no competitivo mercado de trabalho. Aulas práticas são de fundamental importância por incrementar de forma significativa a assimilação e a retenção do conhecimento transmitido de forma teórica por meio dos sentidos da visão e da audição.

Os conteúdos das disciplinas de soldagem desses cursos são exemplos típicos que envolvem conhecimentos interdisciplinares de física do arco elétrico, eletricidade, transmissão de calor, automação de processos, programação de trajetórias, metalurgia, etc. Quando esses conteúdos são transmitidos somente de forma teórica, a sua assimilação torna-se difícil pelos alunos. Isso se deve ao relacionamento entre diversas variáveis das áreas de conhecimento envolvidas para entender os fenômenos que ocorrem na soldagem.

Além disso, há uma carência de bons equipamentos comerciais para o ensino de soldagem auto-

mática. Os equipamentos comerciais, além de limitados quanto à flexibilidade de alteração das tecnologias e técnicas de soldagem são, em sua grande maioria, provenientes do exterior com elevado custo.

Por outro lado, os processos de soldagem a arco elétrico são fundamentais, tanto para a fabricação, quanto para manutenção de peças metálicas. Na aplicação manual dos referidos procedimentos de soldagem a qualidade do serviço fica dependente da habilidade do soldador e com uma produtividade menor que a automática. Embora seja evidente a necessidade de mudar a execução dos procedimentos de soldagem para forma automática, essa transformação ainda é um desafio na maioria das aplicações.

A substituição do soldador por um sistema automático de soldagem é geralmente uma tarefa complexa devido às irregularidades dimensionais das juntas de solda, tais como: folga não uniforme, desalinhamentos e desvios de posicionamento. Geralmente, as referidas imperfeições são geradas na etapa de preparação das juntas de solda e também durante a soldagem pelo calor transferido a peça. Para minimizar os defeitos de soldagens e o trabalho adicional de correção dos mesmos é necessário tornar o procedimento automático mais robusto frente às irregularidades dimensionais das juntas de solda.

As possibilidades para o controle da trajetória da tocha e/ou parâmetros de solda para aumentar a robustez da soldagem, de acordo com o livro de Norrish (Norrish, 2006), varia da simples correção manual via IHM (Interface Homem-Máquina) do robô ou manipulador até o complexo e caro sistema de visão laser para realizar correções automáticas.

Nos últimos anos, sistemas de visão de máquina a laser foram desenvolvidos por pesquisadores (Huang and Kovacevic, 2012) e por diferentes fabricantes com o objetivo de incrementar a qualidade e a produtividade das peças fabricadas por processos de soldagem. Embora o ganho de competitividade, justifica o custo elevado destes sistemas de visão de máquinas a laser, os mesmos ainda são pouco utilizados nas indústrias.

A técnica de oscilar a tocha nas direções longitudinal e/ou transversal dos cordões de solda também é utilizada para aumentar a robustez de procedimentos de soldagem. Na soldagem de união de chapas de mesma espessura com os processos GTAW autógeno, para juntas de sobrepor (Schwedersky et al., 2017), e GMAW, em juntas de topo (Kaneko, Yamane and Oshima, 2009), a oscilação da tocha no sentido longitudinal eliminou a ocorrência dos defeitos que ocorriam sem essa técnica. Em juntas com chanfro em V, o uso da oscilação combinada, longitudinal e transversal, proporcionou a eliminação dos defeitos em situações de afastamento não uniforme entre as chapas (Yamane et al., 2004).

Há também sistemas de soldagem que, além de oscilar longitudinalmente a tocha, sincroniza a polaridade do processo GMAW com o sentido dessa oscilação, visando aumentar a qualidade das soldas de união em ângulo entre chapas de espessuras diferentes. O objetivo é evitar a ocorrência de furos na junta. Para isso, a polaridade negativa foi aplicada no avanço para reduzir o calor na junta, enquanto que a positiva foi usada no retorno da tocha sobre o material depositado na etapa de avanço (Dutra et al., 2014).

Assim como na soldagem de união, revestimentos com maior qualidade são produzidos também pela mudança de polaridade do processo GMAW sincronizada com a oscilação transversal da tocha. A polaridade negativa é utilizada no centro da trajetória de oscilação para obter uma maior taxa de fusão e uma menor penetração. A polaridade positiva é usada apenas nas extremidades da trajetória de oscilação para preparar o cordão de solda para uma sobreposição adequada com outro que será depositada ao lado, evitando assim defeitos de fusão (Dutra et al., 2013).

Com base nos bons resultados produzidos pelas técnicas de oscilação da tocha de solda supracitadas e também visando à integração futura de sensores de realimentação para correção automática da trajetória de soldagem, esse artigo apresenta o potencial didático de um sistema automático de baixo custo desenvolvido para o aprendizado prático e a pesquisa de procedimentos de soldagem a arco.

2 Descrição do Sistema de Soldagem

O desenvolvimento desse sistema seguiu o modelo de referência do PRODIP - Processo de Desenvolvimento Integrado de Produtos com as fases de planejamento do projeto, projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado (Back et al., 2008). O sistema de soldagem proposto, Figura 1, é formado basicamente pelo operador, a fonte de soldagem e o equipamento desenvolvido para a movimentação da tocha de solda.

A fonte de energia selecionada foi a DIGIPlus A7, com capacidade de 450 A, por ser do tipo multiprocesso e de fácil operação e integração. Essa fonte de energia também permite ser operada em modo tensão ou corrente ou misto nas polaridades: positiva, negativa ou ainda alternada. Além disso, é possível durante a soldagem mudar o programa de execução via o sinal digital de sincronismo.

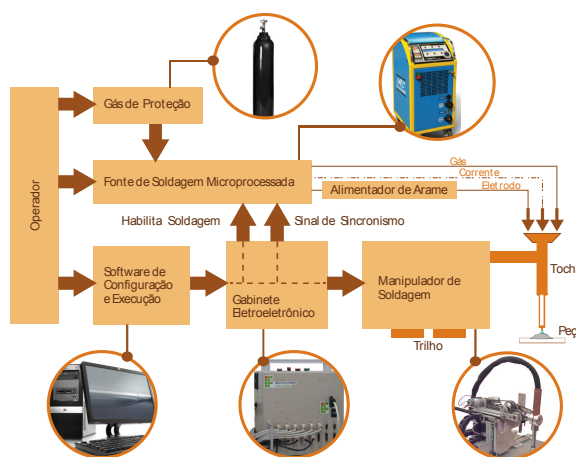


Figura 1. Elementos do sistema dedicado de soldagem automática

Com a intenção de se obter um sistema flexível e aberto para execução dos tradicionais e novos procedimentos de soldagem, optou-se pelo desenvolvimento modular do manipulador de soldagem. Com essa estratégia, foram desenvolvidos simultaneamente o módulo mecânico, o eletroeletrônico e o computacional. Toda essa flexibilidade prevista no equipamento para o aprendizado e a pesquisa discente tem o objetivo principal de proporcionar robustez aos procedimentos automáticos de soldagem.

2.1 Braço Mecânico

Com base nas necessidades dos procedimentos de soldagem foi desenvolvido por esta frente de trabalho um braço mecânico do tipo cartesiano, Figura 2, com um espaço de trabalho (XZY) de 875x100x175 mm, massa de 12 kg, capacidade de carga de 1 kg e cinco graus de liberdade distribuídos ao longo de uma cadeia cinemática mista. Esta estrutura possui três eixos lineares (XZY) do tipo série para posicionamento, seguidos por dois rotacionais (A e B) do tipo paralelo para a orientação da tocha.

Este braço mecânico possui uma velocidade máxima de 40 m/min, resolução de posicionamento de 0,025 mm e uma capacidade de executar trajetórias filetadas e também com oscilação longitudinal e ou transversal com as técnicas de puxar ou empurrar a poça de fusão. Além disso, ele foi projetado para ser instalado em qualquer posição de soldagem: plana, horizontal, vertical, etc.

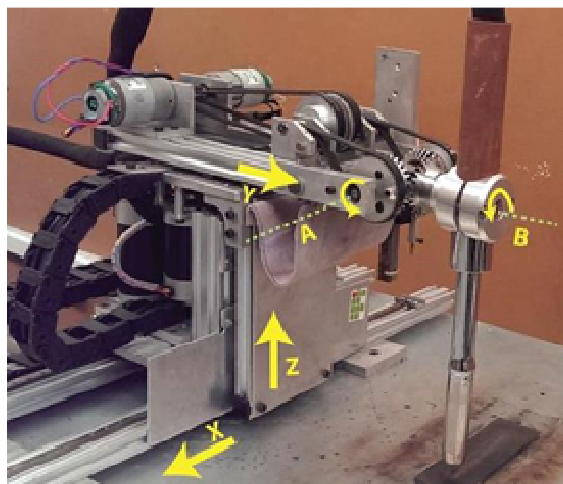


Figura 2. O protótipo do braço mecânico cartesiano

Para o movimento no eixo linear X foi desenvolvido uma solução com a utilização de uma correia, uma polia dentada, rolamentos auxiliares e uma cremalheira com perfil de dente complementar a da correia, como mostra a Figura 3. Esse sistema de transmissão de movimento é praticamente isento de folgas mecânicas, permitindo que o eixo X seja prolongado através da conexão de outros segmentos de trilho.



Figura 3. Foto do sistema de transmissão do eixo X

2.2 Gabinete Eletroeletrônico

Os principais dispositivos do gabinete eletroeletrônico e do braço mecânico do manipulador de soldagem estão interligados e conectados ao restante do sistema de soldagem de acordo com o diagrama da Figura 4. As setas grossas representam as conexões de alimentação e sinais de potência, enquanto que as finas são os sinais de comando de baixa intensidade.

Além do acionamento dos cinco servos motores elétricos dos eixos do braço mecânico, há um freio

eletromagnético que prende o eixo do servo motor X quando o manipulador de soldagem for desabilitado pelo circuito de proteção. Essa segurança é fundamental principalmente quando se está operando nas posições de soldagem desfavoráveis como a vertical e a sobre cabeça.

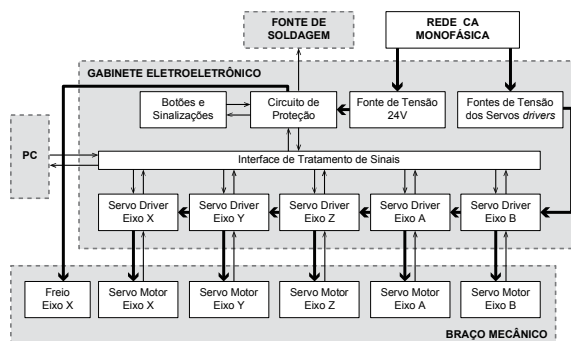


Figura 4. Diagrama funcional do sistema automático de soldagem

A comunicação entre o computador e o gabinete eletroeletrônico é realizada através da porta paralela do PC. Sua utilização se justifica pela possibilidade de comandar simultaneamente até sete eixos via comandos digitais de posição e de velocidade do protocolo SPI (*Serial Peripheral Interface*). Assim, o gerenciamento das curvas de aceleração, velocidade e malhas de controle fica sob a responsabilidade dos próprios servos drivers.

Os sinais digitais da porta paralela do computador acionam simultaneamente, via a interface de tratamento de sinais, os servos drivers dos cinco servos motores do braço mecânico e a abertura do arco elétrico. Um destes sinais é responsável pela sincronia dos parâmetros de soldagem da fonte com o movimento de oscilação da tocha.

Um compacto gabinete também foi projetado e construído, como mostra a Figura 5, a partir de um painel em aço de 400x400x250 mm para proteger e fixar os componentes eletroeletrônicos.

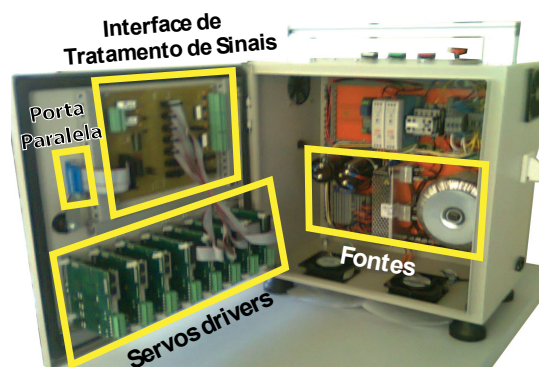


Figura 5. Interior do gabinete eletroeletrônico

Neste gabinete estão contidos os servos drivers, os circuitos de potência e a interface de tratamento de sinais. Esta última unidade realiza a lógica de proteção do sistema de soldagem e a adaptação dos sinais recebidos do computador para que sejam encaminhados aos servos drivers e à fonte de soldagem.

2.3 Desenvolvimento Computacional

O programa, escrito na linguagem C++, foi elaborado com orientação a objetos e padrões de projeto para facilitar futuras extensões e eventuais manutenções. Além da biblioteca padrão do C++, STL (*Standard Template Library*), utilizou-se também as bibliotecas *Boost* para funções auxiliares e acesso ao sistema operacional e a Qt para a interface gráfica. Essas bibliotecas foram escolhidas principalmente por sua portabilidade e permissão de uso gratuito.

Os módulos do programa foram dispostos conforme ilustrado pela Figura 6. Nela, cada módulo se comunica apenas com os que estão diretamente abaixo e acima de si. No nível mais básico, está a comunicação com a porta paralela, que estabelece uma conexão determinada pelo usuário e encaminha os sinais enviados pelas camadas superiores.

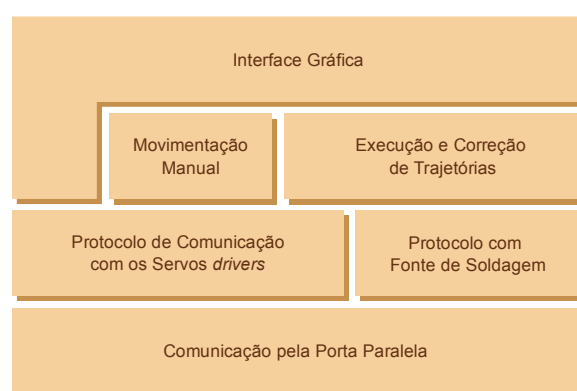


Figura 6. Disposição funcional dos módulos do programa

Sobre este módulo estão os protocolos de comunicação com a fonte de soldagem e com os *servos drivers*. O primeiro protocolo de comunicação gerencia apenas os bits de abertura do arco e de sincronismo, enquanto que o segundo é responsável pela montagem dos comandos de movimentação da tocha. Além disso, o protocolo de comunicação com os *servos drivers* é responsável pela solicitação de informações de estado dos *servos drivers* e pela manutenção do sinal de habilitação. Este sinal, por sua vez, é periódico e enviado durante todo tempo de conexão ao circuito de proteção do sistema de soldagem.

Os comandos de movimentação dos *servos* motores são de velocidade, em rpm, e de posição, em número de pulsos de *encoder*. As informações de estado dos *servos drives* podem ser referentes à movimentação (parado ou movimentando ou buscando zero) e de indicação de erros (comando inválido ou baixa tensão ou erro de seguimento). Além disso, todos os pacotes contêm um código CRC (*Cyclic Redundancy Check*), para detecção de erros de comunicação.

Todo evento de iniciativa do usuário é gerado através do módulo de interface gráfica. O usuário pode requerer o estado dos *servos drivers* diretamente ao protocolo de comunicação ou solicitar ao módulo de movimentação manual que o braço mecânico realize o procedimento de busca de zeros ou se desloque a uma posição absoluta ou relativa à atual. Es-

ses tipos de solicitação do usuário não geram comunicação com a fonte de soldagem. Além disso, é o módulo de interface gráfica que solicita ao módulo de execução e correção de trajetórias o início ou o cancelamento de um procedimento de soldagem. Neste caso, há comunicação para abertura ou extinção do arco elétrico e eventual sincronia com a fonte de soldagem. A Figura 7 mostra a tela da interface gráfica parametrizada para a trajetória de soldagem revestimento do tipo duplo 8.

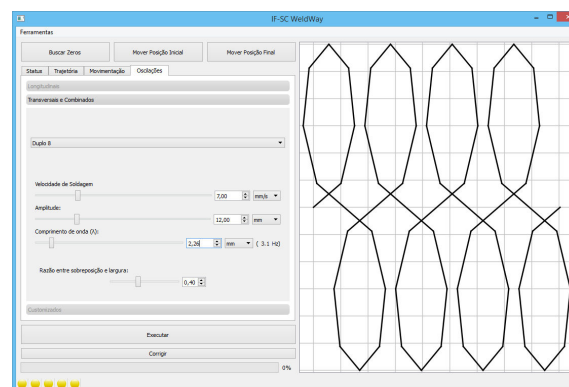


Figura 7. Tela principal do programa

Assim que o programa é iniciado e o tipo de conexão é especificado pelo usuário, a aba “Status” apresenta o resultado da comunicação inicial com cada um dos *servos drivers*. A seguir, o usuário deve comandar a busca da posição zero de cada eixo do manipulador de soldagem através do botão “Buscar Zeros”, posicionado na parte superior esquerda da tela. Como inicialmente a posição dos eixos do manipulador é indeterminada, suas posições iniciais devem ser encontradas para que sejam estabelecidas as referências de posicionamento. Somente após ter concluída a etapa busca de zeros com sucesso, o programa permite a movimentação do braço mecânico.

Na sequência, deve-se determinar o ponto inicial e o final da trajetória, caso ela seja linear, ou o centro e o ponto inicial, caso seja circular. Para fazê-lo, o operador pode movimentar o braço mecânico através da entrada de coordenadas, aba “Movimentação”, ou manualmente através do teclado do computador. Alcançada a posição desejada, ele deve atribuí-la ao início, centro ou final da trajetória, aba “Trajetória”.

Os pontos podem ser quaisquer dentro da área de trabalho, e o vetor determinado por eles indica o eixo ao redor do qual a trajetória será traçada, caso ela seja linear. A distância entre o centro e ponto inicial indica o raio, caso a trajetória seja circular. Além disso, o programa permite a determinação da orientação da tocha, para puxar ou empurrar a poça de fusão, e de um ângulo de rotação em torno do eixo longitudinal da trajetória, funcionalidade que é útil em soldagens fora de posição. Definidos esses parâmetros, o braço mecânico pode ser deslocado diretamente às posições marcadas através dos botões “Mover Posição Inicial” e “Mover Posição Final”. Os parâmetros referentes ao início e o final ou o início e o

centro da trajetória e o ângulo de rotação ao redor do eixo longitudinal são comuns a todas as trajetórias, assim como é a determinação da velocidade de soldagem. Os demais parâmetros a serem definidos são específicos a cada um dos tipos de trajetória. Estão disponíveis no manipulador de soldagem, em eixo linear ou circular, Figura 8, as trajetórias longitudinais sem oscilação e a com oscilação do tipo *switch back*.

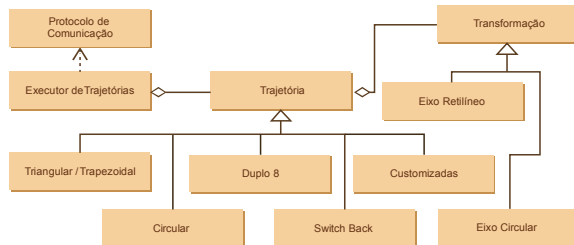


Figura 8. Diagrama das classes envolvidas na definição e execução de trajetórias

Existem também as trajetórias transversais triangular e trapezoidal com oscilação perpendicular ao eixo da trajetória e as combinadas que oscilam em ambas as direções como a circular, a duplo oito e a triangular com *switch back*. Além disso, o usuário também pode criar uma trajetória customizada conforme mostra o exemplo da Figura 9.

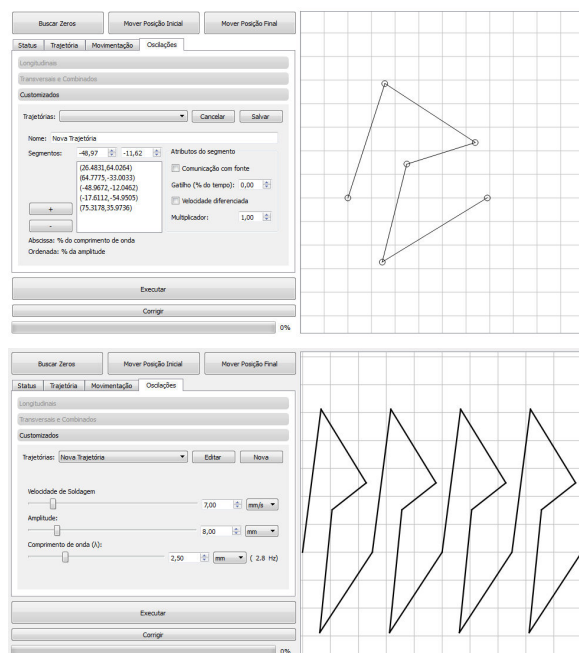


Figura 9. Exemplo de trajetória customizada, edição na parte superior e uso na parte inferior

As correções das trajetórias ocorrem por iniciativa do operador, Figura 10, quando ele detecta situações em que a mudança de parâmetros da trajetória deverá produzir melhores resultados. A correção é solicitada pelo teclado ou botão corrigir localizado na parte inferior da interface gráfica, Figura 9 inferior. Imediatamente a referida correção é encaminhada a trajetória em execução. Além dos novos parâmetros

considerados, a correção também recebe do Executor de Trajetórias o índice na lista de pontos em que se encontra a execução.

Assim, a trajetória em execução recalcula os pontos ainda não executados, que se encontra adiante em relação a esse índice. Isso ocorre quando dentro os parâmetros corrigidos estão aqueles que definem a geometria ou a velocidade da trajetória. Se o parâmetro for apenas de alteração de posição da trajetória, o usuário os envia diretamente ao Executor de Trajetórias. Neste caso, o Executor de Trajetórias simplesmente soma a compensação às coordenadas finais antes do envio aos servos *drivers*.

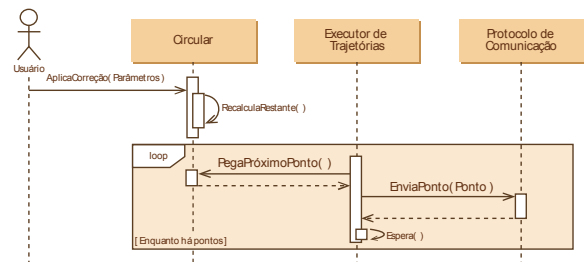


Figura 10. Diagrama funcional da correção de trajetória

O funcionamento do sincronismo com a fonte de soldagem está também relacionado à lista de pontos que compõem a trajetória. Cada um destes pontos possuem quatro tipos de componentes: as coordenadas cartesianas (x,y,z) de posição, os dois ângulos de orientação da tocha (α,β) , a velocidade resultante (V_r) de movimentação e as informações (p,v) de sincronismo. A Figura 11 ilustra o fluxograma da rotina de sincronismo e também exemplifica os efeitos das variáveis (p,v) na trajetória de soldagem com oscilação do tipo triangular. Neste exemplo, a fonte de soldagem utiliza um programa para o segmento azul e outro programa para o segmento vermelho.

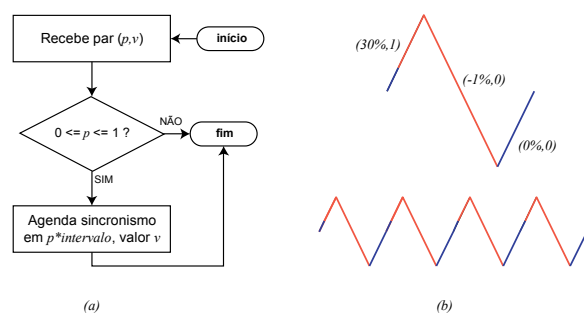


Figura 11. Funcionamento do sincronismo, em (a) o fluxograma e em (b) um exemplo de uso

A variável (p) é o percentual do tempo de execução do correspondente segmento de trajetória. Essa variável assume um valor no intervalo entre 0 e 1 ou ainda entre 0% e 100%. Quando a variável (p) contiver um valor fora deste intervalo, não haverá comando de sincronismo para fonte de soldagem no segmento de trajetória considerado. A variável binária (v) define qual dos dois programas da fonte de energia será aplicado no percentual (p) do correspondente segmento de trajetória.

3 Validação do Manipulador e a Metodologia

Após a construção do protótipo, foram realizados diversos tipos de ensaios com o objetivo de validar o desenvolvimento mecatrônico do manipulador de soldagem. O principal deles foi o de verificar se as trajetórias de soldagem executadas com oscilação estavam de acordo com a parametrização programada. Para isso, uma caneta foi fixada no lugar da tocha de solda para plotar trajetórias.

Foram executadas as plotagens das trajetórias com oscilação triangular, trapezoidal, triangular com *switch back*, circular e duplo oito, como se vê na Figura 12. Todas elas com o mesmo comprimento de onda de 4 mm e mesma amplitude de 12 mm e mesma velocidade de soldagem de 1 mm/s.

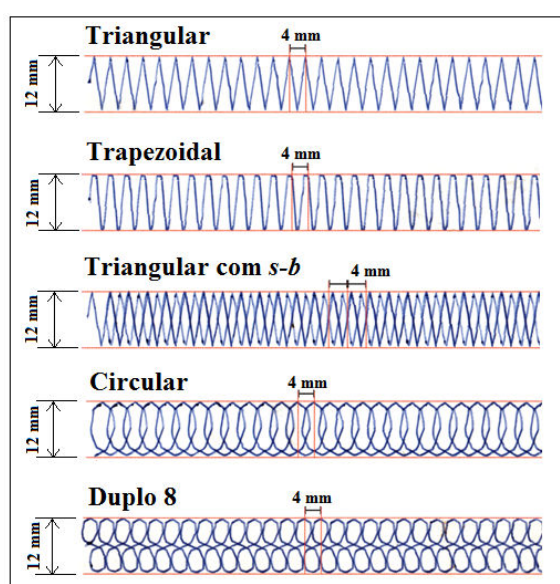


Figura 12. Resultados dos ensaios de movimentação com o manipulador de soldagem

Na trajetória com oscilação trapezoidal, os tempos de parada do eixo transversal nas extremidades superior e inferior foram de 0,8 s e 0,4 s respectivamente. A trajetória triangular com *switch back* foi executada com dois ciclos de avanço totalizando 8 mm de deslocamento longitudinal por um ciclo de retorno com 4 mm de deslocamento longitudinal. A trajetória com oscilação circular foi executada com uma superposição de 33 %, enquanto a oscilação duplo oito foi realizada com base na circular de sobreposição 50 %. Como se pode observar, os erros de natureza mecânica do manipulador, como folgas nas transmissões de movimento e falta de rigidez, são mínimos de modo a pouco influenciar nas trajetórias.

A metodologia usada se baseia na premissa pedagógica de que o ensino prático proporciona um incremento de até 80% na retenção do conhecimento em relação aos conteúdos inicialmente transmitidos de forma teórica por visão e audição. Assim, alguns experimentos com o processo GMAW são apresentados a seguir como aplicações deste sistema de soldagem para o aprendizado prático dos alunos.

3.1 Efeitos da Alteração dos Parâmetros da Trajetória de Soldagem

Nesse experimento, os alunos alteram durante a execução da soldagem os parâmetros da trajetória triangular da tocha pelo teclado do PC e visualizam o resultado obtido no cordão de solda, como mostra a Figura 13. Por maior clareza didática, as correções se restringiram a um único parâmetro em cada ensaio, embora o sistema de soldagem permita correções simultâneas. Os pontos das trajetórias foram plotados para fins de comparação com o cordão obtido. O principal objetivo desse experimento é o de proporcionar habilidade aos alunos para realizar possíveis correções na trajetória de soldagem durante a execução de uniões.

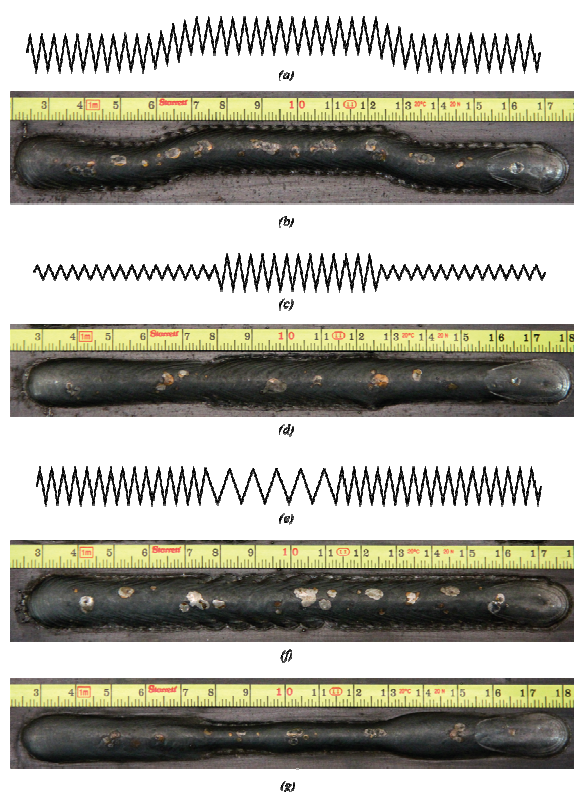


Figura 13. Alteração da trajetória: (a) e (b) - eixo longitudinal, (c) e (d) - amplitude, (e) e (f) - frequência, (g) - velocidade.

3.2 Procedimento de União Multicamadas

A união de componentes estruturais metálicos de maior espessura é uma aplicação típica do setor de fabricação. Para isso, é necessário definir um procedimento com multicamadas de solda. Nesta atmosfera, que o referido procedimento foi definido pelos alunos com o auxílio do professor.

Como exemplo, foi proposto o desafio de determinar e aplicar o procedimento de união de topo entre duas peças de aço com 12,7 mm de espessura, na posição de soldagem plana e sem cobre-junta. O chanfro da junta foi o tipo "V" com 60° de ângulo de chanfro, nariz de 1 mm e abertura nula.

O enchimento da junta deu-se em três passes, Figura 14C, com a mesma velocidade de soldagem de

5 mm/s. No primeiro passe ou raiz, foi usada uma trajetória com oscilação *switch back*. O deslocamento de avanço e de retorno foram de 10 mm e de 5 mm respectivamente. Ambos os movimentos foram executados com 15 mm/s de velocidade da tocha. Embora sem o uso de cobre-junta, obteve-se uma raiz com penetração completa, Figura 14B.

Nos passes de preenchimento, segundo e terceiro, foi usada uma trajetória com oscilação circular. Os parâmetros deste movimento foram: sobreposição de 33 %, frequência de 2 Hz e amplitudes de 7 mm e 14 mm respectivamente. Obteve-se também um completo preenchimento da junta, Figura 14A.

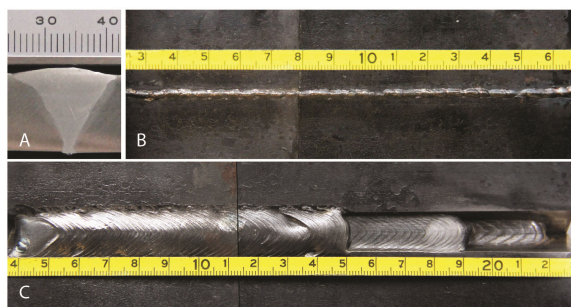


Figura 14. Resultado do procedimento de união: A – seção transversal, B – aparência inferior, C – cordões de solda

3.3 Procedimento de Revestimento de Superfície

Assim como a união, os procedimentos de revestimento de superfícies são muito importantes para a recuperação de superfícies metálicas desgastadas por corrosão e/ou abrasão. Nesse sentido, foi proposto aos alunos o desafio de determinar e aplicar um procedimento de revestimento na posição plana em uma chapa de aço de 200x200x6,35 mm. Foi obtido, Figura 15, um revestimento de boa aparência superficial e isento de defeitos de soldagem.

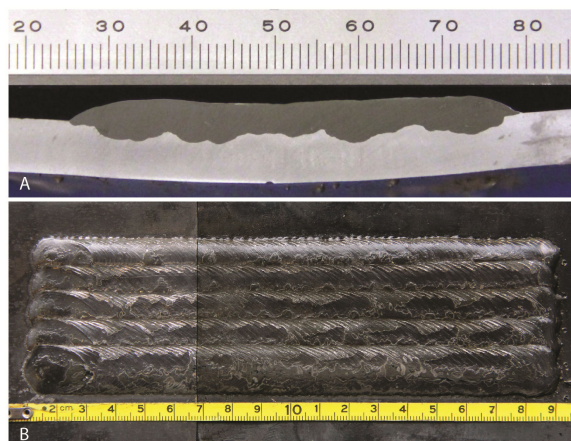


Figura 15. Resultado do procedimento de revestimento: A – seção transversal, B – cordões de solda

Todos os cordões de solda do revestimento foram executados com ângulo de ataque de 10° empurrando, DBCP igual a 22 mm, velocidade de soldagem de 5 mm/s, oscilação do tipo triangular de 12 mm de amplitude e frequência 2 Hz. A distância

entre os eixos longitudinais dos cordões de solda adjacentes foi de 10 mm. O reforço e a penetração medidas foram de 3,2 mm e 2,3 mm respectivamente, enquanto que a diluição foi de 36,2 %.

3.4 Soldagem em Eixo Circular

Na fabricação, os cordões de solda nem sempre são retilíneos. Muitas soldas são em eixo circular envolvendo ainda oscilação da tocha. Para mostrar também aos discentes a necessidade de sobreposição entre o início e o fim de um cordão de solda foi aplicada uma trajetória com sobreposição nula, imagem direita da Figura 16.

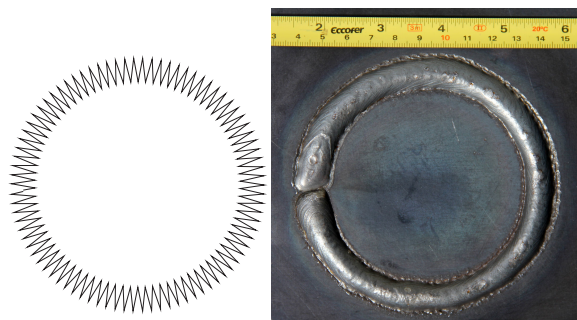


Figura 16. Trajetória circular e o respectivo cordão de solda

Os parâmetros de movimento usados na trajetória em eixo circular com oscilação do tipo triangular foram: velocidade de soldagem de 7 mm/s, 10 mm de amplitude de oscilação, frequência de 2 Hz e 50 mm de raio de circunferência.

A foto do lado direita da Figura 16 mostra o resultado obtido na posição plana de soldagem em uma chapa de aço de 200x200x 6,35 mm com orientação da tocha sempre perpendicular. Fica evidenciado aos alunos que não houve união entre o início e o fim do cordão, caracterizando uma descontinuidade.

3.5 Sincronismo da Polaridade com a Oscilação

Outro aspecto evidenciado aos alunos é a possibilidade de adequar a geometria do cordão de solda via o sincronismo dos parâmetros de soldagem com a oscilação da tocha. Nesse sentido, um experimento foi realizado sincronizando dois distintos programas de soldagem na fonte de energia com os movimentos de avanço e de retorno da trajetória com oscilação *switch back*.

Foram elaborados dois programas com distintas correntes elétricas de soldagem. O primeiro usou uma corrente com polaridade positiva (DCEP) de 250 A, enquanto que o segundo usou uma corrente com polaridade negativa (DCEN) de - 230 A.

Neste ensaio, os três cordões de solda, Figura 17, foram produzidos com os seguintes parâmetros da trajetória *switch back*: velocidade de soldagem de 7 mm/s, avanço de 8 mm da tocha com velocidade de 28 mm/s, recuo de 4 mm da tocha com velocidade de 14 mm/s, DBCP de 20 mm e ângulo de ataque de 0°. Assim, a tocha passa três vezes sobre cada segmento

de 4 mm desta trajetória. No primeiro e terceiro passes a tocha de soldagem está avançando enquanto que no segundo está recuando.



Figura 17. Resultado do sincronismo: A e B - Cordão e seção com polaridade DCEN, C e D - Cordão e seção com polaridades DCEN e DCEP, E e F - Cordão e seção com polaridade DCEP.

No primeiro ensaio foi usado somente corrente de soldagem DCEN com o valor de -230 A nos três passes. O resultado obtido, Figuras 17A e B, mostra um cordão de solda estreito com muito reforço e baixa penetração. O oposto ocorre quando é aplicado corrente de soldagem DCEP nos três passes, Figuras 17E e F. Neste caso, o arco elétrico funde mais o material de base e espalha a poça de fusão, produzindo um cordão de solda largo com reforço reduzido e maior penetração.

As Figuras 17C e D mostram o resultado obtido quando é usada a polaridade DCEN no primeiro e segundo passes e polaridade DCEP no terceiro passe da oscilação *switch back*. Observe que o cordão de solda obtido com alternância de polaridade possui geometria intermediária aos cordões de solda produzidos com uma única polaridade.

4 Conclusão

O desafio inicial de desenvolver um sistema automático de soldagem para ser usado como ferramenta de ensino e também de pesquisa foi superado. Atualmente a flexibilidade deste sistema permite que professores e alunos de graduação e pós-graduação em mecatrônica industrial experimente novas técnicas de soldagem em laboratório com o objetivo de incrementar a qualidade e a produtividade de procedimentos automáticos de soldagem.

A metodologia empregada permite aos alunos a continuar os trabalhos práticos após a determinação e aplicação do procedimento de soldagem em laboratório. Essa continuidade se dá através da medição dos parâmetros dimensionais da seção transversal dos cordões de solda para comparar com os critérios de qualidade das normas técnicas vigentes e, na sequência, atestar sobre a aprovação ou não.

Apesar de não ter sido avaliada do ponto de vista pedagógico, a metodologia aplica aumentou o interesse discente pelas disciplinas de soldagem por aproximar os experimentos da academia com o trabalho realizado pelas empresas de fabricação e de manutenção. O ponto negativo é o incremento das des-

pesas referentes aos consumíveis de soldagem e de manutenção de equipamentos do laboratório.

A dinâmica dos eixos cartesianos com velocidades de até 40 m/min é o maior diferencial do manipulador de soldagem desenvolvido quando comparado aos equipamentos comerciais equivalentes. Essa característica permite o aumento de produção através da diminuição do tempo de posicionamento da tocha para a execução de cada cordão de solda. Além disso, proporciona a execução de oscilação da tocha com maior frequência.

Embora o equipamento desenvolvido tenha diferentes opções de oscilar a tocha, inclusive a customizada, com a possibilidade de correção simultânea de seus parâmetros de movimento e ainda sincronismo com os parâmetros de soldagem da fonte, foi gasto apenas 6.800 dólares com a compra dos componentes e materiais usados para fabricar o manipulador. Isso representa uma economia para a IES da ordem de seis vezes deste investimento, quando comparado ao preço de equipamentos comerciais equivalentes.

Referências Bibliográficas

- Norrish, J. (2006) Advanced welding processes: technologies and process control. 3 ed. Woodhead Publishing in Materials: Cambridge - England, 288 p.
- Huang, W. and Kovacevic, R. (2012) Development of a real-time laser-based machine vision system to monitor and control welding processes. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 63, pp. 235-248.
- Schwedersky, M. B. et al. (2017) Switch back technique enhances the productivity of the TIG welding process. Welding in the World, Vol.61, pp. 636-642.
- Kaneko, Y., Yamane, S. and Oshima, K. (2009) Numerical simulation of MIG weld pool in switchback welding. Welding in the World, Vol.53, pp. 333-341.
- Yamane, S. et al. (2004) Adaptive control of back bead in V groove welding without backing plate. Science and Technology of Welding and Joining, vol.9, No. 2, pp.138-148.
- Dutra, J. C. et al. (2014) Automating a wheel manufacturing operation. Welding Journal, Vol.93, No. 6; pp.76-84.
- Dutra, J. C. et. al. (2013) Improving surfacing performance with GMAW. Welding Journal, Vol.92, No. 5; pp. 42-47.
- Back, N., Ogliari, A., Dias, A., and Silva, J. C. (2008) Integrated Project of Products: Planning, Design and Modeling. Brazil: Manole, Barueri/SP, p. 628.