

Estratégias e Técnicas de Controle Empregadas em Soldagem a Arco Elétrico

Vitor de Souza Guedes
Grupo de Eletrônica de
Potência e Controle – GEPOC
Universidade Federal de Santa
Maria – UFSM
Santa Maria, Brasil
vitor.guedes@acad.ufsm.br

Fábio Ecke Bisogno
Ingenieurwesen Elektrotechnik
und Informationstechnik
Hochschule Koblenz
Koblenz, Germany
bisogno@hs-koblenz.de

Lucas Vizzotto Bellinaso
Grupo de Eletrônica de
Potência e Controle – GEPOC
Universidade Federal de Santa
Maria – UFSM
Santa Maria, Brasil
lucas@gepoc.ufsm.br

Rafael Concatto Beltrame
Grupo de Eletrônica de
Potência e Controle – GEPOC
Universidade Federal de Santa
Maria – UFSM
Santa Maria, Brasil
beltrame@gepoc.ufsm.br

Christian Griesang Barbosa
Fricke-Balmer Soldas Ltda
Ijuí, Brasil
christian@fricke.com.br

Ezequiel Andrei Mallmann
Fricke-Balmer Soldas Ltda
Ijuí, Brasil
mallmann@fricke.com.br

Luciano Anderson Fricke
Fricke-Balmer Soldas Ltda
Ijuí, Brasil
luciano@fricke.com.br

Resumo—Este trabalho traz uma extensa revisão bibliográfica acerca de estratégias e técnicas de controle aplicadas a processos de soldagem a arco elétrico, com destaque para os processos MIG/MAG, TIG e eletrodo revestido. Além das técnicas de controle, são revisadas técnicas de monitoramento que fazem o uso de sensores de imagem e de temperatura. Salienta-se que as principais técnicas de controle das variáveis do processo de solda (como tensão e corrente do arco), identificadas na literatura, fazem uso de controladores Proporcional Integral (PI), *Sliding Mode Control* (SMC) e lógica Fuzzy (FLC).

Palavras-chave—Processos de Soldagem, Técnicas de Controle, PI, SMC, Fuzzy.

I. INTRODUÇÃO

Soldagem a arco elétrico engloba uma ampla variedade de processos que utilizam um arco elétrico como fonte de calor para fundir e unir metais. A física envolvida nesses processos é complexa e abrange fenômenos relacionados à eletricidade, magnetismo e termodinâmica, interagindo para garantir a qualidade e a integridade das juntas de solda [1].

Existem diferentes processos de soldagem descritos na literatura, como mostrado na Fig. 1, classificados de acordo com critérios, que incluem o método de fusão. Cada categoria

engloba técnicas adaptadas às especificidades dos materiais, suas espessuras e condições operacionais para garantir a eficiência e qualidade das juntas de solda.

Entre os diferentes processos de soldagem, os que empregam a arco elétrico recebem destaque, como o processo que emprega eletrodo revestido, popular por sua simplicidade e condições de aplicação diversas. O processo TIG (*Tungsten Inert Gas*) reconhecido por possuir uma alta qualidade e precisão de soldagem, é ideal para aplicações onde a estética da solda é um fator importante. Já o processo MIG/MAG (*Metal Inert Gas/Metal Active Gas*) é caracterizado por sua capacidade de adaptação a diferentes materiais e espessuras [2].

Além disso, o desempenho da fonte de soldagem possui significativa importância para o processo, fornecendo níveis de corrente e tensão adequados. Neste sentido, características como a ignição do arco, estabilidade de transferência do material do eletrodo fundido e a quantidade dos respingos, são só alguns dos fatores considerados [4].

Logo, os parâmetros de soldagem precisam ser medidos, monitorados e otimizados para alcançar uma melhor qualidade de solda. A implementação de técnicas avançadas de monitoramento e controle pode ajudar a ajustar continuamente esses parâmetros, assegurando uma soldagem consistente e de alta qualidade [5]. Para isso, é necessário estabelecer um modelo apropriado que relacione os parâmetros de soldagem. Neste sentido, em [6] e [7] foi documentada a modelagem do processo MIG/MAG para os modos de transferência de metal por curto-circuito e globular.

Sob essa perspectiva, este trabalho tem como objetivo, por meio de uma revisão bibliográfica abrangente, sumarizar as diversas estratégias de controle empregadas no processo de soldagem a arco elétrico, além dos diferentes tipos de controladores empregados.

II. PARÂMETROS DE CONTROLE PARA SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

O processo de soldagem a arco elétrico possui muitos parâmetros que influenciam na qualidade final da solda e na estabilidade do processo. Um dos mais importantes parâmetros, relacionado indiretamente à qualidade do cordão de solda, é a corrente do arco elétrico. Por exemplo,

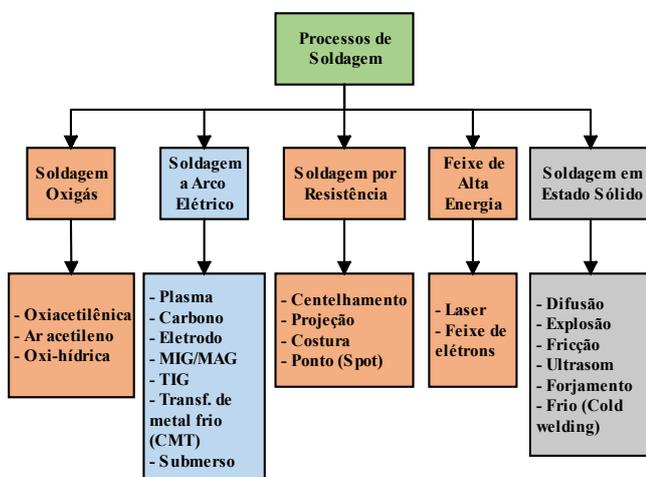


Fig. 1. Tipos de processo de soldagem [3].

dependendo da faixa de corrente de soldagem em um processo MIG/MAG, a transferência de metal pode ser distinta, podendo ocorrer por curto-circuito, de modo globular ou *spray*, os quais devem ser escolhidos adequadamente com base na aplicação.

Ainda, uma série de parâmetros diretos e indiretos estão relacionados entre si durante o processo de soldagem MIG/MAG [2], conforme apresentado na Fig. 2. Entre os parâmetros diretos, pode-se citar a forma e a penetração do cordão de solda, além da rigidez e porosidade do cordão. Já os parâmetros indiretos incluem a tensão do arco, a velocidade de alimentação de arame e o tipo de gás de proteção. A interação complexa entre esses parâmetros tem influência direta na qualidade final da solda, na eficiência do processo e nas propriedades mecânicas da junta soldada. Vale ressaltar que muitas destas variáveis, como tensão do arco, também estão presentes na soldagem TIG e por eletrodo revestido.

Para exemplificar a influência dos parâmetros supracitados, pode-se observar que a tensão está indiretamente relacionada com as propriedades mecânicas da solda, de forma que, um nível de tensão abaixo do ideal pode resultar em porosidade no cordão. Já um nível de tensão excessivo pode resultar em mordeduras e salpicos. O comprimento do arco, também tem influência no aspecto final do cordão de solda, podendo resultar em cordões com variação na penetração e na largura.

Além disso, os parâmetros geométricos de solda, como largura, altura e penetração do cordão, apresentados na Fig. 3, são particularmente importantes para a qualidade final da solda e podem ser monitorados por sensores de imagem como proposto em [8], ou por sinais característicos, como tensão de arco no caso de MIG/MAG pulsada [9].

III. ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

Com base na quantidade de parâmetros relacionados direta ou indiretamente ao processo de soldagem a arco elétrico, pode-se inferir que o processo é um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*multiple-input and multiple-output* – MIMO). Por isso, existem muitas estratégias para se fazer o controle do processo de solda, como manter valores de corrente elétrica de soldagem, tensão, e velocidade de alimentação do fio, no caso de MIG/MAG, próximo a pontos de operação estáveis do processo. Porém, para esse tipo de abordagem será necessário de um operador para constantemente manter os valores de referência em pontos ideais para cada tipo de aplicação.

Outras abordagens mais complexas e automatizadas como o controle das referências de corrente e tensão pelo monitoramento visual do cordão de solda ou pela temperatura da linha central do cordão, também são possíveis.

Nos tópicos a seguir essas estratégias serão apresentadas com mais detalhes.

A. Controle Baseado em Sensores Visuais

Uma vez que um processo de soldagem a arco elétrico é um sistema MIMO, existem muitas abordagens possíveis para se fazer o controle desse processo. Uma delas é o controle baseado no monitoramento visual do cordão de solda. Esse tipo de abordagem se baseia na experiência humana, no fato que um operador pode julgar a qualidade da solda pela sua

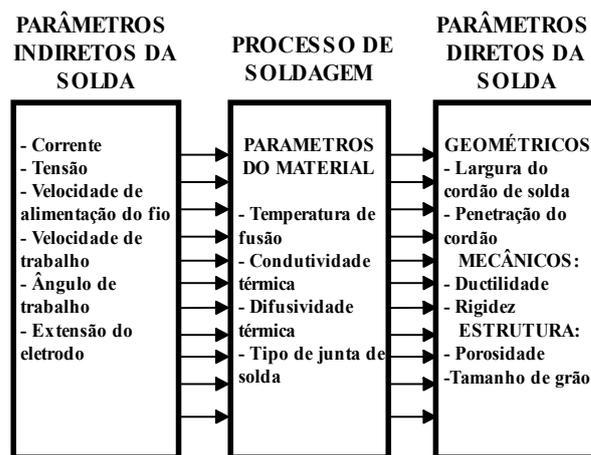


Fig. 2. Relação entre parâmetros do processo MIG/MAG [2].

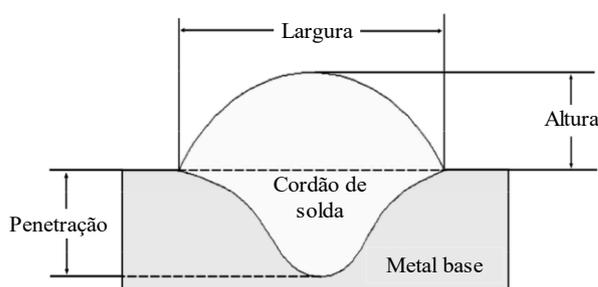


Fig. 3. Parâmetros geométricos da solda [8].

aparência. Por isso, é comum a utilização de algoritmos de inteligência artificial para esse tipo de abordagem.

Um tipo de monitoramento visual da profundidade de penetração do cordão de solda foi proposto em [10]. Utilizando imagens da poça de solda, foi possível prever a profundidade de penetração com o auxílio de uma rede neural de retropropagação (*backpropagation neural network*). Já que a profundidade de penetração da solda está relacionada com a qualidade da mesma, é possível fazer um controle desse parâmetro. Por outro lado, em [11], foi proposto o monitoramento da poça de solda utilizando a reflexão de um conjunto de lasers em um plano para análise posterior por algoritmos de processamento de imagem, com a possibilidade de controlar a geometria da poça de solda em tempo real.

Como mostra a Fig. 4, em [12] foi implementado um sistema de controle para soldagem TIG baseado em processamento de imagem da poça de solda. Neste trabalho foram utilizados lasers para gerar uma imagem refletida em um plano, para então, processar a imagem estimando a largura, a altura e a convexidade da poça de solda. Com essas informações, a penetração do cordão de solda foi controlada manipulando a corrente de soldagem e a velocidade de trabalho.

B. Controle Baseado em Temperatura

A temperatura da superfície do cordão de solda é um parâmetro que influencia significativamente a geometria e as propriedades mecânicas da solda e, desse modo, em sua qualidade final [13].

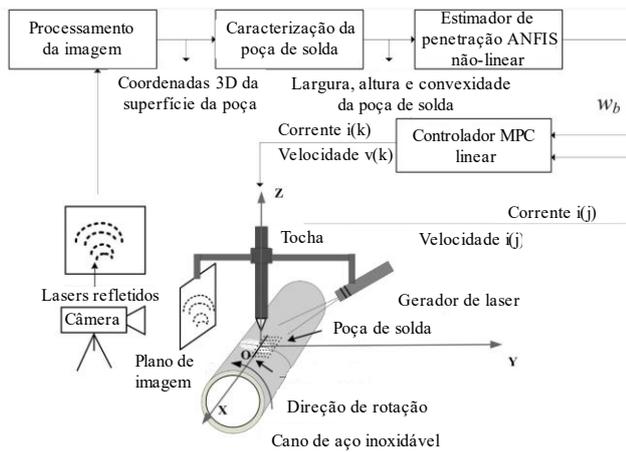


Fig. 4. Sistema de controle baseado em processamento de imagem [12].

O controle da temperatura da linha central do cordão de solda foi empregado em [14] para soldagem MIG/MAG. A estratégia utilizada visa manter a velocidade de trabalho fixa, e regular a temperatura da linha central utilizando a corrente de arco como variável manipulada do sistema. Para isso ser possível, foi necessário encontrar um modelo que relaciona a temperatura da linha central com a corrente do arco. Além disso, para medir a temperatura, foram utilizados sensores ópticos, como um pirômetro e uma câmera CCD (*charged-coupled device*).

De forma similar, em [15], um controle de temperatura da linha do cordão foi proposto, porém, nesse caso, foi utilizado a tensão do arco como variável manipulada, com a velocidade de alimentação do fio também ajustada conforme o nível de tensão, com intuito de manter um arco elétrico estável. Por fim, para a medição de temperatura, foi utilizado apenas um pirômetro, como mostra a Fig. 5.

C. Controle Baseado no Comprimento do Arco Elétrico

Outra estratégia identificada na literatura é o controle baseado no comprimento do arco elétrico. Segundo [16], na maioria dos processos de soldagem a arco elétrico, é preferível que o comprimento do arco se mantenha constante para produzir uma solda de alta-qualidade. O método mais comum para atingir esse objetivo é manter a tensão do arco constante. Entretanto, esse método só funciona se a corrente elétrica e posição do eletrodo, também se mantiverem constantes.

Valores instantâneos de comprimento do arco são de difícil medição em casos onde não se tenha estas condições contantes, por isso geralmente é utilizado o valor médio do comprimento de arco. Já para casos onde existam essas condições constantes, o valor instantâneo do comprimento do arco pode ser relacionado à queda de tensão do mesmo. Vale ressaltar que as tentativas de manter o valor instantâneo do comprimento do arco constante, podem resultar em ressonância do sistema, ou seja, instabilidade [17].

Caso não se tenha o cenário destas condições constantes, são necessárias outras maneiras de medir o comprimento do arco elétrico. Existe uma tendência em utilizar sistemas ópticos para a medição do comprimento de arco como em [18], onde foi proposta a medição, para solda TIG, baseada em uma faixa do espectro eletromagnético do arco. Neste método, apenas com os valores de corrente de soldagem e comprimentos de onda específicos de átomos de Argônio, que podem ser obtidos com um dispositivo monocromador, é possível calcular o comprimento do arco elétrico. Outro

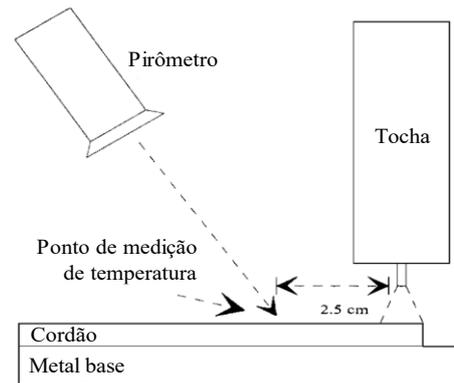


Fig. 5. Medição de temperatura da solda [15].

método de medição possível é pelo som gerado pelo arco elétrico [2].

Por fim, em [19], foi proposto um sistema de controle para soldagem TIG, onde o comprimento do arco elétrico foi mantido constante utilizando sinais de entrada de corrente e tensão de arco, além do ajuste da distância entre o eletrodo e a peça por um servomotor. Além disso, nesse trabalho foi utilizado ajuste de ganho (*gain scheduling*) do controlador empregado, no qual esse ajuste depende das condições de operação, oferecendo melhor robustez para o sistema.

IV. TÉCNICAS DE CONTROLE EMPREGADAS EM SOLDAGEM A ARCO ELÉTRICO

Existem uma variedade de técnicas ou tipo de controladores possíveis para controlar o processo de soldagem a arco elétrico, como mostra a Fig. 6. A escolha do controlador sempre vai depender das especificações do projeto, como desempenho da resposta transitória, erro em regime permanente ou robustez a variações paramétricas. Além disso, a natureza do processo a ser controlado tem grande influência na escolha do controlador, ou seja, de caráter linear ou não-linear, largura de banda, condições de operação, entre outros parâmetros.

Para máquinas de soldas operadas manualmente, segundo [20], controladores proporcional-integral (PI) são os mais utilizados devido à facilidade de implementação e relativo bom desempenho em regime permanente. Porém, o controlador PI possui, de modo geral, baixa robustez a variações paramétricas. Em seguida, a segunda técnica mais utilizada nestes conversores é a de controle por modos deslizantes (*Sliding Mode Control – SMC*), possuindo uma melhor robustez, porém problemas como *chattering*.

Ainda, segundo [20], tem-se as técnicas de controle inteligente como controle por lógica Fuzzy (*Fuzzy Logic Control – FLC*), que possui boa robustez e não necessita de um modelo matemático preciso do processo. Porém sua implementação é consideravelmente mais complexa e, geralmente, requer implementação digital com microcontroladores com boa capacidade de processamento.

Além disso, para corroborar a ideia anterior, em [21], é mostrado um estudo do porque o controlador PI é ainda amplamente mais utilizado que SMC na indústria para processos MIG/MAG. De modo que, apesar da técnica SMC ser mais robusta, o controlador PI não teve dificuldades para atingir os requisitos de projeto dentro das possíveis variações paramétricas do processo. Além disso, o simples fato do PI ser

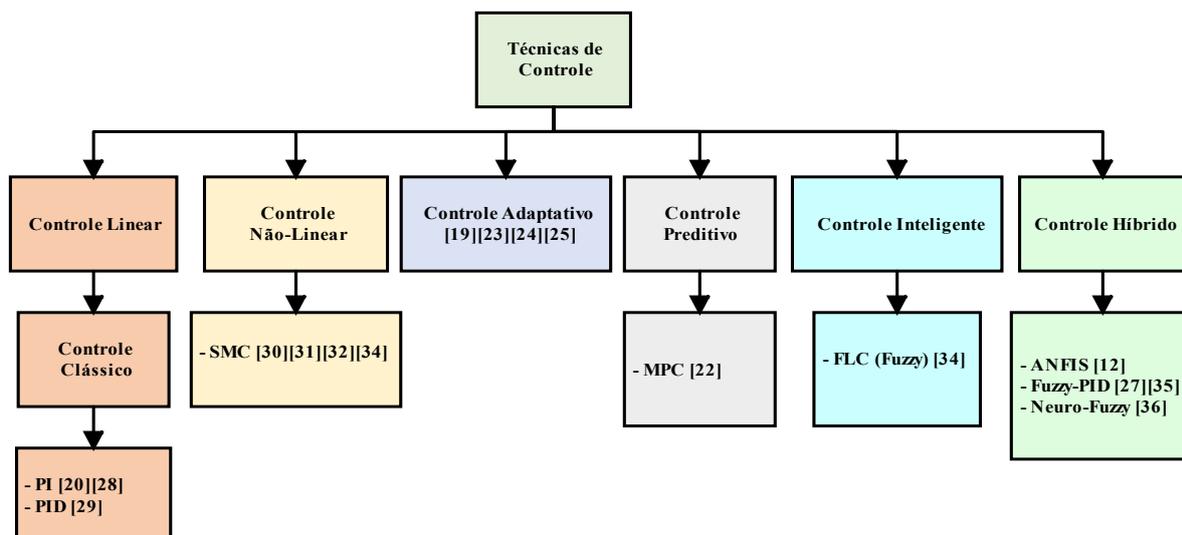


Fig. 6. Classificação de técnicas de controle utilizados em processos de solda.

mais utilizado na indústria, tanto em sua forma analógica como digital, confere a ele uma maior confiabilidade e possibilidade de manutenção por diversos profissionais da área. Ou seja, a técnica SMC só é viável na prática caso o controlador PI não consiga atingir os requisitos de projeto, algo improvável em processos manuais de soldagem a arco elétrico.

Diferente dos sistemas manuais de soldagem, os automatizados geralmente não possuem o foco de manter necessariamente valores constantes de tensão e/ou corrente elétrica. Logo, devido a esse aumento de complexidade, e outras necessidades, como processamento de imagem, técnicas de controle clássico não são comumente utilizadas isoladamente. Por isso, é comum observar a utilização de modelos híbridos de controle, como em [12], onde foi utilizado um modelo adaptativo-inteligente, chamado ANFIS (*Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System*), para modelar em tempo real a correlação entre a poça de solda e a corrente/velocidade de alimentação do fio.

Controle preditivo também é utilizado em processos de arco elétrico, como proposto em [22], onde empregou-se uma técnica de controle conhecida como Controle Preditivo baseado em Modelo (*Model Predictive Control – MPC*). Nesta aplicação, foi implementado o controle de um sistema automatizado de solda utilizando a medição de sinais de corrente e tensão de soldagem.

Ainda, se tratando de processos de soldagem com maior nível de automatização, onde não é possível encontrar um modelo preciso do processo, é comum observar o emprego de controle adaptativo na literatura, como visto em [23], [24] e [25].

Ao longo de anos, diversas técnicas de foram sendo propostas na literatura para processos de soldagem, cada um proporcionando vantagens/desvantagens em termos de precisão, velocidade e capacidade de adaptação a diferentes condições e processos de soldagem. Algumas técnicas são detalhadas a seguir.

A. Controle Clássico

A utilização de técnicas de controle clássico apresenta maior frequência em máquinas de soldagem operadas manualmente devido às especificações mais simples de projeto. Além disso, quando se trata de controle clássico, é comum realizar a linearização de um ponto de operação do

conversor, estratégia conhecida como modelo médio de pequenos sinais. As técnicas mais comuns fazem uso de controladores PI, PD (proporcional-derivativo) e PID (proporcional-integral-derivativo) [26].

Embora o controlador PI seja amplamente utilizado quando se trata de máquinas de soldagem, o mesmo possui algumas desvantagens, como a dificuldade de ajuste dos parâmetros de controle dinâmicos do processo [27].

Se o processo sofrer alguma alteração não prevista no modelo empregado no projeto do controlador, é possível que o método de controle que utiliza um modelo de ganhos fixos torne-se instável para grandes variações do modelo da planta. Neste caso, é necessário a utilização de um controlador robusto ou adaptativo capaz de responder rapidamente às mudanças no processo [6].

Apesar de suas limitações citadas, o controle clássico ainda é amplamente utilizado em sistemas de controle de soldagem a arco elétrico. Um exemplo é dado em [20], onde foi documentado o uso de um controlador PI para uma malha de controle interna de corrente de uma fonte utilizada para soldagem a arco elétrico. Nesse caso, na malha externa de controle de tensão foi utilizado SMC que atua como entrada para a malha de corrente.

Uma tentativa de melhorar a robustez foi documentada em [28], onde foi utilizado ajuste de ganho (*gain scheduling*) de um controlador PI. A estratégia empregada foi ajustar o ganho do controlador para diferentes pontos de operação relacionados à tensão de entrada e à carga de saída de um conversor CC-CC *full-bridge* com modulação *phase-shift*, conversor este que é muito utilizado em máquinas de solda manuais. Para a implementação do controlador foi utilizado um microprocessador PIC® de 16 bits, o que demonstra que o controle clássico, no geral, possui custo de processamento menor em relação a outras técnicas. Além disso, em [29], também foi empregada uma abordagem semelhante, com ajuste de ganho de um controlador PID.

B. Controle por Modos Deslizantes

Partindo do controle clássico, a técnica de controle SMC pode ser a próxima opção quando se busca maior robustez no controle de conversores utilizados para soldagem manual. Além disso, uma vantagem é que a implementação digital das

leis de controle de SMC é relativamente fácil comparada a técnicas de controle mais avançadas como controle inteligente. A implementação analógica também possível, porém, com maior nível de complexidade.

Conforme [30], o princípio geral de SMC gira em torno da criação de uma estrutura deslizante que faz a trajetória do sistema mover-se até o ponto de operação desejado. Esse movimento depende principalmente do erro atual do sistema em relação à referência de entrada. No caso de conversores chaveados, esse movimento é realizado pela comutação das chaves do conversor em uma frequência idealmente infinita. Porém, como na prática a frequência de chaveamento é finita, ocorre o fenômeno conhecido como *chattering*. Caso essa questão não seja contornada, com métodos como SMC adaptativo, com o uso de banda morta (*deadband*) ou a utilização de SMC de maior ordem, podem ocorrer problemas de desempenho do controlador, como baixa precisão de rastreamento, ruídos e falha das chaves do conversor (por *stress* de temperatura, por exemplo).

Em [31], foi realizada uma comparação de desempenho de controladores PI e SMC, implementados digitalmente, de uma fonte de soldagem a arco elétrico. Foi demonstrado que com o controlador SMC, é possível ter um menor sobressinal de tensão e uma resposta transitória similar ao controlador PI.

Também existem abordagens com SMC de maior ordem como em [32], onde foi proposto o controle do processo de soldagem manual a eletrodo revestido. Neste caso foi utilizado SMC de segunda ordem (*Second Order Sliding Mode – SOSM*). Os resultados foram satisfatórios considerando variações paramétricas como a mudança do comprimento do arco elétrico devido ao caráter manual da soldagem.

C. Controle Adaptativo

Diferente do controle robusto, onde o controlador é projetado para o processo ter um desempenho aceitável dentro de um conjunto de pré-definido de condições, o controle adaptativo é uma abordagem onde o controlador ajusta seus parâmetros em tempo real. Além disso, o controle adaptativo geralmente está presente em processos de soldagem com controle de qualidade, já que nesses casos é difícil obter modelos precisos, devido a quantidade de parâmetros envolvidos.

Muitas vezes, o controle adaptativo é empregado em conjunto com outras técnicas de controle, como quando foi empregado um Controlador PI com ajuste de ganho, já citado anteriormente em [28]. Da mesma forma, em [23], foi empregado um algoritmo preditivo chamado *Generalized Predictive Control* (GPC) para controlar a penetração do cordão de solda. Os parâmetros desse algoritmo foram atualizados com base em simulações, experimentos e dados *on-line* do processo.

Já em [24], foi proposto um controlador de tempo morto (*dead time*) adaptativo, com objetivo de alcançar um rastreamento preciso da largura da poça de solda de um processo de soldagem MIG/MAG robotizada. Devido ao tempo morto significativo presente e o modelo impreciso do sistema, foi utilizado controle adaptativo. Além disso, neste trabalho foram feitas comparações com um controlador robusto h-infinito (H_∞).

Foi documentado em [25], para soldagem TIG, o uso de um controlador adaptativo com objetivo de controlar a queda de tensão do arco elétrico do processo. Mais especificamente

controlando o comprimento do arco elétrico pelo deslocamento vertical da ponta de solda, consequentemente controlando a tensão do arco. Nesse caso, foi necessário utilizar controle adaptativo devido a influência da variação de corrente durante o processo, com o fim de manter um controle estável da queda de tensão do arco elétrico mesmo com grandes variações na corrente de soldagem.

D. Controle Inteligente e Controle Híbrido

Em controle inteligente, para fontes de soldagem operadas manualmente, geralmente são utilizados controladores FLC [20]. Uma vantagem conhecida de FLC é que não é necessário obter o modelo matemático do sistema a ser controlado, apenas relações entre as variáveis de saída e entrada do sistema, conhecidas como regras Fuzzy [33].

Em [34], foi feita uma comparação entre FLC e SMC para o controle de uma máquina de solda, através de uma simulação na ferramenta Simulink®. Os resultados de simulação mostraram que o controlador FLC teve melhor desempenho, tanto no quesito robustez quanto precisão.

Para soldagem automatizada, além de [12] que utilizou controle híbrido ANFIS e MPC, em [35] foram conduzidos estudos para a integração de um controlador Fuzzy-PID e o feedback visual de imagem em tempo real, onde obteve-se uma boa qualidade de soldagem com o sistema de alimentação Fuzzy-PID adaptativo ajustando automaticamente a taxa de alimentação do arame e a corrente de pico em tempo real.

Ainda, em [14], foi utilizado controle híbrido PI adaptativo para o controle da temperatura da linha central do cordão de solda para o processo MIG/MAG. Onde foi primeiramente projetado um controlador PI com ganho fixo, para depois otimizar o ganho proporcional e integral de maneira *offline*. E finalmente, foi empregado um algoritmo adaptativo para otimizar o controlador PI em tempo real. A estratégia empregada neste trabalho foi discutida no Capítulo III.

Por fim, foi mostrado em [36], o um estudo onde a imagem da poça de fusão é capturada a partir da parte superior da peça de trabalho, sendo esta imagem extraída por um algoritmo de processamento com o intuito de gerar um modelo que descreva a poça de fusão. Aliado a isto, foi projetado um controlador Neuro-Fuzzy para realizar o controle de penetração da solda.

V. CONCLUSÃO

Através da revisão bibliográfica acerca das técnicas de controle empregadas em processos de soldagem a arco elétrico, observou-se que as técnicas de controle clássico, principalmente o controlador PI, ainda são as mais utilizadas para máquinas de solda manuais que fazem o uso de conversores CC-CC (usualmente da topologia ponte completa). Outras opções menos utilizadas, porém com maior robustez são: SMC e FLC. Já para projetos de soldagem com maior nível de automatização, existe uma tendência na utilização de controle híbrido e controle inteligente, como controladores PI adaptativos, ANFIS, MPC e controladores Neuro-Fuzzy.

Além disso, observou-se uma tendência do emprego de controladores inteligentes e adaptativos para aprimorar a precisão e adaptabilidade dos processos de soldagem a arco elétrico, sendo especialmente vantajosos em aplicações industriais onde existe uma grande variabilidade de parâmetros e ajustes necessários.

Outro aspecto relevante observado é a integração de sensores avançados com controladores digitais para realizar o monitoramento em tempo real das condições do arco elétrico, possibilitando o ajuste e correção dos parâmetros de forma dinâmica. Isso permite um controle mais preciso e uma resposta mais rápida a mudanças nas condições de soldagem a fim de garantir melhor qualidade do produto final.

Por fim, vale notar que, com o aumento do desempenho do controle e, conseqüentemente, da velocidade de soldagem, tem-se a diminuição de ruídos, vibrações e geração de calor residual. A redução de emissão de gases de proteção e respingos de solda também é obtida. Isso tudo pode contribuir para melhores condições ambientais ao operador.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao aporte financeiro obtido através do Acordo de Parceria PD&I n° CTTPI026/2023 entre UFSM e Fricke-Balmer Soldas Ltda.

REFERÊNCIAS

- [1] J. C. Lippold, *Welding Metallurgy and Weldability*, Hoboken: John Wiley Sons, 2014.
- [2] S. Ozelik and K. Moore, *Modeling, sensing and control of gas metal arc welding*, Oxford: Elsevier, 2003.
- [3] S. A. Vendan, L. Gao, A. Garg, P. Kavitha, G. Dhivyasri and S. Rahul, *Interdisciplinary Treatment to Arc Welding Power Sources*, Singapore: Springer, 2019.
- [4] M. J. Kang and S. Rhee, Arc stability estimation and fuzzy control for arc stabilisation in short circuit transfer mode of CO₂ arc welding. *Science and Technology of welding and Joining*, v. 6, n. 2, p. 94-102, 2001.
- [5] K. Gupta and J. P. Davim, *Advanced welding and deforming*, Oxford: Elsevier, 2021.
- [6] P. J. Evald, J. L. Mor, R. Z. Azzolin and S. Botelho, "A nonlinear coupled-variables model for mass transfer modes in MIG-MAG processes with experimental validation", in *Int. J. of Model., Identif. and Control*, vol. 31, no. 4, pp. 361-373, 2019.
- [7] P. J. Evald, J. L. Mor, R. Z. Azzolin and S. Botelho, "A comprehensive model for miscellaneous mass transfer mode in gas metal arc welding", in *Proc. American Control Conference (ACC)*, 2017, pp. 2158-2163.
- [8] J. E. Pinto, J. M. Motta and S. C. Alfaro, "Real-Time Measurement of Width and Height of Weld Beads in GMAW Processes", *Sensors* (Basel, Switzerland), pp. 16, 2016.
- [9] Z. J. Wang, Y. M. Zhang and L. Wu, "Measurement and estimation of weld pool surface depth and weld penetration in pulsed gas metal arc welding", in *Weld. J.*, vol. 89, no. 6, pp. 117s-126s, Jun. 2010.
- [10] R. Yu, J. Han, Z. Zhao and L. Bai, "Real-Time Prediction of Welding Penetration Mode and Depth Based on Visual Characteristics of Weld Pool in GMAW Process", in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 81564-81573, 2020.
- [11] Z. Wang, "Monitoring of GMAW Weld Pool From the Reflected Laser Lines for Real-Time Control", in *IEEE Trans. on Industrial Informatics*, vol. 10, no. 4, pp. 2073-2083, Nov. 2014.
- [12] Y. K. Liu and Y. M. Zhang, "Model-Based Predictive Control of Weld Penetration in Gas Tungsten Arc Welding", in *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 3, pp. 955-966, May 2014.
- [13] P. Robert, M. Museau and H. Paris, "Effect of Temperature on the Quality of Welding Beads Deposited with CMT Technology", in *Proc. IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Dec 2018, pp. 680-684.
- [14] D. V. Nishar, J. L. Schiano, W. R. Perkins and R. A. Weber, "Adaptive control of temperature in arc welding", in *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 14, no. 4, pp. 4-12, Aug. 1994.
- [15] T. O. Santos, R. B. Caetano, J. M. Lemos and F. J. Coito, "Multipredictive adaptive control of arc welding trailing centerline temperature", in *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 8, no. 1, pp. 159-169, Jan. 2000.
- [16] Y. Liu, G. E. Cook, R. J. Barnett and J. F. Springfield, "PC-based arc ignition and arc length control system for gas tungsten arc welding", in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 28, no. 5, pp. 1160-1165, Sept.-Oct. 1992.
- [17] P. Jiluan, *Arc welding control*, Abington: Woodhead Publishing, 2003.
- [18] P. Li and Y. -M. Zhang, "Robust sensing of arc length", in *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, vol. 50, no. 3, pp. 697-704, June 2001.
- [19] J. B. Bjorgvinsson, G. E. Cook and K. Andersen, "Microprocessor-based arc voltage control for gas tungsten arc welding using gain scheduling", in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 29, no. 2, pp. 250-255, March-April 1993.
- [20] G.-R. Zhu, L. Zhao, A.-Y. Zhang, M. Yu, X. Li, S.-X. Duan and Y. Kang, "Sliding Mode Control and PI control for arc welding/cutting inverter", in *Proc. IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2008, pp. 1-4.
- [21] A. K. Paul, "Capability, Flexibility, and Legacy of PI Hinder Market Penetration Prospect of SOSM for Control of GMAW Process", in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 52, no. 1, pp. 384-394, Jan-Feb. 2016.
- [22] Y. Cao, Z. Wang, S. Hu and T. Wang, "Adaptive Predictive Control of Backside Weld Width in Pulsed Gas Metal Arc Welding Using Electrical Characteristic Signals as Feedback", in *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 31, no. 6, pp. 2879-2886, Nov. 2023.
- [23] Y. M. Zhang, R. Kovacevic and L. Li, "Adaptive control of full penetration gas tungsten arc welding", in *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 4, no. 4, pp. 394-403, July 1996.
- [24] L. J. Brown, S. P. Meyn and R. A. Weber, "Adaptive dead-time compensation with application to a robotic welding system", in *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, vol. 6, no. 3, pp. 335-349, May 1998.
- [25] P. Koseeyaporn, G. E. Cook and A. M. Strauss, "Adaptive voltage control in fusion arc welding", in *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 36, no. 5, pp. 1300-1307, Sept.-Oct. 2000.
- [26] R. W. Erickson and D. Maksimovic, *Fundamentals of Power Electronics*, 2nd ed., Norwell: Kluwer Academic Publishers, 2001, pp. 213-226.
- [27] Z. Xu, Y. Zhang and C. Han, "Research on voltage control system of welding machine based on improved fuzzy control algorithm", in *Proc. IEEE Chinese Automation Congress (CAC)*, 2017. p. 3627-3631.
- [28] N. George, V. N. Panchalai and E. Sebastian, "Digital feedback control of a full-bridge DC-DC converter with input voltage based gain scheduling", in *Proc. International Conference on Advances in Computing and Communications*, 2014, pp. 347-351.
- [29] H. Peng and C. Chang, "A simple nonlinear gain scheduling method in digital PWM converter control", in *Proc. IEEE International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2009, pp. 331-336.
- [30] J. C. Kelm, *Modeling and Control Strategies for Multiprocess Arc Welding Power Sources*, Case Western Reserve University, 2020.
- [31] L. Zhao, X. Bai-lu, W. Shu-hui, Z. Guo-rong, D. Shan-xu, K. Yong, "The sliding mode control for arc welding inverter power source", in *Proc. IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2008, pp. 1100-1104.
- [32] A. K. Paul, "Robust product design using SOSM for control of shielded metal arc-welding (SMAW) Process", in *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 63, no. 6, pp. 3717-3724, June 2016.
- [33] P. Mattavelli, L. Rossetto, G. Spiazzi and P. Tenti, "General-purpose fuzzy controller for DC-DC converters", in *IEEE Trans. on Power Electronics*, vol. 12, no. 1, pp. 79-86, Jan. 1997.
- [34] I. Iskender and A. Karaarslan, "The comparison of fuzzy logic and state space averaging based sliding control methods applied on an arc welding machine", in *World Academy Sci, Eng Technol.*, 8, 2005, pp. 100-105.
- [35] H. B. Chen, T. Lin, S. B. Chen, J. F. Wang, J. Q. Jia and H. Zhang, "Adaptive control on wire feeding in robot arc welding system", in *Proc. IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics*, 2008, pp. 119-122.
- [36] C. S. Wu and J. Gao, "Vision-based neuro-fuzzy control of weld penetration in gas tungsten arc welding of thin sheets", in *Int. J. of Modelling*, 2006.