

Evolução dos Processos de Automação em Células de Soldagem: Uma Revisão da Literatura

Isabella Cristina Souza Faria¹ , Remo Augusto Padovezi Filleti² , André Luís Helleno³ 

¹ Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, Piracicaba, SP, Brasil.

² Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, Piracicaba, SP, Brasil.

³ Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, SP, Brasil.

Como citar: Faria, ICS, Filleti, RAP, Helleno, AL. Evolução dos processos de automação em células de soldagem: uma revisão de literatura. *Soldagem & Inspeção*. 2022;27:e2704. <https://doi.org/10.1590/0104-9224/SI27.04>

Resumo: O processo de soldagem é um método de união de materiais metálicos por meio do aquecimento até uma temperatura adequada. Esse processo é crucial na manufatura de diversos componentes, desde a microeletrônica até componentes estruturais de máquinas pesadas. Com o advento da automação industrial, houve o início da utilização de robôs de solda na indústria, visando uma maior produtividade, qualidade e acuracidade do processo. A partir do século XXI, com a chegada da Indústria 4.0, é possível enxergar novas oportunidades de melhoria no processo de solda, tais como a introdução do sistema CPS (*Cyber Physical System*), a realidade aumentada e a realidade virtual. Tais técnicas permitem não só a automatização da operação de soldagem, mas também um maior controle do processo, cruzando informações do método planejado com a operação real de modo dinâmico e adaptativo. Nesse contexto de diversificado portfólio de tecnologias usadas no processo de soldagem, o presente trabalho se propõe a realizar uma revisão da literatura com o objetivo de mapear as principais evoluções tecnológicas da automação dos processos de soldagem a arco nos últimos anos.

Palavras-chave: Soldagem; Indústria 4.0; Robô; Sistema físico cibernético.

Evolution of Process Automation in Welding Cells: A Literature Review

Abstract: Welding is a method of joining metallic materials by heating them until an appropriate temperature. This process is crucial for the manufacturing of several components, from microelectronics to structural components of heavy machinery. With the advent of industrial automation, welding robots were developed and implemented in industry, aiming to increase productivity, quality, and accuracy of the process. With the dawning of the 21st century and arrival of Industry 4.0, new opportunities for improvement in the welding process arose, such as the Cyber Physical Systems – CPS, augmented reality, and virtual reality. These techniques go beyond the welding operation automation, by providing greater control of the process control, crossing information of the planned method with the actual operation, in a dynamic and adaptive way. In this context of manifold welding technologies, the present work carries out a literature review with the objective of mapping the main technological developments of arc welding automation over time.

Keywords: Welding; Industry 4.0; Robot; CPS.

1. Introdução

De acordo com a AWS (*American Welding Society*) [1], soldagem é o processo de união de materiais metálicos através de aquecimento até uma temperatura adequada. Há indicações de que o processo de soldagem é conhecido pela humanidade desde épocas remotas, há milhares de anos atrás [2].

Segundo [2], por muito tempo o uso da soldagem consistia, basicamente, no emprego do caldeamento por parte dos ferreiros. Foi apenas no final do século XIX, com a revolução industrial e com o aparecimento de novas técnicas, que a soldagem começou a ter papel importante nos processos de fabricação. De acordo com [1], esse método é amplamente utilizado na indústria, com aplicações que vão desde a indústria microeletrônica, de estrutura simples (e.g., como portões) até a criação de peças estruturais de máquinas que necessitam suportar grandes quantidades de esforço.

Historicamente, o processo de soldagem é realizado de maneira manual, por um ou mais soldadores, os quais realizam o procedimento *in loco*, sujeitos a um ambiente de temperaturas elevadas, exposição à uma alta quantidade de radiação e contato com gases tóxicos liberados durante a operação [1]. A operação de soldagem manual exige alta habilidade e trabalho intenso do operador. Antes de iniciar a soldagem, o soldador define a corrente elétrica da máquina de solda e a velocidade de soldagem, principais parâmetros envolvidos no aquecimento gerado durante o processo. Esse aquecimento, por sua vez, é o responsável

Recebido: 26 Maio, 2021. Aceito: 07 Out. 2021

E-mail(s): eng.isabella.faria@gmail.com (ICSF)



Este é um artigo publicado em acesso aberto (*Open Access*) sob a [licença Creative Commons Attribution Non-Commercial](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/), que permite uso, distribuição e reprodução em qualquer meio, sem restrições desde que sem fins comerciais e que o trabalho original seja corretamente citado.

pela penetração de solda, que normalmente é um requisito do design do produto [3]. Uma das vantagens do processo manual é que, à medida que o operador vai soldando, ele consegue enxergar a poça de fusão de solda e fazer correções na velocidade e no ângulo de trabalho.

No fim do século XX, com o advento da automação industrial, percebeu-se a oportunidade de utilizar robôs no processo de solda. Dentre os benefícios da substituição do trabalho humano pelo trabalho robótico/automatizado, destacam-se o maior grau de repetibilidade e de acuracidade da operação, além de haver uma melhoria na qualidade da solda e da segurança do operador, uma vez que, na solda automatizada, este fica distante da operação em si, o que, por consequência, reduz drasticamente sua exposição aos gases e fumos liberados durante a soldagem [4].

Com a chegada do século XXI e a introdução da Indústria 4.0 na manufatura, novos avanços e tecnologias aparecem para o processo de solda. De acordo com [5], a Indústria 4.0 traz consigo a atualização das tecnologias vigentes e transformação dos processos em sistemas ciberfísicos - CPS (*Cyber-Physical Systems*). Na soldagem, isso significa, para além da automação padrão, um controle mais flexível e dinâmico do processo, cruzando informações do método planejado com a operação real.

O surgimento de diferentes formas/tecnologias de execução do processo de soldagem nos últimos tempos, puxados pelo desenvolvimento da indústria manufatureira, ampliou consideravelmente a gama de opções disponíveis para a execução da soldagem, com diversos níveis de automação/robotização, desde o processo manual puro até o processo automatizado integrado ao CPS. De modo a explorar essas opções, o presente trabalho, por meio de uma revisão da literatura, se propõe a mapear as principais evoluções tecnológicas da automação do processo de soldagem a arco nos últimos anos, bem como identificar as principais linhas de pesquisa sobre o tema.

O trabalho está organizado como se segue. A segunda seção relaciona as principais tecnologias referentes a automatização e/ou robotização do processo de soldagem, incluindo as tecnologias provenientes da Indústria 4.0, como os CPS, a realidade aumentada e a realidade virtual. A terceira seção discute as informações previamente apresentadas, identificando os principais tópicos em desenvolvimento sobre o tema. Por fim, a quarta seção apresenta conclusões do trabalho.

2. Características e Tecnologias da Soldagem Automatizada

O processo de solda automatizado é realizado por robôs e auxiliado por sensores, garantindo acuracidade do processo, aumento da velocidade de ciclo, qualidade da solda e redução da interferência humana, visto que o operador só tem contato com a célula de soldagem quando vai posicionar/remover a peça do processo, quando inicializar o programa e quando realizar a inspeção visual das soldas ao final do processo [4].

A Figura 1 mostra um exemplo de estação/célula de solda robotizada [6], que consiste em um braço robótico alimentado com arame indicado pela Figura 1a, um posicionador onde a peça a ser soldada deve ser presa (Figura 1e), uma máquina de solda (Figura 1b), uma caixa de controle do sistema (Figura 1c), que faz a integração entre os sensores, o programa e a máquina de solda e um painel de operação (Figura 1d), diretamente conectado à caixa de controle. É a partir do painel de operação e da caixa de controle que o soldador inicializa o programa, bem como pode acompanhar o tempo de ciclo, mensagens de erro e dados sobre os sistemas de manutenção e segurança da célula [4].

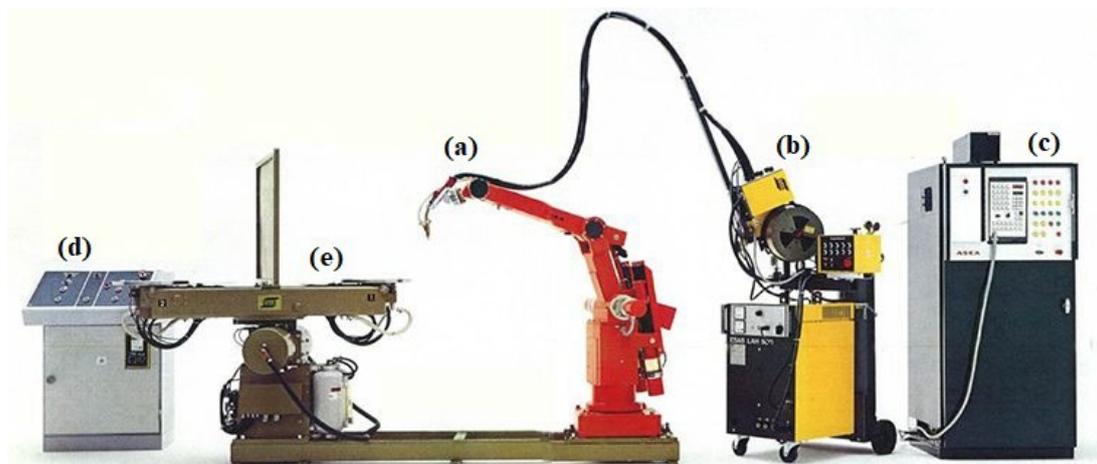


Figura 1. Célula de soldagem com robô industrial, formada por (a) um braço robótico articulado ASEA IRB 6, (b) uma máquina de solda, (c) uma caixa de controle, (d) um painel de operação, e (e) um posicionador [6].

Considerando o processo de solda robotizado, alguns fatores devem ser levados em conta durante seu desenvolvimento, tais como: o método de programação utilizado (*online* ou *offline*), o planejamento e a otimização da sequência de soldas, a

definição e o controle dos parâmetros de soldagem (corrente e tensão elétrica, velocidade de alimentação de arame, *stick out*) e o desenvolvimento da trajetória de soldagem.

2.1. Métodos de programação de robôs

A programação de robôs de solda é uma atividade que requer mão-de-obra qualificada, uma vez que os operadores necessitam não só do conhecimento sobre o processo de soldagem, mas também de linguagem de programação e de operação das interfaces de comunicação utilizadas na célula automatizada. A programação do robô soldador pode ser feita tanto *in loco* (por meio do *Teach Pendant* ou caixa de controle da célula de processo) quanto *offline* (por meio de softwares de programação, fora da célula de processo) [4].

O desenvolvimento da programação de robôs de solda remete ao final da década de 80. [7] publicou um estudo com uma metodologia para programação desse tipo de robô, considerando a descrição cinemática dos manipuladores (posicionador e braço robótico). Nessa metodologia, os movimentos são definidos com relação ao objeto de trabalho (peça a ser soldada) e o processo, de modo a permitir movimentos coordenados entre o robô e o posicionador. Em 1992, [8] apresentam o *software* ROBOEDIT, um assistente de programação utilizado para modificar e melhorar programas de robôs industriais, diminuindo o tempo de parada do robô e garantindo menores variações entre as definições do processo estabelecidas no programa e sua materialização física.

Das opções de programação *in loco*, o *Teach Pendant* se apresenta como uma das opções mais usadas, devido a facilidade de se visualizar em tempo real cada passo realizado pelo robô, para cada comando dado. Essa alternativa, entretanto, exige que o robô fique em estado não produtivo (modo de espera) durante todo o processo de programação, impactando nos custos com máquina parada [7].

A programação *offline*, por sua vez, reduz o tempo de parada do robô. Além disso, traz mais flexibilidade ao processo, pois o programa é feito separado da célula de operação (possibilitando que ela fique funcionando/produzindo durante o processo de programação). Nesse tipo de programação, o robô só fica em modo de espera para a realização dos ajustes finais do programa, feitos diretamente no chão de fábrica [8].

Usualmente, a programação *offline* é feita em um *software* específico da empresa fabricante dos robôs e, por meio de um menu, o usuário pode interagir com o sistema e definir as trajetórias e orientações da tocha de solda. De maneira simples, é possível alterar sequências de solda e remarcar pontos. Como o sistema já apresenta relações cinemáticas predefinidas, há uma redução na quantidade de marcação de pontos quando alguma orientação da tocha ou peças a ser soldada são alteradas, tornando mais fácil a programação de peças com geometrias complexas [8].

2.2. Planejamento e otimização de sequência de soldas

Um outro ponto importante na programação de robôs de soldagem é a definição da sequência de soldas a serem feitas, uma vez que isso impacta tanto na eficiência geral do processo quanto na qualidade final da solda, influenciando na ocorrência de empenamento das peças após o processo.

No processo de soldagem, a peça aquecida é submetida à uma alta temperatura, mas em algum ponto da peça afastado da região soldada a peça está com uma temperatura normal. Sendo assim, expansão e contração do metal aquecido é restringido pelo material resfriado devido às diferenças de temperatura. Como resultado, podem ser geradas tensões termomecânicas na área soldada. Quando essas tensões termomecânicas excedem um determinado grau, é criada uma deformação na solda que pode levar à problemas de qualidade e redução de tempo de vida do produto. Sendo assim, é importante definir sequências de soldas que diminuam essas deformações [9].

Frequentemente, o planejamento da sequência de soldas é feito de forma manual. Apesar de funcional, esse tipo de planejamento demanda um trabalho excessivo e nem sempre garante a melhor solução ou otimização. Ao encontro dessas questões, os trabalhos de [10] e de [11] propõem algoritmos genéticos de planejamento de movimento do robô, os quais evitam a redundância de tarefas.

Os trabalhos [12] e [13], por sua vez, propõem métodos de visão para escanear a junta, processar as informações e gerar trajetórias planejadas. Nesses métodos, é feita a captura da geometria da junta por meio das imagens e a trajetória é obtida via a quantidade de rotações e translações em torno dos eixos do robô.

No trabalho de [14] foi desenvolvido um sistema de baixo custo para fazer o monitoramento do grau de distorção de uma chapa de aço-carbono durante o processo de soldagem GMAW (*Gas Metal Arc Welding*). O acompanhamento da distorção é feito por meio do deslocamento de um ponto luminoso projetado sobre um anteparo. As informações capturadas são processadas e permitem quantificar a deformação da chapa ao longo do tempo. O monitoramento do grau da distorção se mostrou útil na redução dos custos de fabricação, pois possibilita realimentar a trajetória de um robô e alterar os parâmetros do processo para um menor aporte térmico nas regiões que apresentaram elevados valores de distorção.

Outro aspecto importante no planejamento das sequências de solda é possibilidade de colisões entre o robô e a peça. Um bom planejamento elimina a possibilidade de ocorrências desse tipo, preservando a integridade de ambos. Para esse fim, os

trabalhos de [9] e de [15] desenvolveram métodos de planejamento de solda a partir de algoritmos PSO (*Particle Swarm Optimization*) para obter a menor trajetória de soldagem livre de colisões e ainda considerando as deformações de soldagem.

O trabalho de [16] apresenta um método de navegação para guiar o robô até a posição inicial de solda, utilizando o menor tempo possível e evitando obstáculos e colisões entre a tocha de solda e a peça. Por meio de um algoritmo de mapeamento, o projeto CAD da peça é utilizado para definir o ponto inicial da solda e as trajetórias, e em seguida, o mesmo algoritmo realiza o *seam tracking*.

[18] e [17] trabalharam na redução do tempo de ciclo da solda automatizada, com o intuito de melhorar sua eficiência produtiva. No primeiro trabalho [17] isso é feito a partir da otimização dos pontos da trajetória da solda pelo algoritmo da rede elástica. Já no segundo trabalho [18], a redução do tempo de ciclo é feita por meio de um planejamento de trajetória multiobjetivo, de modo a se obter uma sequência de soldas mais eficiente. Como resultado, eles desenvolveram métodos de otimização de sequência de soldas que possibilitaram a realização do processo em um tempo menor.

2.3. Controle de parâmetros de solda robotizada a partir de sistemas de visão

Assim como na solda manual, na robotizada também há uma dificuldade na definição das variáveis do processo, como velocidade de solda, corrente e tensão elétrica. Da mesma forma como é feito para o método manual, a poça de fusão de solda é que dá o *feedback* sobre o andamento do processo, uma vez que sua geometria está intimamente relacionada com as variáveis do processo (i.e., velocidade de soldagem, corrente e tensão elétrica).

A diferença nesse caso é que, no processo automatizado, não há a presença do soldador para fazer as correções nos parâmetros em tempo real. Para esse fim, utilizam-se métodos controle dos parâmetros da soldagem baseados na captura de dados do processo e de imagens da poça de fusão. Como exemplo, [19], [20] e [21] desenvolveram métodos controle do processo de soldagem a partir da aquisição das imagens da poça de fusão e informações sobre a largura e profundidade da poça. No primeiro trabalho [19] foram adotadas novas técnicas de sensoriamento e inteligência artificial para garantir a estabilidade da soldagem por meio do controle da profundidade de penetração e da geometria da poça de fusão. Já no trabalho [20] foi utilizada a tecnologia de filtragem composta, um sistema de visão computacional para sensoriamento, e as imagens da poça de fusão foram capturadas durante o processo de soldagem GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*). Por último, o trabalho de [21] apresentou um sistema integrado com robô, sensor laser, câmera com dispositivo de carga acoplada – CCD (*Charge Coupled Device*), *encoder*, célula de trabalho e computador para controlar o robô.

No trabalho de [22] foi feito o desenvolvimento de robôs industriais inteligentes, os quais aprendem e melhoram a execução da solda em cada novo processo. Uma câmera captura imagens da poça de fusão e os dados são processados gerando informação sobre a qualidade da solda. Caso a solda não esteja dentro das especificações, são feitas alterações automáticas na tensão, corrente e *stick out* (distância do bocal até a peça). O resultado gerado é armazenado e utilizado em próximas atividades.

Os trabalhos de [23] e de [24] vão nessa mesma linha. No primeiro caso, a única diferença é que a corrente é mantida constante e é feita alteração apenas na velocidade de soldagem a partir de um sistema de controle *Fuzzy*. No segundo caso, um algoritmo de otimização é usado para prover a predição dos parâmetros de solda em tempo real.

Ainda se tratando de sistemas de captura de imagens da poça de fusão, o trabalho de [25] utiliza sensores visuais para capturar as dimensões da poça de fusão e da abertura de face da junta para garantir a corrente elétrica e a taxa de alimentação de arame adequados.

Em busca de obter a penetração de solda desejada, ou a requerida via projeto, os trabalhos [26] e [27] propõem sistemas de captura e processamento de imagens para avaliar a condição da poça de fusão e, assim, ajustar os parâmetros de corrente elétrica e velocidade da solda.

Uma outra preocupação durante o processo de soldagem automatizado é a manutenção do posicionamento da tocha em relação à junta de solda, pois ele garante a boa qualidade da solda. Nessa linha de atuação, [28] apresentam uma função de estabilidade por meio de um algoritmo “*downhand*” – o nome é devido aos vetores normais ao ponto de solda serem considerados na direção oposta ao vetor gravidade, ou seja, considera-se a soldagem na posição plana, que permite uma melhor penetração e deposição de material. Foram consideradas configurações de movimentos de inclinação e rotação do dispositivo onde a peça é presa. [29] vão além e apresentam um sistema para detecção e seguimento da linha de solda. Através das informações provenientes das imagens da junta, é feita a correção da velocidade e da trajetória do robô.

O trabalho de [30] apresenta um método de seguimento de trajetória em tempo real para um processo de soldagem a pulso GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding*), baseado em um sensor visual passivo que mede a diferença de coordenadas (x, y, z, rotação em x, rotação em y e rotação em z) entre a tocha e o centro da costura de solda. Um algoritmo de processamento de imagem robusto foi desenvolvido para extrair o centro da costura e as informações do sistema de visão são processadas por um controlado PID *Fuzzy* e, em caso de necessidade, é feita a correção na tensão elétrica do processo.

Em se tratando das possíveis variações na geometria das peças e da necessidade de autoprogramação em tempo real dos parâmetros de solda, os trabalhos [31] e [32] propõem métodos de escaneamento da abertura de raiz e da abertura de face da junta para alimentar um modelo que define os parâmetros ótimos para cada caso.

[33] propõem um método de controle automático de soldagem através de um algoritmo genético. Nesse trabalho, o algoritmo é utilizado para identificar e eliminar distúrbios do sistema, e o sinal de saída é enviado a um servomotor que controla a alimentação de arame de modo a garantir valores ideais para cada situação.

Os trabalhos de [34] e [35] desenvolveram sistemas de controle automático para a soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido - SMAW (*Shielded Metal Arc Welding*). Em ambos os casos, a alimentação da SMAW é feita a partir de uma fonte de corrente alternada e a modulação da corrente do arco é feita a partir da taxa de alimentação do eletrodo. Nesse sentido, [34] lançam mão de um controlador por modos deslizantes com compensação difusa adaptativa – AFSMC (*Adaptive Fuzzy Sliding Mode Controller*) para modular a taxa de alimentação do eletrodo, enquanto [35] usam um controlador PID com ganhos escalonados em lógica *Fuzzy* para esse fim. Tais sistemas possibilitam a substituição da operação usualmente manual do SMAW, que demanda soldadores experientes, pela operação automatizada.

O trabalho [36] apresenta um sistema de aquisição de dados através de *laser* ultrassônico. Os dados são capturados e analisados de modo a entender as características do cordão de solda. Devido à grande quantidade de algoritmos disponíveis para fazer o processamento de imagens obtidas pelos sistemas de visão, o trabalho [37] estabelece critérios para avaliar a performance de três algoritmos: um algoritmo de máquina e dois algoritmos de resposta humana. Nesse trabalho, os autores concluíram que a utilização de tais algoritmos em conjunto resultou em uma solução mais adequada para o controle dos parâmetros de solda, do que a utilização destes separadamente.

2.4. Detecção de juntas e desenvolvimento de trajetórias de solda

Desde a primeira Revolução Industrial, as subseqüentes revoluções geraram impacto na manufatura, desde o surgimento da máquina a vapor, passando por máquinas elétricas e indo até a automatização digital da produção, que tornaram a manufatura mais complexa, automática e sustentável [38].

A revolução mais recente que a manufatura vem observando é a Indústria 4.0, que define um novo nível de organização e controle de toda a cadeia de valor. Essa revolução traz sistemas de manufatura e logística na forma de CPS (*“Cyber Physical Systems”, em inglês*) e é baseada em nove pilares: *Big Data*, robôs autônomos, simulação, integração horizontal e vertical de sistemas, internet das coisas industrial, sistemas físico cibernéticos, informações na nuvem, manufatura aditiva e realidade aumentada [39].

O termo CPS é definido como sistema em que sistemas humanos e naturais são integrados com sistemas de comunicação, computação e controle (*cyber* espaços). Descentralização e comportamento autônomo dos processos são as principais características do CPS. Neles, os sensores definem as falhas que estão ocorrendo nas máquinas e automaticamente são feitos os reparos necessários. Além disso, esses sistemas permitem a otimização do uso de cada estação de trabalho com base no tempo de ciclo requerido para a operação. A troca contínua de dados é feita por meio de sistemas CPS, com auxílio de sistemas de armazenamento de dados em nuvem em tempo real [39].

No contexto da Indústria 4.0 e da introdução de CPS, em que os sistemas de produção devem reagir adaptativamente às variáveis dos processos, é importante que o processo de soldagem automatizado consiga se adaptar às variações da junta de solda. Como na solda geralmente se trabalha com peças fundidas ou conformadas, a tolerância dimensional dessas peças é alta, impactando consideravelmente na variação na geometria da junta.

Considerando as variações de geometria que a junta pode ter e a necessidade de se adequar a trajetória de solda à essas variações, [40] propõem um método de determinação da trajetória de soldas com chanfro em J por interpolação. O processo de interpolação consiste em construir novos pontos ou dados com base em pontos já conhecidos. Isso é feito através de uma função matemática que melhor se adequa a curva do movimento. [41], [42], [43] e [44], por sua vez, fazem uso de algoritmos para gerar trajetórias com base em imagens 3D da junta de solda. O trabalho de [41] propõem um sistema de visão a partir de um *laser* circular 3D e um algoritmo de detecção de trajetória baseados em C++ e RAPID. Já [42] apresentam um algoritmo de detecção de borda de *subpixel* baseado nos momentos de Zernike. [43] combinam o uso de correspondência de imagem e triangulação a partir do uso de homografia 2D. Por último, [44] desenvolveram um algoritmo adaptativo de crescimento de linha para a identificação robusta de juntas de solda.

Os trabalhos de [45] e de [46] propõem métodos de detecção da junta por *laser*, nos quais a posição do plano é determinada como uma média da posição dos pontos detectados. Ainda utilizando *laser* para fazer a detecção da junta, o trabalho de [47] permite obter o ponto inicial da solda filete formada por duas chapas. Os trabalhos de [48] e de [49] apresentam métodos de segmentar automaticamente o cordão de solda, utilizando polinômios para representar as características da junta.

Os trabalhos de [50] e de [51] apresentam métodos automáticos de aprendizagem do robô por meio de dados obtidos também por sensor *laser*. Com base nas informações, é gerada a trajetória do modelo geométrico. Já o trabalho de [52] utiliza um método de medição da junta através de 3 sensores *laser*. Um algoritmo é utilizado para extrair a linha de centro da junta com base na interpolação das informações obtidas por esses sensores.

Ainda se tratando de sistemas de visão utilizados para fazer o escaneamento da junta e redefinição dos parâmetros do movimento de costura de solda, o trabalho de [53] apresenta um sistema de reconhecimento do tipo de costura de solda a partir da medição da geometria de uma série de pontos da junta. Os trabalhos de [54], [55] e [56], por sua vez, propõem o reconhecimento da junta de solda por meio da diferença entre a trajetória realizada e a desejada. Além do reconhecimento,

essa diferença é usada como parâmetro retroalimentador para a correção do desvio de trajetória em relação à linha central do movimento.

Os trabalhos de [57], [58] e [59] utilizam sistemas com câmeras para captura de imagens da junta e definição de pontos da trajetória. [60], [61] e [62] vão além e, a partir da captura de imagens e definição de pontos da trajetória, realizam a eliminação de pontos indesejáveis.

Tendo em vista que os robôs normalmente apresentam um sistema de correção do seguimento de junta, o *seam tracking*, fazer com que a posição inicial do cordão de solda esteja correta é fundamental para garantir que a solda não saia da junta ou que o cordão não fique fora de posição. Nesse sentido, [63] desenvolveram uma função objetivo otimizada por algoritmo genético para localização da posição inicial do cordão, configurada a partir da combinação das restrições na postura da tocha, manipulabilidade e a faixa de cada ângulo da junta. [64], por sua vez, elaboraram um algoritmo de processamento de imagem robusto em conjunto com um servossistema de controle visual para esse fim. [65] propõem um modelo de localização da a posição inicial do cordão a partir de um método de processamento de imagens associado a um sistema de visão preciso, composto por um sensor de luz estruturado com um filtro óptico de banda estreita e uma luz LED, possibilitando a aquisição de imagem mais nítida. Outros trabalhos lançaram mão de métodos de casamento de padrões para o reconhecimento do ponto inicial de solda a partir de sistemas de aquisição de imagens 2D [66] e da interpolação polinomial de pixel [67].

Pensando na redução de tempo obtido por meio da programação *offline*, os trabalhos de [68] e [69] apresentam alternativas de programação por meio da interface CAD e sistemas de inteligência artificial, permitindo a criação automática das trajetórias de solda. Com o mesmo objetivo, o trabalho de [70] propõe o estabelecimento do modelo geométrico da solda, baseado no princípio da compensação por ferramentas 3D.

Para fazer a extração automática e identificação da costura de solda são utilizados diferentes algoritmos de extração e processamento das costuras de soldas. O trabalho de [71] faz uso do ANFIS (*Adaptive Network-Based Fuzzy Inference System*) para obter informações da geometria de das juntas de solda tampão. Já [72] desenvolveram um algoritmo morfológico de processamento de imagens para extração de costura de solda. No trabalho de [73] é utilizado um método de extração de trajetória 3D baseado em um sensor estéreo de luz estruturada. Foi utilizado um algoritmo de processamento de nuvem de pontos para melhor adaptar os seguimentos de solda aos diferentes tipos e tamanhos de juntas. Em [74] foi estabelecido um sistema de detecção de soldas baseado na tecnologia de reconstrução 3D para a soldagem a arco robotizada. Foi utilizado o algoritmo SFS (*Shape from shading*) para reconstruir as formas 3D do segmento de solda e a informação da curvatura é extraída como vetor de recurso das soldas. Por último, o trabalho de [75] apresenta um algoritmo para gerar os códigos de movimento de um robô de solda. Baseado no modelo geométrico, o planejamento da trajetória de solda é desenvolvido com um controle estratégico para o movimento de costura de solda.

2.5. Controle de costura de solda (*Seam tracking*)

Durante o movimento de costura da solda, é importante que a solda não saia fora da junta. Caso isso ocorra, o substrato pode ser rasgado ou o resultado pode ser o cordão de solda deslocado, em desacordo com o requerido. Uma ferramenta que auxilia na manutenção do seguimento da junta de solda é o *seam tracking*. Ela consiste em uma medição das bordas da junta durante o processo, possibilitando a redefinição do movimento de costura em tempo real. Os trabalhos de [76], [77], [78], [79] lançam mão dessa ferramenta para propor controles adaptativos da trajetória de solda que reduzem a necessidade de programação acurada do robô. O primeiro trabalho [76] utiliza um algoritmo de controle da tocha, já [77] fazem uso de um algoritmo de controle de modo deslizante e adaptativo para lidar com controle de trajetória *seam tracking* de um manipulador de solda robotizada. [78] propõem um controle adaptativo a um WMR (*Welding Mobile Robot*) de duas rodas para garantir o seguimento da trajetória a uma velocidade constante de solda ponto. Já o trabalho [79] apresenta o projeto e a validação de um sistema de *seam tracking* 6D desenvolvido no FUSE (*Flexibe Unified Simulation Environment*), integrando o software de prototipagem.

Em alguns casos, são utilizados sistemas de visão para capturar imagens da junta e, assim, redefinir a trajetória em tempo real. Os trabalhos de [80], [81] e [82] utilizam câmeras que captam e filtram as imagens, possibilitando que algoritmos servo-controladores eliminem virtualmente os erros de trajetória.

[83] desenvolveram um sistema de soldagem de seguimento de trajetória baseado em *software* e sensoriamento por sistemas de visão. Nesse trabalho, o *software* que foi desenvolvido é peça chave do sistema, gerenciando, por meio de módulos, desde a captura e processamento das imagens do sistema de sensoriamento, até processos importantes de operação, como controle de energia de soldagem, parametrização inteligente, e planejamento e otimização de sequências de solda.

O trabalho de [84] apresenta um sistema de sensoriamento visual para soldas tampão. A captura de imagens é feita via câmeras CCD e um laser diodo com lentes cilíndricas. Após a aquisição da imagem, é possível minimizar o efeito dos respingos de solda, além disso, a diferença nos níveis de cinza da imagem permite definir a posição da junta de solda.

[85] desenvolveram um sistema inovativo que consiste em um robô industrial e um scanner. O método é baseado no princípio de triangulação óptica, na qual a câmera monitora a área de trabalho do scanner. Esse scanner é montado

no robô e uma iluminação laser adicional permite a equalização da intensidade de luz na zona de interação. Com essa configuração, é possível obter dados de posicionamento mais precisos. [86] apresentam um método para detectar desvios entre o foco de um laser e a costura de solda desejada durante o processo de soldagem a laser de alta potência. O trabalho de [87] também usa um sistema de laser circular para obter as informações 3D da solda.

Já os trabalhos de [88] e de [89] apresentam sistemas de visão que incluem câmeras montadas sobre a tocha de solda e o uso de lógica e controlador *Fuzzy* para o controle da tocha, para minimizar o erro entre a linha de centro da costura e a tocha, em cada passe.

O trabalho de [90] fez uso de uma câmera de luz cruzada para demarcar apenas a região de interesse. As linhas da região demarcada são computadas e usadas como *template* para criar os pontos de solda. Similarmente, o trabalho [91] utiliza, ao invés de câmera de luz cruzada, um sistema com luzes de LED auxiliares para auxiliar o processamento das imagens. O trabalho de [92] apresenta um sistema de visão passivo, no qual as câmeras apenas capturam as imagens do processo e a posição real da tocha é extraída por meio da transformada de Hough dessas imagens. Com base nessa posição real, é feita a correção dos parâmetros de soldagem.

Em alguns casos, além da captura das imagens do processo, são utilizados outros tipos de sensores para fazer a medição em tempo real da junta. [93] desenvolveram um sistema de seguimento de trajetória baseado em um sensor de arco rotativo. O sensor escaneia a junta com formato V e são feitas alterações na corrente elétrica à medida que o comprimento da solda varia. Já o trabalho de [94] usa um sensor de luminosidade que utiliza a luz produzida pelo arco de solda para definir a trajetória de costura.

[95] utilizam um sensor óptico na frente da tocha para medir a posição atual, em tempo real, e passa essas as informações para o controlador, o qual ajusta os parâmetros de processo utilizando um modelo dinâmico. Os trabalhos de [96] e de [97] fazem o controle da costura por meio do método de triangulação, que mede a profundidade da junta e, assim, consegue ajustar o modelo da trajetória.

Além do sistema de visão para fazer a captura das imagens da junta, é muito importante desenvolver um algoritmo robusto para o processamento dessas imagens. Nesse sentido, o trabalho de [98] apresenta um *software* que calcula o *gap* da junta e cria uma estratégia de posicionamento da tocha, a partir do ponto inicial da solda. O trabalho de [99] usa um algoritmo para identificar as arestas da solda para, em seguida, conectá-las, por meio da transformação de Hough, e obter o centro do arame.

Outro aspecto essencial para garantir a correção do movimento durante o processo é o uso de controladores. Nesse sentido, há soluções dos mais variados tipos, tais como controladores baseados em modelos cinemáticos e dinâmicos do robô de solda [100], controladores PID [101] e/ou que aplicam rede neural para direcionar o robô a seguir a linha de solda [102].

[102] fizeram a comparação e identificação do método que produz maior precisão para o movimento do robô até o ponto de solda. Foram comparados os métodos Levenberg-Marquardt, SCG (*Scaled Conjugate Gradient*) e BR (*Bayesian Regularization*). Os três métodos foram treinados usando uma ferramenta de ajuste baseada no método de Redes Neurais Artificiais – ANN (*Artificial Neural Networks*). De acordo com os autores, a ANN foi empregada pela sua capacidade elevada de aprender e identificar padrões complexos quando comparado a outras técnicas computacionais. Tal capacidade permite, por exemplo, que o padrão implícito entre a linha de solda e os ângulos da junta possa ser facilmente identificado, além de dispensar a necessidade do conhecimento prévio da cinemática inversa do manipulador robótico.

No trabalho de [102], a ferramenta de ANN mapeia as coordenadas (x, y) da linha de solda obtidas por meio do processamento de imagens e gera os valores de saída para as coordenadas (x, y, z) das juntas do robô. Já em [103] um *software* de tomada de decisão ANN foi combinado com um sistema de visão de modo a se obter um controle adaptativo para o processo de soldagem GMAW, baseado em AI (*Artificial Intelligence*). O sistema de visão utiliza sensores *laser* para escanear o segmento de solda e obter as informações do perfil da solda e da junta. A partir do processamento desses dados, os parâmetros de solda são otimizados pelo sistema de tomada de decisão. Ainda se tratando do uso da ferramenta ANN no controle do processo de soldagem, [104] desenvolveram um algoritmo para simplificar a relação entre os parâmetros do processo e a geometria do cordão de solda por meio da rede neural para o processo de micro soldagem a laser de uma chapa fina de aço.

A Figura 2 apresenta o diagrama do fluxo de processamento de imagens durante o processo de soldagem GMAW utilizado no trabalho de [105]. O sistema apresentado em [105] consiste em quatro partes: o sistema robotizado (robô industrial FANUC, com seis graus de liberdade, e seu controlador), o sistema de visão, a máquina de solda e o computador. Após feita a captura de imagens do posicionador do robô, os dados são enviados para o computador, onde as imagens são restauradas e passam por um filtro mediano. Em seguida, o algoritmo *Canny* melhorado é utilizado no processamento das informações, acompanhado pela remoção das bordas falsas. Por fim, as bordas são escaneadas e é possível extrair os parâmetros do processo (e.g., a geometria da poça de fusão). A partir dessas informações, é possível calcular o desvio entre o centro da poça de fusão e a linha de centro da costura de solda, o qual é enviado para o controlador do robô realizar a correção dos parâmetros.

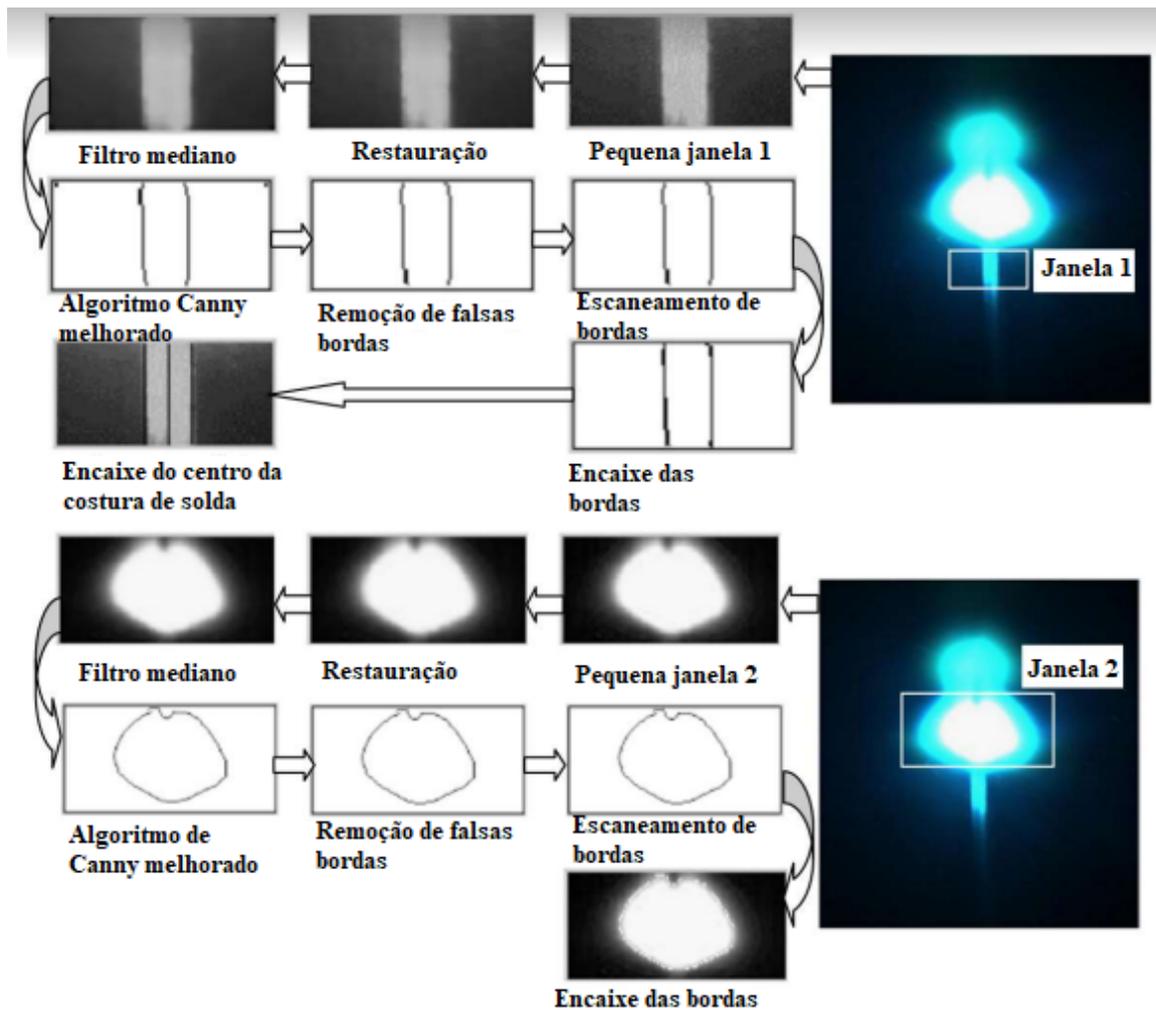


Figura 2. Fluxo do processamento de imagens durante a soldagem GMAW [105].

Por meio de um sistema de visão passivo, [106] lançam mão de um algoritmo para controlar a regulagem da corrente, tensão e da alimentação do arame, ao invés de controlar diretamente a posição da tocha. O posicionamento vertical da tocha é alterado através da variação da tensão de soldagem.

Em algumas situações, são necessários sistemas adicionais ao robô para que seja feito o controle do seguimento de junta. O trabalho de [107] apresenta um servomecanismo com fuso de esferas descentralizado para mover o robô. Esse servomecanismo age como um suporte móvel e opera separado do robô. São utilizadas câmeras para captar o movimento durante o processo e o erro de posição é compensado por esse suporte móvel, que altera o movimento da tocha.

Assim como no caso anterior, os trabalhos de [108] e de [109] também utilizam sistemas servomotores para fazer as correções do movimento de acordo com as características obtidas a partir de sistemas de visão. Seguindo essa linha, o trabalho [110] investiga a utilização de sensores para a correção, em tempo real, para o processo de soldagem orbital, com o auxílio de um robô antropomórfico para a condução da tocha.

2.6. Realidade virtual e realidade aumentada em sistemas robotizados

De acordo com [39], um dos pilares da Indústria 4.0 é o uso de realidade aumentada, pois ela possibilita a execução de atividades em ambientes perigosos e insalubres para o operador por meio de teleoperação, na qual o movimento captado pelo operador é transmitido para o robô, remotamente. No caso da soldagem, o uso da realidade aumentada possibilita que o operador trabalhe remotamente e que consiga visualizar e ajustar os parâmetros de solda, inclusive aqueles que dependem de respostas mais imediatas, como aposição e orientação da tocha e velocidade de soldagem [111].

Os trabalhos de [111] e [112] propõem interfaces intuitivas de programação remota de robôs utilizando realidade aumentada. Os sistemas usam câmeras de profundidade para reconstruir as superfícies da peça de trabalho e dispositivos de imagem permitem ao usuário a definição de trajetórias de soldas e orientação da tocha.

O trabalho de [113], apresenta um sistema de programação orientada para as atividades de uma célula remota de soldagem a laser. Nesse sistema, o usuário seleciona o modelo CAD (posição de soldagem, restrições de geometria) e os

parâmetros de processo, em seguida, a atividade a ser executada é parametrizada e otimizada automaticamente, definindo a sequência de solda, o ângulo de inclinação e a orientação da direção da tocha. Essas informações são, então, encaminhadas para o robô, que as executa.

[114] propõem um sistema espacial de realidade aumentada que projeta o alinhamento das informações e a integração entre o modelo CAD e as características do ambiente. Esse sistema consiste em três partes: aquisição e processamento de informação (modelos CAD, parâmetros de processo), sensoriamento da célula de trabalho (tecnologia laser) e sistema de controle e adaptação (mapeamento de projeções e otimização dos movimentos sem colisões).

Além da realidade aumentada, outra tecnologia que pode ser utilizada na programação e operação de robôs é a realidade virtual. Os trabalhos de [115], [116] e [117] apresentam sistemas com sensores para observar o processo de solda, a partir dos quais um soldador opera uma tocha de solda virtual e ajusta seu movimento em um espaço 3D baseado nas imagens obtidas dos sensores, que permitem visualizar a poça de fusão. Os ajustes são registrados, analisados e é feita a correção do movimento pelo robô.

A Figura 3 representa o sistema utilizado no trabalho [117], que consiste em duas estações de trabalho: a estação virtual e a estação de soldagem. Na estação virtual, um soldador humano pode observar as imagens capturadas pelo sistema de sensoriamento da poça de fusão de solda (localizado na estação de soldagem) e mover a tocha de soldagem virtual para corrigir os desvios de posicionamento da tocha. Os movimentos do soldador são capturados por um sensor de pulso e as coordenadas 3D da tocha virtual são enviadas para o computador, que as processa e as envia para o robô de solda (localizado na estação de soldagem) realizar o movimento.

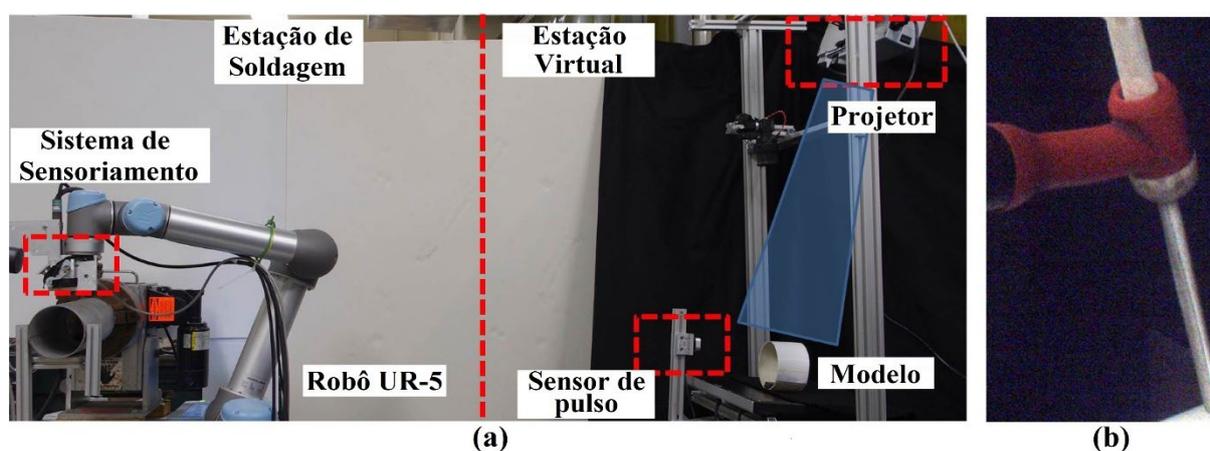


Figura 3. (a) Visão geral do sistema de soldagem virtual (b) tocha de soldagem virtual (com peso e tamanho similares à tocha de soldagem real) [117].

Ainda se tratando das novas tecnologias que vieram com a Indústria 4.0, os trabalhos de [118] e [119] apresentam sistemas físico cibernéticos de realidade virtual para interação entre operador e robô. A atividade do robô é renderizada em tempo real e o deslocamento é controlado pelo humano por meio do ajuste da velocidade.

Por fim, o trabalho [120] propõe uma interface, baseada em realidade virtual, para facilitar o aprendizado de tarefas de solda para programação *offline* de robôs, que computar a força que deve ser feita durante seu uso.

2.7. Sistemas de visão integrados à soldagem manual

Mesmo com a evolução da robotização no processo de soldagem, ainda exigem casos nos quais o método manual não é possível de ser substituído pelo automatizado [121], devido às questões de acessibilidade e geometria da peça.

Na soldagem manual, o tempo de resposta do soldador para uma correção no movimento está diretamente relacionado com seu nível de habilidade e experiência na atividade. Ao investigar as diferenças entre soldadores com e sem experiência, a partir dos dados de posicionamento adquiridos por um sistema de captura de movimento tridimensional, [122] identificaram que um soldador experiente tem maior controle da tocha e garante menos variação de posição e velocidade nas três direções. Isso faz com que a solda tenha maior grau de qualidade.

Como a habilidade é uma característica que demanda investimento e tempo, tanto por parte das empresas quanto por parte dos operadores, [3], [121] e [123] propõem sistemas de controle para auxiliar o soldador a regular o movimento de seu braço em tempo real, com o intuito de se atingir a velocidade desejada da tocha e eliminar vibrações indesejadas. Tais sistemas se baseiam nas características geométricas da poça de fusão e possibilitam que uma solda de qualidade seja realizada por soldadores menos experientes, facilitando a execução e o planejamento da operação de solda.

3. Discussão

A análise dos artigos mostra uma busca contínua pela melhoria do processo de soldagem a partir da implementação individual e cruzada de novas tecnologias. Até mesmo para o caso da solda manual, processo utilizado desde a Antiguidade, pode-se encontrar trabalhos com o objetivo de melhor controlar os parâmetros de solda, com o auxílio de imagens feitas da poça de fusão em tempo real. Essas novas tecnologias tornam o processo de solda manual mais robusto e auxilia na seleção de parâmetros como: corrente elétrica, tensão elétrica, e velocidade de alimentação de arame. Também são discutidos métodos de avaliar o grau de habilidade de um soldador, com o uso de sensores que captam variação de movimento. A partir desses métodos, é possível classificar os funcionários e, de acordo com a sua avaliação, definir de maneira mais assertiva as atividades para cada um deles.

Para o caso da solda automatizada, pode-se observar o uso de sistemas de visão e sensores para captar informações do processo e melhorar a qualidade da solda. Além disso, esses sistemas permitem a detecção de peças, planejamento e otimização da trajetória, reduzindo o tempo de ciclo, os erros de leitura da peça e as distorções geradas pela soldagem.

Sobre a programação de robôs de solda, observa-se a busca por métodos mais simplificados e *offline*, que demandem menos tempo de parada do robô e que gerem automaticamente as trajetórias de solda. Isso permite o cálculo do tempo do processo antecipadamente e a eliminação de colisões entre o robô e a peça, o que também elimina tempos de parada com manutenção e gastos com trocas desnecessárias de peças/partes dos robôs.

No contexto da Indústria 4.0, pode-se observar o uso de sistemas de visão integrados com algoritmos que calculam a diferença entre a junta de solda real e a junta projetada/desejada em tempo real. São utilizados controladores (e.g., Proporcional, Integral e Derivativo - PID, *Fuzzy*) e sistemas ANN que corrigem o erro – a partir da alteração na velocidade de alimentação de arame e corrente elétrica - e tornam o processo adaptativo às variações da junta de solda. Os benefícios desses sistemas são a melhoria da qualidade da solda, eliminação de erros, rasgos de peças, porosidade e colisão durante a soldagem. Além disso, também são feitos estudos sobre a utilização de realidade virtual e aumentada em sistemas de solda robotizados. Nesses casos, o soldador não tem contato direto com o processo, apenas indireto: são utilizadas interfaces 3D em que ele controla e corrige remotamente o posicionamento da tocha em tempo real. É utilizada realidade aumentada para fazer o alinhamento entre os sistemas CAD e o ambiente da célula de soldagem e para fazer a programação de tarefas do robô, facilitando a integração homem-máquina.

A Figura 4 sintetiza os resultados da pesquisa feita neste trabalho, apresentando as principais tecnologias nos processos de solda manual, automatizado e integrado com CPS:

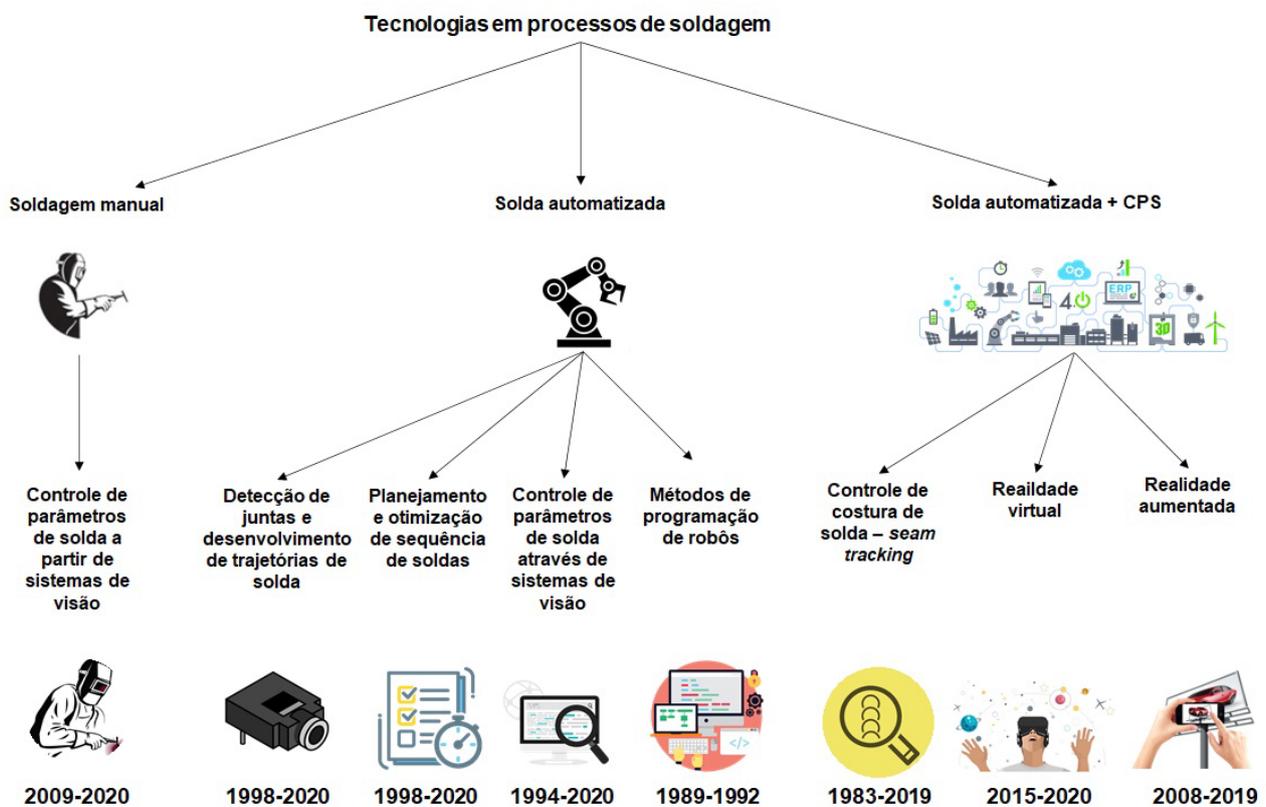


Figura 4. Tecnologias utilizadas nos processos de soldagem.

4. Conclusão

Esse trabalho se propôs a mapear as principais evoluções tecnológicas da automação dos processos de soldagem a arco nos últimos anos, para isso foi feita uma revisão da literatura. Os resultados da revisão bibliográfica de soldagem indicaram uma busca contínua pela melhoria do processo através de novas tecnologias. Essas novas tecnologias tornam o processo de solda, mais robusto e eficaz.

Para a solda manual, observou-se trabalhos visando reduzir a disparidade de habilidade entre soldadores experientes e sem experiência. No caso da solda automatizada, pode-se observar o uso de sistemas de visão e sensores para captar informações do processo e melhorar a qualidade da solda. Também foi possível observar uma busca por novos métodos de programação que evitem a parada do robô. Por último, observou-se o uso de tecnologias habilitadoras da Indústria 4.0, como os CPS, a realidade aumentada e a realidade virtual, que conseguem usar ao mesmo tempo, a experiência de um soldador com a precisão e repetibilidade da automação, via sensores e *softwares* adequados. O processo se torna, assim, mais flexível e adaptativo às variações da junta.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Metodista de Piracicaba PPGEP-UNIMEP pela oportunidade para realização do trabalho. Os autores também gostariam de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio fornecido em forma de bolsa de mestrado durante o desenvolvimento deste trabalho.

Referências

- [1] Marques, P.V., Modenesi, J.P., Bracarense, A.Q. Soldagem: fundamentos e tecnologia. Belo Horizonte: Editora UFMG; 2009.
- [2] Weman K. Welding processes handbook. 2nd ed. Cambridge: Woodhead Publishing; 2012. Introduction to welding; p. 1–12.
- [3] Erden MS, Maric B. Assisting manual welding with robot. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2011;27(4):818-828. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.01.003>.
- [4] Bolmsjo GS. Robotic arc welding. Laxenburg: IFAC Robot Control; 1988.
- [5] Silva GV, Silva GC. Virtual prototyping of an automotive manufacturing cyber-physical system based on artificial neural network. *Journal of Production and Automation*. 2018;1(2):41-58.
- [6] ABB. Top 10 robotics firsts from ABB. *ABB Conversations*; 2013 [acesso em 26 maio 2021]. Available at: <https://www.abb-conversations.com/2013/11/top-10-robotics-firsts-from-abb/>.
- [7] Bolmsjö GS. Programming robot systems for arc-welding in small series production. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 1989;5(2-3):199-205. [http://dx.doi.org/10.1016/0736-5845\(89\)90064-1](http://dx.doi.org/10.1016/0736-5845(89)90064-1).
- [8] Sullivan EC, Rajaram NS. A knowledge-based approach to programming welding robots. *ISA Transactions*. 1992;31(2):115-133. [http://dx.doi.org/10.1016/0019-0578\(92\)90033-F](http://dx.doi.org/10.1016/0019-0578(92)90033-F).
- [9] Wang XW, Shi YP, Yan YX, Gu XS. Intelligent welding robot path optimization based on discrete elite PSO. *Soft Computing*. 2017;21(20):5869-5881. <http://dx.doi.org/10.1007/s00500-016-2121-2>.
- [10] Gao WX, Tang Q, Yao J, Yang YR. Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2020;62:101862. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101862>.
- [11] Wang XW, Shi YP, Ding DY, Gu XS. Double global optimum genetic algorithm-particle swarm optimization-based welding robot path planning. *Engineering Optimization*. 2016;48(2):299-316. <http://dx.doi.org/10.1080/0305215X.2015.1005084>.
- [12] Liu Y, Tian XC. Robot path planning with two-axis positioner for non-ideal sphere-pipe joint welding based on laser scanning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;105(1-4):1295-1310. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-04344-3>.
- [13] Tsai MJ, Lee HW, Ann NJ. Machine vision-based path planning for a robotic golf club head welding system. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2011;27(4):843-849. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.01.005>.
- [14] Coelho FGF, Bracarense AQ, Tamine S, Boursault J. Uso de sistema de visão de baixo custo para monitoramento de distorções durante deposições multicamadas no processo de soldagem GMAW. *Soldagem e Inspeção*. 2020;25:e2524. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/si25.24>.
- [15] Wang XW, Xue LK, Yan YX, Gu XS. Welding robot collision-free path optimization. *Applied Sciences-Basel*. 2017;7(2):11.
- [16] Liu ZY, Bu WH, Tan JR. Motion navigation for arc welding robots based on feature mapping in a simulation environment. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2010;26(2):137-144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2009.09.002>.

- [17] Petiot JF, Chedmail P, Hascoet JY. Contribution to the scheduling of trajectories in robotics. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 1998;14(3):237-251. [http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845\(97\)00032-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0736-5845(97)00032-X).
- [18] Wang XW, Min Y, Gu XS. Multi-objective path optimization for arc welding robot based on discrete DN multi-objective particle swarm optimization. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2019;16(6):10.
- [19] Chen HB, Lv FL, Lin T, Chen SB. Closed-loop control of robotic arc welding system with full-penetration monitoring. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2009;56(5):565-578. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-009-9329-7>.
- [20] Chen SB, Zhang Y, Qiu T, Lin T. Robotic welding systems with vision-sensing and self-learning neuron control of arc welding dynamic process. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2003;36(2):191-208. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022652706683>.
- [21] Chen XZ, Yu J. Acquisition and optimization of weld trajectory and pose information for robot welding of spatial corrugated web sheet based on laser sensing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(9-12):3033-3041. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-1716-4>.
- [22] Aviles-Viñas JF, Rios-Cabrera R, Lopez-Juarez I. On-line learning of welding bead geometry in industrial robots. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;83(1-4):217-231. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7422-6>.
- [23] Baskoro AS, Masuda R, Kabutomori M, Suga Y. An application of genetic algorithm for edge detection of molten pool in fixed pipe welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;45(11-12):1104-1112. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2048-1>.
- [24] Dong H, Cong M, Zhang YM, Liu YK, Chen HP. Modeling, and real-time prediction for complex welding process based on weld pool. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;96(5-8):2495-2508. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-1685-7>.
- [25] Shen HY, Huang XX, Lin T, Chen B. Weld formation control for arc welding robot. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2009;44(5-6):512-519. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-008-1847-0>.
- [26] Jiang C, Zhang FB, Wang ZM. Image Processing of Aluminum Alloy Weld Pool for Robotic VPPAW based on visual sensing. *IEEE Access : Practical Innovations, Open Solutions*. 2017;5:21567-21573. <http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2761986>.
- [27] Liu YK, Zhang WJ, Zhang YM. Dynamic neuro-fuzzy-based human intelligence modeling and control in GTAW. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2015;12(1):324-335. <http://dx.doi.org/10.1109/TASE.2013.2279157>.
- [28] Kim JW, Bae HS. A study on a vision sensor system for tracking the I-butt weld joints. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2005;19(10):1856-1863. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02984264>.
- [29] Kim T, Suto T, Kobayashi J, Kim J, Suga Y. Automatic welding system using speed controllable autonomous mobile robot. *JSME International Journal. Series A, Solid Mechanics and Material Engineering*. 2006;49(1):53-57. <http://dx.doi.org/10.1299/jsmea.49.53>.
- [30] Ma HB, Wei SC, Sheng ZX, Lin T, Chen SB. Robot welding seam tracking method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2010;48(9-12):945-953. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-009-2349-4>.
- [31] Wu CS, Liu DJ, Wu L. An auto-programming system of MAG welding parameters for vision-based robot. *Robotics and Autonomous Systems*. 1994;13(4):291-296. [http://dx.doi.org/10.1016/0921-8890\(94\)90012-4](http://dx.doi.org/10.1016/0921-8890(94)90012-4).
- [32] Xu PQ, Tang XH, Lu FQ, Yao S. Welded seam 3D calculation and seam location for welding robot system. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2006;11(3):352-357. <http://dx.doi.org/10.1179/174329313X13789830157221>.
- [33] Wu CY, Tung PC. Application of genetic algorithm to external noise cancellation and compensation in automatic arc welding system. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2008;19(3):249-256. <http://dx.doi.org/10.1007/s10845-008-0078-4>.
- [34] Lee CY, Tung PC, Chu WH. Adaptive fuzzy sliding mode control for an automatic arc welding system. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006;29(5):481-489. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-005-2539-7>.
- [35] Chu WH, Tung PC. Development of an automatic arc welding system using SMAW process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005;27(3-4):281-287. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-004-2171-y>.
- [36] Miller M, Mi B, Kita A, Ume IC. Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring. *Mechatronics*. 2002;12(9-10):1259-1269. [http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158\(02\)00028-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0957-4158(02)00028-4).
- [37] Liu YK, Zhang YM. Supervised learning of human welder behaviors for intelligent robotic welding. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2017;14(3):1532-1541. <http://dx.doi.org/10.1109/TASE.2015.2453351>.
- [38] Qin J, Liu Y, Grosvenor R. A categorical framework of manufacturing for industry 4.0 and beyond. *Procedia CIRP*. 2016;52:173-178. <http://dx.doi.org/10.1016/j.procir.2016.08.005>.
- [39] Vaidya S, Ambad P, Bhosle S. Industry 4.0 – a glimpse. *Procedia Manufacturing*. 2018;20:233-238. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>.
- [40] Chen CL, Hu SS, He DL, Shen JQ. An approach to the path planning of tube-sphere intersection welds with the robot dedicated to J-groove joints. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2013;29(4):41-48. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2012.10.006>.

- [41] Xu PQ, Xu GX, Tang XH, Yao S. A visual seam tracking system for robotic arc welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;37(1-2):70-75. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-0939-6>.
- [42] Chen SB, Chen XZ, Qiu T, Li JQ. Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2005;43(1):77-97. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-005-2966-6>.
- [43] Dinham M, Fang G. Autonomous weld seam identification and localization using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2013;29(5):288-301. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2013.01.004>.
- [44] Dinham M, Fang G. Detection of fillet weld joints using an adaptive line growing algorithm for robotic arc welding. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2014;30(3):229-243. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2013.10.008>.
- [45] Lee S, Park J. Hand-eye LRF-based iterative plane detection method for autonomous robotic welding. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2015;12:14. <http://dx.doi.org/10.5772/61870>.
- [46] Lee SK, Chang WS, Yoo WS, Na SJ. A study on a vision sensor-based laser welding system for bellows. *Journal of Manufacturing Systems*. 2000;19(4):249-255. [http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6125\(01\)80004-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0278-6125(01)80004-2).
- [47] Liu FQ, Wang ZY, Ji Y. Precise initial weld position identification of a fillet weld seam using laser vision technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;99(5-8):2059-2068. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2574-9>.
- [48] Ye GL, Guo JW, Sun ZZ, Li C, Zhong SY. Weld bead recognition using laser vision with model-based classification. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2018;52:9-16. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2018.01.006>.
- [49] Ye Z, Fang G, Chen SB, Zou JJ. Passive vision-based system for pulse-MAG welding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;67(9-12):1987-1996. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-012-4625-y>.
- [50] Xue B, Chang BH, Peng GD, Gao YJ, Tian ZJ, Du D, et al. A vision based detection method for narrow butt joints and a robotic system. *Sensors*. 2019;19(5):1144. <http://dx.doi.org/10.3390/s19051144>. PMID:30845763.
- [51] Kim P, Rhee S, Lee CH. Automatic teaching of welding robot for free-formed seam using laser vision sensor. *Optics and Lasers in Engineering*. 1999;31(3):173-182. [http://dx.doi.org/10.1016/S0143-8166\(99\)00024-X](http://dx.doi.org/10.1016/S0143-8166(99)00024-X).
- [52] Shao WJ, Huang Y, Zhang Y. A novel weld seam detection method for space weld seam of narrow butt joint in laser welding. *Optics & Laser Technology*. 2018;99:39-51. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlastec.2017.09.037>.
- [53] Fan JF, Jing FS, Fang ZJ, Tan M. Automatic recognition system of welding seam type based on SVM method. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92(1-4):989-999. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0202-8>.
- [54] Lei T, Huang Y, Shao WJ, Liu WN, Rong YM. A tactual weld method in super narrow gap of thick plates. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2020;62:101864. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101864>.
- [55] Zeng J, Chang BH, Du D, Hong YX, Chang SH, Zou YR. A precise visual method for narrow butt detection in specular reflection workpiece welding. *Sensors*. 2016;16(9):1480. <http://dx.doi.org/10.3390/s16091480>. PMID:27649173.
- [56] Zeng JL, Chang BH, Du D, Wang L, Chang SH, Peng GD, et al. A weld position recognition method based on directional and structured light information fusion in multi-layer/multi-pass welding. *Sensors*. 2018;18(1):129. <http://dx.doi.org/10.3390/s18010129>. PMID:29304026.
- [57] Nilsen M, Sikstrom F, Christiansson AK, Ancona A. Robust vision-based joint tracking for laser welding of curved closed-square-butt joints. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;101(5-8):1967-1978. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-3044-0>.
- [58] Pachidis TP, Lygouras JN. Vision-based path generation method for a robot-based arc welding system. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2007;48(3):307-331. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-006-9076-y>.
- [59] Pachidis TP, Tarchanidis KN, Lygouras JN. Robot path generation method for a welding system based on pseudo stereo visual servo control. *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*. 2005;2005(14):2268-2280.
- [60] Shah HNM, Sulaiman M, Shukor AZ. Autonomous detection and identification of weld seam path shape position. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;92(9-12):3739-3747. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0380-4>.
- [61] Shah HNM, Sulaiman M, Shukor AZ, Kamis Z. Recognition and identification the position and location of tooth saw butt joint shape. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;98(9-12):2497-2504. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2401-3>.
- [62] Shah HNM, Sulaiman M, Shukor AZ, Kamis Z. An experiment of detection and localization in tooth saw shape for butt joint using KUKA welding robot. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;97(5-8):3153-3162. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2092-9>.
- [63] Ryu LH, Kim TW, Oh MJ, Ku NK, Lee KY. Workspace analysis to generate a collision-free torch path for a ship welding robot. *Journal of Marine Science and Technology*. 2009;14(3):345-358. <http://dx.doi.org/10.1007/s00773-009-0054-5>.
- [64] Chen HY, Liu K, Xing GS, Dong Y, Sun HX, Lin W. A robust visual servo control system for narrow seam double head welding robot. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2014;71(9-12):1849-1860. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5593-6>.

- [65] Fan J, Jing F, Yang L, Teng L, Tan M. A precise initial weld point guiding method of micro-gap weld based on structured light vision sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(1):322-331. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2018.2876144>.
- [66] Zhu ZY, Lin T, Piao YJ, Chen SB. Recognition of the initial position of weld based on the image pattern match technology for welding robot. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2005;26(7-8):784-788. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-003-2053-8>.
- [67] Chen XZ, Chen SB, Lin T, Lei YC. Practical method to locate the initial weld position using visual technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2006;30(7-8):663-668. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-005-0104-z>.
- [68] Nagao Y, Urabe H, Honda F, Kawabata JI, Kawamura T, Miyamoto N. Development of a teachingless robot system for welding a large-sized box-type construction. *Advanced Robotics*. 2001;15(3):287-291. <http://dx.doi.org/10.1163/156855301300235797>.
- [69] Legoff O, Hascoet JY. From CAD to computer aided welding. *International Journal of Production Research*. 1998;36(2):417-436. <http://dx.doi.org/10.1080/002075498193813>.
- [70] Liu Y, Liu Y, Tian XC. Trajectory and velocity planning of the robot for sphere-pipe intersection hole cutting with single-Y welding groove. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2019;56:244-253. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2018.10.005>.
- [71] Yang L, Li E, Fan J, Long T, Liang Z. Automatic extraction and identification of narrow butt joint based on ANFIS before GMAW. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;100(1-4):609-622. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-018-2732-0>.
- [72] Yang L, Li E, Long T, Fan J, Liang Z. A high-speed seam extraction method based on the novel structured-light sensor for arc welding robot: a review. *IEEE Sensors Journal*. 2018;18(21):8631-8641. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2018.2867581>.
- [73] Yang L, Li E, Long T, Fan J, Liang Z. A novel 3-D path extraction method for arc welding robot based on stereo structured light sensor. *IEEE Sensors Journal*. 2019;19(2):763-773. <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2018.2877976>.
- [74] Yang L, Li E, Long T, Fan J, Mao Y, Fang Z, et al. A welding quality detection method for arc welding robot based on 3D reconstruction with SFS algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2018;94(1-4):1209-1220. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-017-0991-9>.
- [75] Shi L, Tian XC, Zhang CH. Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;81(9-12):2099-2107. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-015-7331-8>.
- [76] Zhu WL, Ni FS, Hong CG. An algorithm for the welding torch weaving control of arc welding robot. *Elektronika ir Elektrotechnika*. 2015;21(2):3-9. <http://dx.doi.org/10.5755/j01.eee.21.2.5919>.
- [77] Liu J, Hu YM, Wu B, Zhou KB, Ge MF. An adaptive sliding mode control technology for weld. *Frontiers of Mechanical Engineering*. 2015;10(1):95-101. <http://dx.doi.org/10.1007/s11465-015-0332-3>.
- [78] Bui TH, Chung TL, Kim SB, Nguyen TT. Adaptive tracking control of two-wheeled welding mobile robot with smooth curved welding path. *KSME International Journal*. 2003;17(11):1682-1692. <http://dx.doi.org/10.1007/BF02983598>.
- [79] Fridenfalk M, Bolmsjo G. Design and validation of a universal 6D seam-tracking system in robotic welding using arc sensing. *Advanced Robotics*. 2004;18(1):1-21. <http://dx.doi.org/10.1163/156855304322753272>.
- [80] Graaf M, Aarts R, Jonker B, Meijer J. Real-time for robotic laser welding using trajectory-based control. *Control Engineering Practice*. 2010;18(8):944-953. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conengprac.2010.04.001>.
- [81] Bauchspies A, Alfaro SCA, Dobrzanski LA. Predictive sensor guided robotic manipulators in automated welding cells. *Journal of Materials Processing Technology*. 2001;109(1-2):13-19. [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00771-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00771-8).
- [82] Chang D, Son D, Lee J, Lee D, Kim TW, Lee KY, et al. A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2012;28(1):1-13. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2011.06.001>.
- [83] Xu YL, Lv N, Fang G, Du SF, Zhao WJ, Ye Z, et al. Welding in robotic gas metal arc welding. *Journal of Materials Processing Technology*. 2017;248:18-30. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2017.04.025>.
- [84] Kim DW, Choi JS, Nnaji BO. Robot arc welding operations planning with a rotating/tilting positioner. *International Journal of Production Research*. 1998;36(4):957-979. <http://dx.doi.org/10.1080/002075498193471>.
- [85] Kos M, Arko E, Kosler H, Jezersek M. Remote laser welding with in-line adaptive 3D. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;103(9-12):4577-4586. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-03875-z>.
- [86] Gao XD, You DY, Katayama S. Infrared image recognition for monitoring during fiber laser welding. *Mechatronics*. 2012;22(4):370-380. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mechatronics.2011.09.005>.
- [87] Xu PQ, Tang XH, Lu FG, Yao S. An active vision sensing method for welded seams location using "circle-depth relation" algorithm. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2007;32(9-10):918-926. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-006-0410-0>.
- [88] Gu WP, Xiong ZY, Wan W. Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;69(1-4):451-460. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5034-6>.

- [89] Murakami S, Takemoto F, Fujimura H, Ide E. Weld-line tracking control of arc-welding robot using fuzzy-logic controller. *Fuzzy Sets and Systems*. 1989;32(2):221-237. [http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114\(89\)90256-X](http://dx.doi.org/10.1016/0165-0114(89)90256-X).
- [90] Kiddee P, Fang ZJ, Tan M. An automated weld system for thick plate using cross mark structured light. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(9-12):3589-3603. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8729-7>.
- [91] Wang ZG, Zhang K, Chen YX, Luo ZF, Zheng J. A real-time weld line detection for derusting wall-climbing robot using dual cameras. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;27:76-86. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.04.002>.
- [92] Jin ZS, Li HC, Zhang CH, Wang QY, Gao HM. Online welding path detection in automatic tube-to-tube sheet welding using passive vision. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;90(9-12):3075-3084. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-9649-2>.
- [93] Du JH, Deng JX, Huang KJ, Huang JS, Lei X. Seam tracking system based on rotating arc sensor for robot arc welding. *Journal of Discrete Mathematical Sciences & Cryptography*. 2018;21(6):1407-1412. <http://dx.doi.org/10.1080/09720529.2018.1534354>.
- [94] Falkowski JL, Browne MA. Vision sensing for arc-welding robots - a new approach. *Journal of Physics. E, Scientific Instruments*. 1983;16(11):1081-1085. <http://dx.doi.org/10.1088/0022-3735/16/11/023>.
- [95] Ebert-Spiegel M, Goecke SF, Rethmeier M. Efficient gap filling in MAG welding using optical sensors. *Welding in the World*. 2014;58(5):637-647. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-014-0145-8>.
- [96] Ding YY, Huang W, Kovacevic R. An on-line shape-matching weld system. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2016;42:103-112. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2016.05.012>.
- [97] Cederberg P, Olsson M, Bolmsjo G. Virtual triangulation sensor development, behavior simulation and CAR integration applied to robotic arc-welding. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2002;35(4):365-379. <http://dx.doi.org/10.1023/A:1022306821640>.
- [98] Nele L, Sarno E, Keshari A. An image acquisition system for real-time. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2013;69(9-12):2099-2110. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-013-5167-7>.
- [99] Guo B, Shi YH, Yu GQ, Liang B, Wang K. Weld deviation detection based on wide dynamic range vision sensor in MAG welding process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2016;87(9-12):3397-3410. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8721-2>.
- [100] Lü XQ, Zhang K, Wu YX. The seam position detection and tracking for the mobile welding robot. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2017;88(5-8):2201-2210. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-016-8922-8>.
- [101] Xu YL, Yu HW, Zhong JY, Lin T, Chen SB. Real-time control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor. *Journal of Materials Processing Technology*. 2012;212(8):1654-1662. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.03.007>.
- [102] Rao SH, Kalaichelvi V, Karthikeyan R. Tracing a Weld Line using Artificial Neural Networks. *International Journal of Networked and Distributed Computing*. 2018;6(4):216-223.
- [103] Penttilä S, Kah P, Ratava J, Eskelinen H. Artificial Neural Network controlled GMAW system: penetration and quality assurance in a multi-pass butt weld application. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019;105(7-8):3369-3385. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-019-04424-4>.
- [104] Ismail MIS, Okamoto Y, Okada A. Neural Network modeling for prediction of weld bead geometry in laser microwelding. *Advances in Optical Technologies*. 2013;2013:415837. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/415837>.
- [105] Xu YL, Fang G, Lv N, Chen SB, Zou JJ. Computer vision technology for robotic GTAW and GMAW. *Robotics and Computer-integrated Manufacturing*. 2015;32:25-36. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rcim.2014.09.002>.
- [106] Shen HY, Wu J, Lin T, Chen SB. Arc welding robot system with and weld pool control based on passive vision. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2008;39(7-8):669-678. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-007-1257-8>.
- [107] Ebrahimpour R, Fesharakifard R, Rezaei SM. An adaptive approach to compensate error in robotic welding process by a moving fixture. *International Journal of Advanced Robotic Systems*. 2018;15(6):9. <http://dx.doi.org/10.1177/1729881418816209>.
- [108] Shen HY, Lin T, Chen SB, Li LP. Real-time technology of welding robot with visual sensing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2010;59(3-4):283-298. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-010-9403-1>.
- [109] Zhou L, Lin T, Chen SB. Autonomous acquisition of seam coordinates for arc welding robot based on visual servoing. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*. 2006;47(3):239-255. <http://dx.doi.org/10.1007/s10846-006-9078-9>.
- [110] Kindermann RM, Silva R, Dutra JC. Development and validation of algorithms employed for sensor systems in robotic orbital root pass welding of pipelines. *Soldagem & Inspeção*. 2015;20(4):391-402. <http://dx.doi.org/10.1590/0104-9224/SI2003.08>.
- [111] Ni D, Yew AWW, Ong SK, Nee AYC. Haptic and visual augmented reality interface for programming welding robots. *Advances in Manufacturing*. 2017;5(3):191-198. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-017-0184-7>.
- [112] Ong SK, Nee AYC, Yew AWW, Thanigaivel NK. AR-assisted robot welding programming. *Advances in Manufacturing*. 2020;8(1):40-48. <http://dx.doi.org/10.1007/s40436-019-00283-0>.
- [113] Reinhart G, Munzert U, Vogl W. A programming system for robot-based remote-laser-welding with conventional optics. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 2008;57(1):37-40. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.120>.

- [114] Tavares P, Costa CM, Rocha L, Malaca P, Costa P, Moreira AP, et al. Collaborative welding system using bim for robotic reprogramming and spatial augmented reality. *Automation in Construction*. 2019;106:102825. <http://dx.doi.org/10.1016/j.autcon.2019.04.020>.
- [115] Liu YK. Toward intelligent welding robots: virtualized welding-based learning of human welder behaviors. *Welding in the World*. 2016;60(4):719-729. <http://dx.doi.org/10.1007/s40194-016-0340-x>.
- [116] Liu YK, Zhang YM. Toward welding robot with human knowledge: a remotely-controlled approach. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*. 2015;12(2):769-774. <http://dx.doi.org/10.1109/TASE.2014.2359006>.
- [117] Liu YK, Zhang YM. Fusing machine algorithm with welder intelligence for adaptive welding robots. *Journal of Manufacturing Processes*. 2017;27:18-25. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.03.015>.
- [118] Wang QY, Cheng YC, Jiao WH, Johnson MT, Zhang YM. Virtual reality human-robot collaborative welding: a case study of weaving gas tungsten arc welding. *Journal of Manufacturing Processes*. 2019;48:210-217. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.10.016>.
- [119] Wang QY, Jiao WH, Yu R, Johnson MT, Zhang M. Modeling of human welders' operations in virtual reality human-robot interaction. *IEEE Robotics and Automation Letters*. 2019;4(3):2958-2964. <http://dx.doi.org/10.1109/LRA.2019.2921928>.
- [120] Sanchez-Diaz A, Zaldivar-Colado U, Pamanes-Garcia JA, Zaldivar-Colado X. Operation of a haptic interface for offline programming of welding robots by applying a spring-damper model. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 2019;32(11):1098-1116. <http://dx.doi.org/10.1080/0951192X.2019.1686177>.
- [121] Chen SJ, Huang N, Liu YK, Zhang YM. Machine-assisted travel speed control in manual welding torch operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015;76(5-8):1371-1381. <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-014-6310-9>.
- [122] Erden MS, Tomiyama T. Identifying welding skills for training and assistance with robot. *Science and Technology of Welding and Joining*. 2009;14(6):523-532. <http://dx.doi.org/10.1179/136217109X437150>.
- [123] Erden MS, Billard A. Robotic assistance by impedance compensation for hand movements while manual welding. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2016;46(11):2459-2472. <http://dx.doi.org/10.1109/TCYB.2015.2478656>. PMID:26452294.