

UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**

**ÁVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM EM UMA EMPRESA DO
SETOR AUTOMOTIVO POR MEIO DE MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À TOMADA
DE DECISÃO**

ISABELLA CRISTINA SOUZA FARIA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

ISABELLA CRISTINA SOUZA FARIA

AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM
EM UMA EMPRESA DO SETOR AUTOMOTIVO POR MEIO
DE MÉTODO MULTICRITÉRIO DE APOIO À TOMADA DE
DECISÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Remo Augusto Padovezi
Filleti

Coorientador: Prof. Dr. André Luís Helleno

SANTA BÁRBARA D'OESTE

2021

Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UNIMEP
Bibliotecário: Fábio Henrique dos Santos Corrêa – CRB: 8/10150

F224 a Faria, Isabella Cristina Souza
Avaliação e seleção de processo de soldagem em uma empresa do setor automotivo por meio de método multicritério de apoio à tomada de decisão / Isabella Cristina Souza Faria. – 2021.
90 fls.; il.; 30 cm.

Orientador (a): Prof. Dr. Remo Augusto Padovezi Filletti.

Coorientador (a): Dr. André Luís Helleno.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Metodista de Piracicaba, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Santa Bárbara D'Oeste, 2021.

1. Soldagem. 2. Automatização. 3. Solda robotizada. 4. Método AHP COPRAS. I. Filletti, Remo Augusto Padovezi. II. Helleno, André Luís. III. Título.

CDD – 671.52



**AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DE PROCESSO DE SOLDAGEM EM UMA
EMPRESA DO SETOR AUTOMOTIVO POR MEIO DE MÉTODO
MULTICRITÉRIO DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO**

ISABELLA CRISTINA SOUZA FARIA

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 09 de junho de 2021, pela
Banca Examinadora constituída pelos Professores:

Prof. Dr. Remo Augusto Padovezi Filleti
Presidente e Orientador

Prof. Dr. Milton Vieira Júnior – PPGEP/UNIMEP

Prof. Dr. Gustavo Franco Barbosa – UFSCAR

Taquaral
Rodovia do Açúcar, km 156 (SP-308)
13.423-170 - Piracicaba, SP
Tel.: (19) 3124-1515

unimep.edu.br
Santa Barbara d'Oeste
Rodovia Luís Ometto Km 24(SP 306)
Santa Bárbara d'Oeste, SP
Tel.: (19) 3124-1777

Centro Piracicaba
Rua Rangel Pestana, 762
13.400-901 - Piracicaba, SP
Tel.: (19) 3124-1515

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho, em especial:

À minha família: meus pais Wânia e Francisco, minha irmã Luísa, tios, padrinhos, primos e vovó Izabel pelo apoio e pelos valores e ensinamentos que foram fundamentais para essa conquista; ao meu namorado Gabriel e sua família por nunca me deixarem desistir, mesmo que o obstáculo parecesse intransponível.

Ao meu orientador Prof. Dr. Remo Filleti, que com muita paciência e sabedoria me orientou no mestrado e tornou possível o desenvolvimento desta pesquisa. À Prof^a. Dr^a. Maria Célia de Oliveira e ao Prof. Dr. André Luis Helleno que também contribuíram com ideias e foram essenciais nesta pesquisa.

A todos os professores e demais colaboradores do Programa PPGE – UNIMEP pela ajuda, pelos ensinamentos e experiência compartilhados durante esses dois anos de estudos.

Agradeço também a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio fornecido em forma de bolsa de fomento durante o desenvolvimento deste trabalho.

“O estudo em geral, a busca da verdade e da beleza são domínios em que nos é consentido ficar crianças por toda a vida.”

ALBERT EINSTEIN

FARIA, Isabella Cristina Souza. Avaliação e seleção de processo de soldagem em uma empresa do setor automotivo por meio de método multicritério de apoio à tomada de decisão. 2021. 78 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2021.

RESUMO

Para sobreviver a um mercado cada vez mais exigente e competitivo, as empresas precisam criar formas de melhorar seus processos de modo a torná-los mais eficientes. Isso vale tanto para os processos mais simples e antigos, como para os mais complexos e tecnológicos. Exemplo disso, são os estudos focados na melhoria do processo de soldagem. Essa atividade é atualmente utilizada na indústria com diferentes tecnologias, variando desde o processo inteiramente manual ao totalmente automatizado. Devido às diferentes características (ex.: investimento, manutenção, segurança, produtividade, qualidade e mão-de-obra) das tecnologias de solda disponíveis, é importante para a empresa dispor de métodos que auxiliem na escolha da melhor opção para cada aplicação. A partir desse problema, o presente trabalho visa propor um método de apoio à tomada de decisão para selecionar a tecnologia de soldagem (manual, automatizada) mais adequada de acordo com os critérios adotados. Para esse fim, foi feito um estudo de caso em uma empresa multinacional do ramo metalúrgico. O procedimento de apoio à tomada de decisão proposto foi criado a partir da ferramenta AHP COPRAS, e desenvolvido em conjunto com especialistas no processo de soldagem. Inicialmente, foi feita uma revisão bibliométrica dos processos de soldagem e do método AHP COPRAS para compreendê-los e entender o estado atual da literatura. Em seguida, foi feita uma pesquisa de campo para obter as informações da empresa estudada e avaliar quais são os critérios críticos no processo de soldagem. Por último, foi aplicado o método AHP COPRAS e verificou-se que, para o caso analisado, o processo automatizado é a melhor alternativa.

Palavras-chaves: Soldagem, automatização, solda robotizada, método AHP COPRAS.

FARIA, Isabella Cristina Souza. Evaluation and selection of welding process technology in an automotive company using multicriteria decision-making methods. 2020. 78 p. Thesis (Master Science in Production Engineering) - Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, 2021.

ABSTRACT

To survive in a very demanding and competitive market, companies need to create ways to improve their processes, in order to become more efficient. This rule is true for all processes, from the simplest and oldest ones to the most complex and technological ones. Welding processes are a good example of this, as the diversity of applications and technologies available in industry is extensive, ranging from manual welding to fully automated process. In this scenario with different possibilities, it is important for a company having decision making procedures to identify which welding technologies are best suitable for their needs. To address this issue, the present work aims to propose a decision-making method to select the most appropriate welding technology (manual, automated) according to the adopted criteria. To this end, a case study was performed in a multinational metalworking company. The proposed decision-making procedure was created using the AHP COPRAS tool and developed with specialists in welding process. Initially, a bibliometric review of the welding processes and the AHP COPRAS method was carried out to provide theoretical base for the study. After that, a field research was performed to obtain information about the company and to identify the key aspects from its welding processes. Finally, the AHP COPRAS method was applied, showing that the fully automated welding is the best alternative for the evaluated process.

Keywords: Welding, automatization, robot welding, AHP COPRAS method.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO.....	8
FIGURA 2 - (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SOLDAGEM POR FUSÃO. (B) MACROGRAFIA DE UMA JUNTA.....	11
FIGURA 3 - SOLDAGEM MIG/MAG.....	12
FIGURA 4 - VESTUÁRIO DE PROTEÇÃO TÍPICO A SER USADO POR UM SOLDADOR: (A) AVENTAL DE COURO; (B) MANGA DE COURO; (C) LUVA DE COURO; (D) PERNEIRAS DE COURO; (E) SAPATOS DE SEGURANÇA; (F) CAPACETE DE PROTEÇÃO; (G) ÓCULOS DE SEGURANÇA; (H) OMBREIRA DE COURO. ..	13
FIGURA 5 - ESTAÇÃO DE SOLDA ROBOTIZADA COM UM BRAÇO ROBÓTICO, UM POSICIONADOR, UMA CABINE DE CONTROLE E UMA MÁQUINA DE SOLDA.	14
FIGURA 6 - SISTEMA DE SOLDAGEM GMAW.....	27
FIGURA 7 - (A) VISÃO GERAL DO SISTEMA DE SOLDAGEM VIRTUAL (B) TOCHA DE SOLDAGEM VIRTUAL (COM PESO E TAMANHO SIMILARES À TOCHA DE SOLDAGEM REAL).....	29
FIGURA 8 - RESULTADO DAS BUSCAS NA LITERATURA.....	36
FIGURA 9 - TECNOLOGIAS UTILIZADAS NOS PROCESSOS DE SOLDAGEM.....	40
FIGURA 10 - PEÇA A SER SOLDADA POR UM DOS PROCESSOS SUGERIDOS NESTE TRABALHO.....	41
FIGURA 11 - MODELO ATUAL DE TOMADA DE DECISÃO	42
FIGURA 12 - MODELO AHP COPRAS PROPOSTO.....	42
FIGURA 13 - ACESSO E VISIBILIDADE DO SOLDADOR DURANTE A SOLDAGEM MANUAL	44
FIGURA 14 - POSIÇÃO DO SOLDADOR DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM MANUAL	54
FIGURA 15 - ESTRUTURA DA CÉLULA DE SOLDAGEM AUTOMATIZADA	56

LISTA DE GRÁFICOS

GRÁFICO 1 - INSTALAÇÃO ANUAL DE ROBÔS INDUSTRIAIS POR REGIÕES	5
GRÁFICO 2 - NÚMERO DE ARTIGOS ANALISADOS POR PAÍS DE ORIGEM	37
GRÁFICO 3 - NÚMERO DE ARTIGOS ANALISADOS POR ANO	37
GRÁFICO 4 - PORCENTAGEM DE ARTIGOS ANALISADOS POR TEMA	38

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ESTIMATIVA ANUAL DE VENDAS DE ROBÔS INDUSTRIAIS PARA MULTIPROPÓSITOS EM PAÍSES SELECIONADOS, EM NÚMERO DE UNIDADES	6
TABELA 2 - ESTRUTURAÇÃO TEMÁTICA DO TRABALHO	10
TABELA 3 - ESCALA DE NÍVEIS SAATY	32
TABELA 4 - TERMOS UTILIZADOS NA BUSCA	35
TABELA 5 - TABELA DE IMPOSTOS INCIDENTES NO PROCESSO/PRODUTO AVALIADO ..	47
TABELA 6 - ESCALA PARA COMPARAÇÃO QUANTITATIVA DE ALTERNATIVAS	48
TABELA 7 - ÍNDICE RANDÔMICO.	50
TABELA 8 - CONVERSÃO DE VARIÁVEL LINGUÍSTICA EM VALOR FUZZY	55
TABELA 9 - CLASSIFICAÇÃO PRIORIZAÇÃO: SEGURANÇA E ERGONOMIA	55
TABELA 10 - CLASSIFICAÇÃO PRIORIZAÇÃO: QUALIDADE	55
TABELA 11 - CLASSIFICAÇÃO PRIORIZAÇÃO: PRODUTIVIDADE	56
TABELA 12 - DADOS DE FATURAMENTO, CUSTOS E IMPOSTOS ANUAIS REFERENTES AOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO	57
TABELA 13 - INVESTIMENTO CUMULATIVO, RECEITA LÍQUIDA CUMULATIVA ANUAL E PERÍODO DE PAYBACK EM ANOS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO	58
TABELA 14 - DADOS DE FATURAMENTO, CUSTOS E IMPOSTOS ANUAIS REFERENTES AOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO	59
TABELA 15 - INVESTIMENTO CUMULATIVO, RECEITA LÍQUIDA CUMULATIVA MENSAL E PERÍODO DE PAYBACK EM MESES DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO	59
TABELA 16 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO	60
TABELA 17 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO NORMALIZADA	60
TABELA 18 - VETOR DE PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS W_{ATT}	60
TABELA 19 - VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DA MATRIZ DE COMPARAÇÃO	61

TABELA 20 - MATRIZ DE DECISÃO	61
TABELA 21 - MATRIZ DE DECISÃO NORMALIZADA	61
TABELA 22 - MATRIZ PONDERADA DE DECISÃO.....	62
TABELA 23 - DETERMINAÇÃO DE P_J E R_J	62
TABELA 24 - DETERMINAÇÃO DE Q_J	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3D	<i>Three-dimensional</i> (em português: Tridimensional)
3PL	<i>Third-part logistics</i> (em português: logística de terceirização)
AHP	<i>Analytical Hierarchy Process</i> (em português: Processo de hierarquização analítica)
CAD	<i>Computer-aided design</i> (em português: Concepção de produto auxiliada por computador)
CCD	<i>Charge Coupled Device</i> (em português: Dispositivo de carga acoplada)
CI	<i>Consistency Item</i> (em português: Índice de Consistência)
COPRAS	<i>Complex Proportional Assessment</i> (em português: Avaliação proporcional complexa)
CPS	<i>Cyber Physical System</i> (em português: Sistema físico cibernético)
CR	<i>Consistency Ratio</i> (em português: Taxa de Consistência)
EHS	<i>Environmental, Health & Safety</i> (em português: Meio-ambiente, saúde e segurança)
EPI	Equipamento de Proteção Individual
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (em português: Soldagem por arco elétrico com eletrodo metálico e gás de proteção)
GTAW	<i>Gas Tungsten Arc Welding</i> (em português: Soldagem por arco elétrico com eletrodo de tungstênio e gás de proteção)
MAG	<i>Metal Active Gas</i> (em português: Metálico com gás ativo)
MIG	<i>Metal Inert Gas</i> (em português: Metálico com gás inerte)
PAW	<i>Plasma Arc Welding</i> (em português: Soldagem por arco de plasma)
PID	<i>Proportional-Integral-Derivative</i> (em português: Proporcional, Integral e Derivativo)
RA	Realidade Aumentada
RI	<i>Random Index</i> (em português: Índice Randômico)
RV	Realidade Virtual
SAW	<i>Submerged Arc Welding</i> (em português: Soldagem por arco submerso)
SFMEA	<i>Safety Failure Modes and Effects Analysis</i> (em português: Análise de modos de falha e efeitos de segurança)
SMAW	<i>Shielded Metal Arc Welding</i> (em português: Soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	1
1.1.	OBJETIVO	4
1.1.1.	OBJETIVO GERAL	4
1.1.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.2.	IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO	5
1.3.	PANORAMA DA METODOLOGIA	7
1.4.	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	9
2.	REVISÃO DA LITERATURA	11
2.1.	PROCESSO DE SOLDAGEM	11
2.1.1.	CONTROLE DE PARÂMETROS DA SOLDA MANUAL	14
2.1.2.	MÉTODOS DE PROGRAMAÇÃO DE ROBÔS	16
2.1.3.	PLANEJAMENTO E OTIMIZAÇÃO DE SEQUÊNCIA DE SOLDAS	17
2.1.4.	CONTROLE DE PARÂMETROS DE SOLDA ROBOTIZADA A PARTIR DE SISTEMAS DE VISÃO	18
2.1.5.	DETECÇÃO DE JUNTAS E DESENVOLVIMENTO DE TRAJETÓRIAS DE SOLDA	21
2.1.6.	CONTROLE DE COSTURA DE SOLDA (<i>SEAM TRACKING</i>)	24
2.1.7.	REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA EM SISTEMAS ROBOTIZADOS	28
2.1.8.	MÉTODOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO APLICADOS AO PROCESSO DE SOLDAGEM	30
2.2.	MÉTODO MULTICRITÉRIO AHP COPRAS	31
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1.	ETAPA 1 - REVISÃO BIBLIOMÉTRICA	35
3.2.	SELEÇÃO DO ESTUDO DE CASO	41
3.1.	ETAPA 3 – SELEÇÃO DE CRITÉRIOS E COLETA DE DADOS	42
3.1.1.	SEGURANÇA E ERGONOMIA	43
3.1.2.	QUALIDADE	43
3.1.3.	PRODUTIVIDADE	45
3.1.4.	CUSTO	45
3.2.	ETAPA 4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP COPRAS	47
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	54
4.1.	QUANTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO	54
4.1.1.	SEGURANÇA E ERGONOMIA	54
4.1.2.	QUALIDADE	55
4.1.3.	PRODUTIVIDADE	56
4.1.4.	CUSTO	56
4.2.	APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP COPRAS	60
4.3.	DISCUSSÃO	63
5.	CONCLUSÕES	66
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO

Um grande desafio das companhias é se manterem competitivas e eficientes. Os custos dos processos produtivos devem ser reduzidos para se alcançar um maior rendimento e produtividade. São vários os fatores que podem comprometer na eficiência de um processo, tais como: quebras de máquinas, levando a paradas indesejadas; mão-de-obra sem qualificação, gerando tempos de ciclos mais longos e acidentes no trabalho; layouts obsoletos/ineficientes, ocasionando um longo tempo de movimentação ao longo do ciclo de produção. Todos esses problemas devem ser controlados para tornar a produção mais eficiente e garantir a satisfação do cliente, tanto em relação à qualidade do produto, quanto ao custo de produção (PINTO et al. 2019).

Nesse sentido, a busca pela melhoria contínua é relevante para qualquer tipo de processo, visando a redução de desperdícios, o aperfeiçoamento de seus produtos e processos, e a redução dos custos de produção. Para o processo de solda, isso não é diferente. Essa atividade consiste, basicamente, na união de materiais metálicos por meio da aplicação de calor a um substrato ligante, e geralmente realizada de maneira manual, por um operador. Apesar das indicações do uso desse processo desde a antiguidade, houve pouca variação na tecnologia utilizada na soldagem ao longo dos anos (MARQUES; MODENESI; BACARENSE, 2009).

Foi somente a partir do advento da automação industrial, no final do século XX, que se observou a possibilidade de substituir o trabalho manual do soldador pelo de robôs industriais, com o intuito de se melhorar a repetibilidade e acuracidade da operação. 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 Silva e Silva (2018), a Indústria 4.0 traz consigo a atualização das tecnologias vigentes e transformação dos processos em sistemas ciberfísicos - CPS (“*Cyber-Physical Systems*”, em inglês). 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.

Xue et al. (2019), por exemplo, desenvolveram um sistema de detecção de juntas no qual um *laser* é projetado na superfície da peça de trabalho e uma luz auxiliar

é utilizada para iluminar continuamente a peça. Por meio desse conjunto *laser-luz*, o sistema captura as imagens da superfície da peça, processa essas informações, calcula a posição 3D da junta e redefine os parâmetros de soldagem através de um algoritmo, adaptando a solda às variações da geometria peça.

Também existem sistemas automatizados de soldagem que permitem a colaboração entre homem e robô, utilizando a experiência e habilidade de um soldador em conjunto com a precisão de um robô. O trabalho de Wang et al. (2019a) apresenta um sistema de realidade virtual em que um operador observa a atividade de soldagem do robô e consegue alterar a velocidade do movimento e posicionamento da tocha de solda. É utilizado um algoritmo para, em tempo real, fazer as correções de corrente e tensão elétrica. Esse sistema permite que o processo se torne mais adaptativo e flexível às variações da peça, além de manter o operador em segurança, sem contato direto com os fumos provenientes do processo de soldagem.

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.

Nesse contexto, a seleção, por parte de uma empresa, do nível de automação/robotização mais adequada para suas atividades pode se tornar uma tarefa complexa. Ainda é muito comum que tal seleção seja feita de maneira não padronizada, variando de acordo com a peça em questão e a experiência dos funcionários (engenheiros e analistas de processo). Em várias situações, costuma-se fazer um *benchmark* com outras plantas da empresa para verificar qual processo elas usam, e é feito o levantamento do custo de cada uma das células (manual ou automatizada). Também são feitas estimativas do tempo de ciclo do processo para cada um dos casos.

A fim de padronizar a seleção de um processo e/ou alternativa, algumas empresas utilizam métodos multicritério de apoio à tomada de decisão. Esses métodos são capazes de agregar todas as características importantes de um processo para permitir a transparência e sistematização da tomada de uma decisão. Um exemplo de método multicritério é o AHP (*Analytical Hierarchy Process*) COPRAS (*Complex Proportional Assessment*), que usa um procedimento de priorização

escalonada e de avaliação de alternativas em termos da significância e do grau de utilidade (POLAT, BINGOL, VAR, 2017).

Polat, Bingol e Var (2017) apresentam a aplicação desse método para seleção de uma empresa fornecedora de projeto mecânico para um processo de construção. Normalmente, a definição da empresa a ser contratada levava em conta poucos critérios, o que ocasionava custos adicionais do projeto devido ao trabalho insatisfatório e pouco qualificado. Durante a aplicação do método AHP COPRAS, foram consideradas as competências técnicas, experiência e relacionamento interpessoal de cada uma das empresas. O resultado da aplicação do método foi um escalonamento das alternativas que permite verificar qual a opção mais satisfatória.

Ainda utilizando o método AHP COPRAS, o trabalho de Bóloga, Breaz e Racz (2018) faz a seleção de processos de manufatura de conformação considerando os seguintes critérios: acuracidade, produtividade e predição da plasticidade. Durante a aplicação do método AHP COPRAS, utilizou-se o sistema *fuzzy* com questionários para que especialistas pudessem avaliar qualitativamente os critérios e alternativas. Observou-se que quanto maior o número de especialistas respondentes, mais acurados eram os resultados.

O trabalho de Rajani e JawaharBabu (2016) faz uso do método AHP para a seleção do robô mais adequado para o processo de soldagem por pontos (“*spot welding*”, em inglês). Durante a aplicação do método, foram considerados os seguintes critérios: alcance do pulso do robô, repetibilidade, alcance de movimento, velocidade máxima, movimentos permitidos e momento de inércia permitido. O vetor prioridade indicou que o critério com mais peso para esse caso foi o de movimentos permitidos pelo robô. Ao final da aplicação do método, foi observado que as três opções de robôs avaliadas tiveram resultados bem parecidos, mas ainda assim foi possível fazer um ranqueamento entre eles.

Portanto, da mesma forma que foi aplicado um método multicritério na seleção de tecnologia de soldagem e considerando a aplicação do método AHP COPRAS na seleção de uma empresa fornecedora de projeto mecânico e de processos de prototipagem rápida, esse método poderia ser utilizado na seleção de tecnologia de soldagem. É a partir dessa hipótese que surge as seguintes perguntas de pesquisa:

- Como o método de apoio à tomada de decisão multicritério AHP COPRAS pode auxiliar na seleção e na avaliação de tecnologias do processo de soldagem?
- Quais são os critérios críticos na seleção de tecnologias do processo de soldagem?
- Quais são as vantagens e desvantagens de cada uma das tecnologias disponíveis para o processo de soldagem?

1.1. OBJETIVO

Para melhor compreensão dos objetivos desta dissertação, eles foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos.

1.1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo deste trabalho é propor um método de apoio à tomada de decisão para selecionar a tecnologia de soldagem (manual, automatizada) baseado no AHP COPRAS. Para esse fim, foi feito um estudo de caso em uma empresa uma empresa multinacional do ramo metalúrgico.

1.1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Identificar e avaliar os principais parâmetros e critérios envolvidos nos processos de soldagem existentes na empresa;
2. Desenvolver a estrutura do procedimento, bem como as ferramentas e formulários necessários para a sua aplicação;
3. Ajustar e validar o procedimento junto com um time de especialistas no processo de soldagem da empresa estudada;
4. Aplicar e avaliar o procedimento na classificação de tecnologias de soldagem a partir dos parâmetros e critérios adotados.

1.2. IMPORTÂNCIA E JUSTIFICATIVA DO TRABALHO

O número de instalação de robôs industriais no mundo cresce a cada ano (Gráfico 1). Entre 2013 e 2018, a demanda por robôs industriais cresceu, em média, 13% ao ano devido à onda de automação industrial e inovação técnica. O *Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots* (International Federation of Robotics, 2019) mostra que em 2018, a densidade média global de robôs industriais é de 99 para cada 10.000 funcionários, considerando apenas países que possuem relevante estoque operacional.

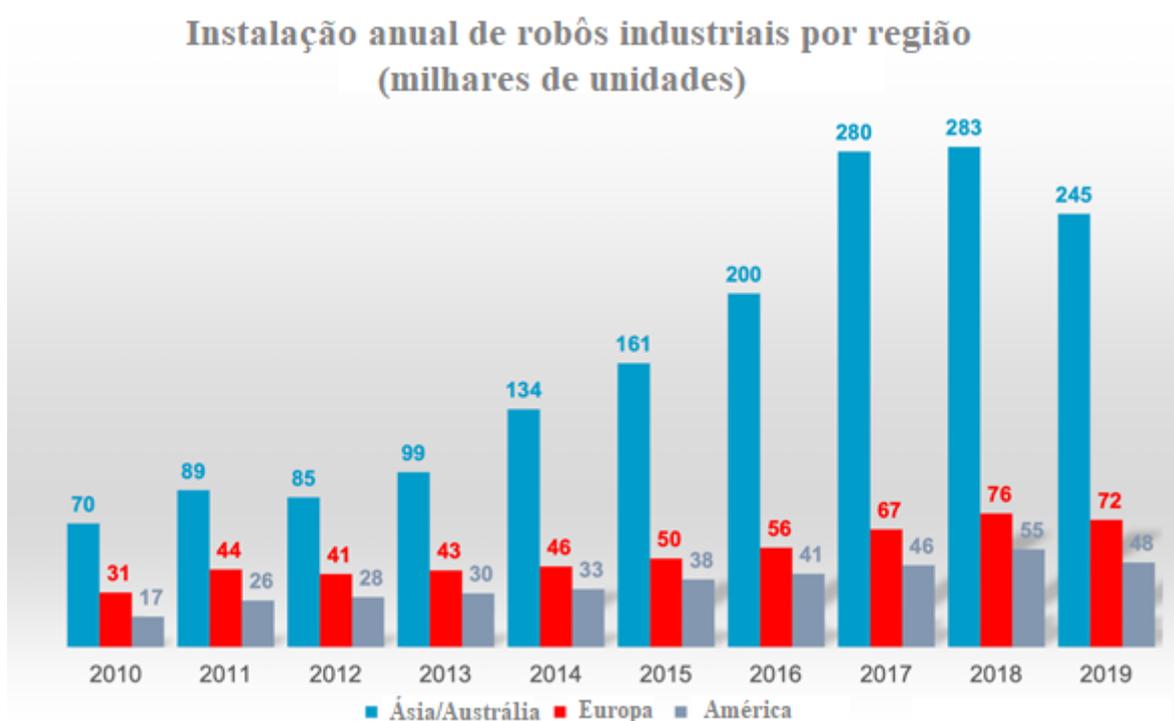


GRÁFICO 1 - INSTALAÇÃO ANUAL DE ROBÔS INDUSTRIAIS POR REGIÕES

FONTE: INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS, 2020

Essa expansão, contudo, não foi igual em todos os continentes e países. De acordo com a *International Federation of Robotics* (2017), em 2016, 74% do total de volume de vendas veio de apenas cinco países: China, República da Coreia, Japão, Estados Unidos e Alemanha. No Brasil, houve uma redução da demanda no mesmo ano.

A Tabela 1 mostra uma estimativa anual de remessas de robôs industriais para alguns países. De 2016 para 2017, houve uma redução de 20% na quantidade de robôs vendidos no Brasil. Diferentemente da Europa, China e Estados Unidos, que apresentam aumento significativo desde 2016. Esses dados confirmam a ideia de que, apesar da oportunidade de melhoria que os robôs industriais possuem, no Brasil ainda existe uma barreira para sua inserção na indústria. Isso possivelmente está relacionado com o alto custo da célula robotizada ou até mesmo com a necessidade de mão-de-obra qualificada que faça a programação e manutenção da célula.

TABELA 1 - ESTIMATIVA ANUAL DE VENDAS DE ROBÔS INDUSTRIAIS PARA MULTIPROPÓSITOS EM PAÍSES SELECIONADOS, EM NÚMERO DE UNIDADES

FONTE: INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS, 2018

* Previsão. ** Vendas estimadas ou reportadas sem definição de país de origem.

Países	2016	2017	2018*	2019*	2020*	2021*	2018/ 2017	2019 - 2021
América	41,295	46,118	44,300	48,900	55,600	63,500	-4%	13%
América do Norte	39,671	43,529	43,000	47,500	54,000	61,500	-1%	13%
- Estados Unidos	31,404	33,192	35,000	37,500	41,000	46,000	5%	10%
- Canadá	2,334	4,003	3,500	4,000	5,500	6,500	-13%	23%
- México	5,933	6,334	4,500	6,000	7,500	9,000	-29%	26%
Brasil	1,207	961	900	900	1,000	1,200	-6%	10%
Resto América do Sul	394	300	400	500	600	800	33%	26%
não especificado**	23	1,328						
Ásia/Austrália	190,542	261,826	298,150	351,250	405,400	462,600	14%	16%
China	87,000	137,920	165,000	210,000	250,000	290,000	20%	21%
Índia	2,627	3,412	4,500	5,000	6,000	7,500	32%	19%
Japão	38,586	45,566	54,000	56,000	59,000	64,000	19%	6%
República da Coreia	41,373	39,732	41,000	42,000	44,500	46,000	3%	4%
Taiwan, prov. China	7,569	10,904	13,000	14,000	17,000	20,000	19%	15%
Tailândia	2,646	3,386	4,000	5,000	6,000	7,000	18%	21%
Vietnã	1,618	8,252	2,500	3,000	4,500	7,000	-70%	41%
Outros Ásia/Austrália	9,123	12,654	14,150	16,250	18,400	21,100	12%	14%
Europa	56,078	66,259	70,950	75,250	82,500	93,600	7%	10%
Centro/Leste Europeu	7,758	10,538	13,500	16,500	19,750	24,300	28%	22%
França	4,232	4,897	5,200	5,600	6,000	6,500	6%	8%
Alemanha	20,074	21,404	22,500	23,500	25,000	26,000	5%	5%
Itália	6,465	7,713	9,000	9,000	9,500	10,500	17%	5%
Espanha	3,919	4,180	4,700	4,600	5,100	6,500	12%	11%
Reino Unido	1,787	2,334	2,400	2,200	2,300	2,600	3%	3%
Resto da Europa	11,706	12,133	12,850	13,300	14,350	16,600	6%	9%
não especificado**	137	3,060	800	550	500	600	-74%	-9%
África	879	451	500	600	700	800	11%	17%
não especificado **	5,553	6,681	7,100	8,000	8,800	9,500	6%	10%
TOTAL	294,347	381,335	421,000	484,000	553,000	630,000	10%	14%

O processo de soldagem não foge a esse cenário: apesar de todos os benefícios que a utilização de uma célula de soldagem robotizada pode trazer, como melhorias na segurança operacional, ergonomia, padronização, produtividade e qualidade da solda, a indústria metalúrgica brasileira ainda se mantém presa ao processo de soldagem manual.

A escolha de qual tecnologia de soldagem é a mais apropriada para um processo vai além das questões de eficiência e custo da atividade. Deve-se levar em conta também questões de qualidade, visando melhor atender e satisfazer as necessidades dos clientes; e segurança, já que a soldagem é um processo que envolve altas temperaturas, utilização de equipamentos de proteção pesados, problemas de ergonomia dos colaboradores e contato com fumos nocivos provenientes da atividade. É para esse tipo de situação, na qual não há uma solução óbvia que atenda satisfatoriamente todas as variáveis envolvidas na escolha de um processo, que se lança mão de métodos de apoio à tomada decisão como o AHP COPRAS.

Logo, além de contribuir para o conhecimento científico por meio da aplicação do método de apoio à tomada de decisão multicritério AHP COPRAS na seleção de tecnologias do processo de soldagem, o presente trabalho se justifica por estar inserido no aumento da eficiência desse tipo de processo em relação a tempo, custos, segurança ocupacional e qualidade do produto, contribuindo para a competitividade da empresa no mercado.

1.3. PANORAMA DA METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta as etapas desenvolvidas no presente estudo:

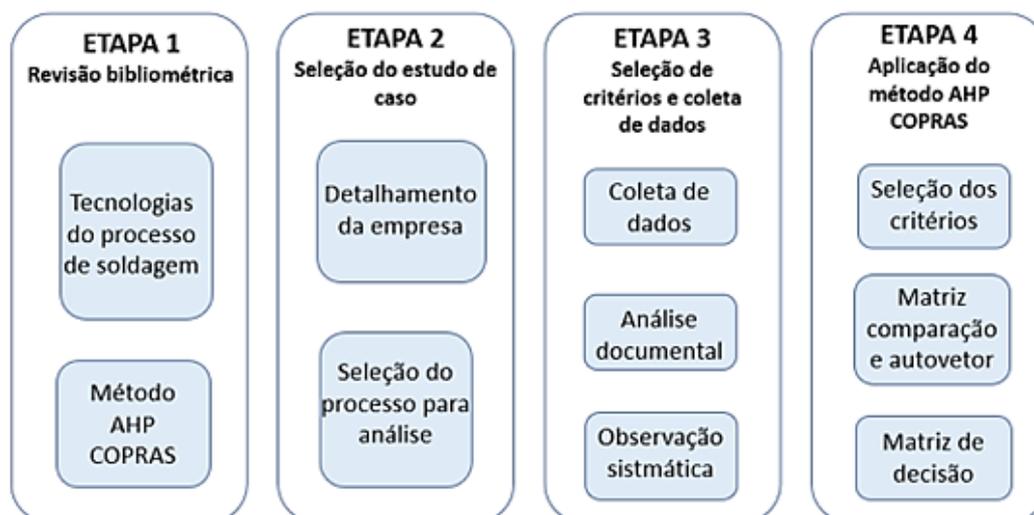


FIGURA 1 - ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DO PROJETO

Na Etapa 1, foram realizadas pesquisas em artigos, dissertações, teses e livros referentes aos temas de processos de soldagem (manual, automatizado e integrado com sistema *cyber* físico) e método de apoio à tomada de decisão AHP COPRAS. Desta forma, foi possível conhecer os conceitos e aplicações sobre os tópicos, além de entender qual o estado atual da literatura e quais são as tecnologias de soldagem mais utilizadas atualmente.

Na Etapa 2, foi definido o estudo de caso realizado em uma empresa multinacional de grande porte do setor metalúrgico localizada na região de Piracicaba/SP. Entre os vários produtos que ela produz, é feita a fabricação (i.e., processos de tratamento térmico, soldagem, rebarbação e usinagem) de chassis de tratores, pintura de componentes, e a montagem do trator e de seus componentes.

Na Etapa 3, foi feita coleta de dados *in loco* na empresa, a partir de visitas na planta fabril. Durante as visitas, realizou-se o levantamento dos processos internos, a coleta de dados sobre os processos de solda manual e automatizado a partir da observação sistemática (observação da estrutura e equipamentos das células de soldagem, dos equipamentos de proteção individual utilizados em cada um dos processos, da posição de trabalho do soldador e ergonomia, da qualidade das soldas e do tempo de ciclo do processo) e análise documental de informações de cada um dos processos.

Na Etapa 4, juntamente com quatro especialistas do processo de soldagem da empresa analisada (três engenheiros de solda e um analista de processos), foram definidos os quatro critérios mais importantes nessa atividade, usados então como

referência para a coleta de dados e, posteriormente, avaliação. Os critérios definidos para análise foram: Segurança e ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo. Em seguida, foi aplicado o método AHP COPRAS na seleção da tecnologia do processo de soldagem.

1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos detalhados a seguir.

O Capítulo 1 inicia-se com a contextualização do problema, justificava do projeto e definição dos objetivos do trabalho. No Capítulo 2, o referencial teórico é desenvolvido por meio do detalhamento dos temas necessários para a realização da pesquisa, tais como:

- Processo de soldagem: estado atual da literatura sobre as tecnologias utilizadas na automatização do processo;
- Método AHP COPRAS: apresentação do método e exemplos de aplicações.

O Capítulo 3 destina-se ao detalhamento do método de pesquisa utilizado nesta dissertação, procedimentos para a para obtenção e análise dos dados do fenômeno em estudo (estudo de caso), especificando-se “como” cada etapa é executada.

No Capítulo 4, são apresentados os resultados da pesquisa de campo, do levantamento dos critérios principais do processo de soldagem e da aplicação do método AHP COPRAS.

Por fim, no Capítulo 5, é apresentada a melhor alternativa de tecnologia em processo de soldagem para o estudo de caso em questão. Também são indicadas quais as oportunidades no método utilizado e possíveis estudos futuros.

A Tabela 2 apresenta de maneira resumida esta estruturação:

TABELA 2 - ESTRUTURAÇÃO TEMÁTICA DO TRABALHO

Contextualização	Capítulo 1 Introdução, objetivos, justificativa e relevância do tema
Fundamentação Teórica	Capítulo 2 Soldagem, método multicritério de apoio à tomada de decisão AHP COPRAS
Métodos, pesquisa em campo e discussão	Capítulo 3 Aplicação da metodologia do estudo de caso escolhido, definição do sistema de coleta de informações, do procedimento experimental e dos parâmetros de avaliação das tecnologias do processo de soldagem
	Capítulo 4 Resultados do estudo de caso, ranqueamento das alternativas
Síntese	Capítulo 5 Conclusões e sugestões para trabalhos futuros
Elementos pós-textuais	Bibliografia

2. REVISÃO DA LITERATURA

Essa seção é dividida em duas partes. Na primeira, é feita uma descrição do processo de soldagem e uma revisão da literatura para mapear as principais mudanças nos processos de soldagem utilizados na indústria.

Na segunda parte desta seção, é feita uma descrição do método multicritério de apoio à tomada de decisão AHP COPRAS e uma revisão desse método.

2.1. PROCESSO DE SOLDAGEM

O processo de soldagem é um método de junção de materiais metálicos baseado em forças microscópicas, na qual em que a união é conseguida pela aproximação dos átomos ou moléculas das peças a serem unidas, ou destes e de um material intermediário adicionado à junta. O método se baseia na aplicação localizada de calor na região da junta a ser soldada até a sua fusão (e do metal de preenchimento, quando utilizado). Como resultado desta fusão, as superfícies entre as peças são eliminadas e, com a solidificação do metal fundido, a solda é formada (Figura 2). A soldagem pode ser utilizada para diferentes tipos de materiais e aplicada em diferentes campos da indústria, podendo atender a diferentes requisitos de qualidade e sendo economicamente viável na maioria dos processos (MARQUES; MODENESI; BACARENSE, 2009).

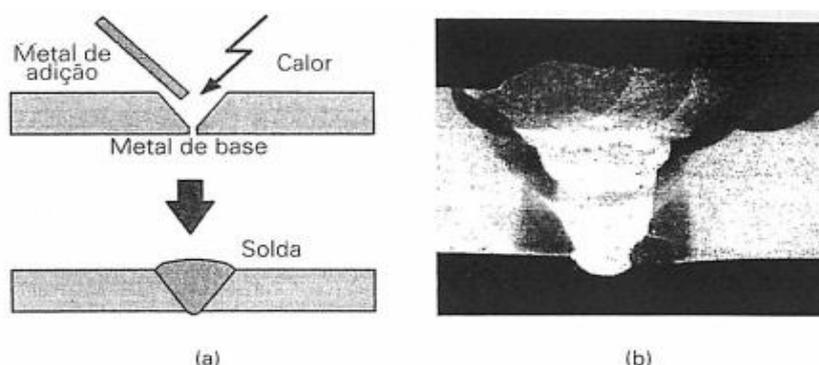


FIGURA 2 - (A) REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA SOLDAGEM POR FUSÃO. (B) MACROGRAFIA DE UMA JUNTA.

Fonte: Marques; Modenesi; Bacarense, 2009

Os processos de soldagem podem ser classificados baseando-se no método utilizado: (a) processos de soldagem por pressão e (b) processo de soldagem por fusão. O primeiro grupo consiste na soldagem por forjamento ou fricção, normalmente utilizado para soldagem de chapas finas. O segundo grupo consiste no aquecimento do material base ou de um material de preenchimento até sua fusão, e.g., soldagem por eletro-escória, soldagem a arco submerso, soldagem com eletrodo revestido e soldagem a plasma. Como o material fundido tende a reagir com os gases atmosféricos, normalmente no processo de soldagem por fusão são utilizados gases de proteção para reduzir essas interações da solda com o ambiente (MARQUES; MODENESI; BACARENSE, 2009).

Dentre os processos de soldagem por fusão, a solda MIG (*Metal Inert Gas* – “Metálico com gás inerte”, em português) / MAG (*Metal Active Gas* – “Metálico com gás ativo”, em português) é a mais utilizada na indústria e se dá pela união de peças metálicas através do aquecimento gerado por um arco elétrico formado entre um eletrodo e a peça de trabalho (Figura 3). Para que o arco seja protegido do ambiente externo, evitando não-conformidades na solda, são utilizados gases inertes (MIG) ou gases ativos (MAG). Suas principais vantagens em relação aos outros processos são suas altas taxas de deposição, maior penetração da solda e alta versatilidade. A Figura 3 é uma representação esquemática desses processos de solda com gás de proteção (MARQUES; MODENESI; BACARENSE, 2009).

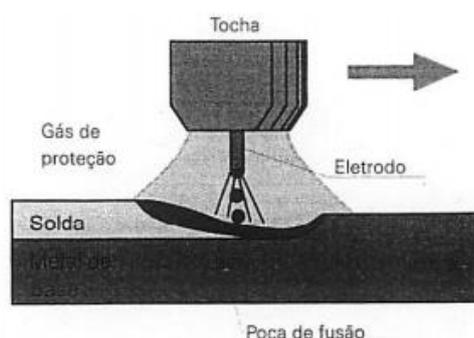


FIGURA 3 - SOLDAGEM MIG/MAG.

FONTE: MARQUES; MODENESI; BACARENSE, 2009

Na maioria dos casos, a soldagem é feita manualmente, ou seja, toda a operação é realizada e controlada manualmente pelo soldador. Visto que o processo envolve temperaturas elevadas, exposição à uma alta quantidade de radiação e contato com gases tóxicos liberados durante a operação (MARQUES; MODENESI;

BACARENSE, 2009), a soldagem manual deve ser realizada com o uso de um conjunto específico de Equipamentos de Proteção Individuais – EPI's por parte do soldador. A Figura 4 mostra as principais peças de vestuário utilizadas pelo soldador durante a realização do processo de solda.



FIGURA 4 - VESTUÁRIO DE PROTEÇÃO TÍPICO A SER USADO POR UM SOLDADOR: (A) AVENTAL DE COURO; (B) MANGA DE COURO; (C) LUVA DE COURO; (D) PERNEIRAS DE COURO; (E) SAPATOS DE SEGURANÇA; (F) CAPACETE DE PROTEÇÃO; (G) ÓCULOS DE SEGURANÇA; (H) OMBREIRA DE COURO.

FORTE: MARQUES; MODENESI; BACARENSE, 2009

As roupas de raspa de couro são mais adequadas para a atividade de solda devido à durabilidade e resistência ao fogo. As perneiras devem se sobrepôr às botas para evitar que partículas quentes caiam dentro das botas. O capacete de proteção protege o soldador da radiação, bem como dos fumos/gases gerados no processo. Os óculos são utilizados por baixo do capacete para proteção dos olhos (MARQUES; MODENESI; BACARENSE, 2009).

Apesar da predominância do uso da solda manual na indústria, há um crescimento na implementação de processos automatizados de soldagem. 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, redução da interferência humana e de exposição do soldador a fumos tóxicos e riscos ergonômicos, 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 (BOLMSJO, 1988).

A Figura 5 mostra uma estação de solda robotizada, a qual consiste em um braço robótico alimentado com arame revestido; um posicionador, onde a peça a ser soldada deve ser presa; uma máquina de solda e a cabine de controle do sistema,

que faz a integração entre os sensores, o programa e a máquina de solda. É também na cabine 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 de solda (BOLMSJO, 1988).

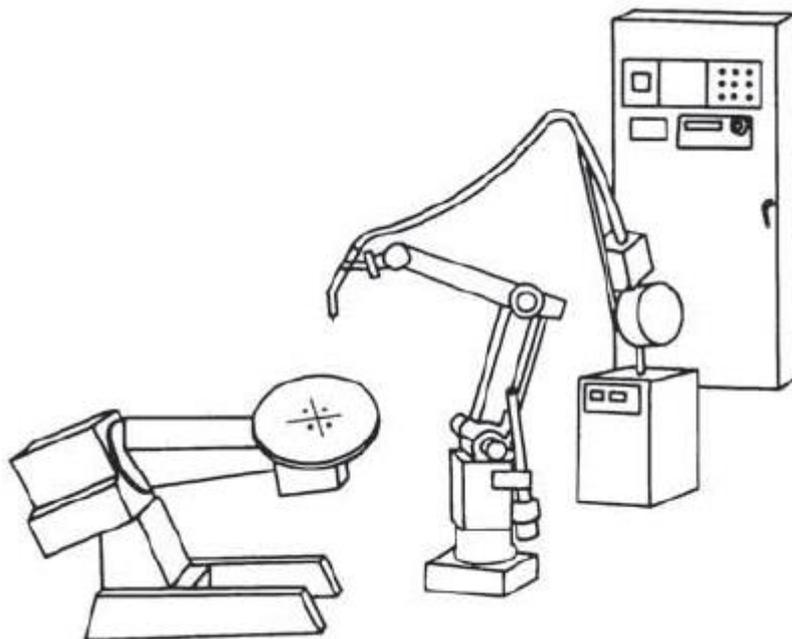


FIGURA 5 - ESTAÇÃO DE SOLDA ROBOTIZADA COM UM BRAÇO ROBÓTICO, UM POSICIONADOR, UMA CABINE DE CONTROLE E UMA MÁQUINA DE SOLDA

FONTE: BOLMSJO, 1988

Entre a operação complementar manual e a operação totalmente automatizada, há uma grande variação de tecnologias disponíveis, com diferentes graus de automação/participação do operador. Para além da automação, já existem tecnologias que visam a digitalização do processo de soldagem, com o intuito de transformá-lo em um sistema físico cibernético, tornar o processo mais seguro ao soldador e adaptativo às variações da solda (SILVA; SILVA 2018).

2.1.1. CONTROLE DE PARÂMETROS DA SOLDA MANUAL

A operação de soldagem 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 pela penetração

de solda, que normalmente é um requisito do projeto do produto (ERDEN; MARIC, 2011).

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 sua velocidade de soldagem e ângulo de trabalho. Em alguns casos, devido às questões de acessibilidade e geometria da peça, o método manual não é possível de ser substituído pelo automatizado (CHEN et al., 2015).

O tempo de resposta do soldador para uma correção no movimento está diretamente relacionado com seu nível de habilidade e experiência na atividade. Nesse aspecto, Erden e Tomiyama (2009) investigam as diferenças entre soldadores com e sem experiência, analisando os dados de posicionamento de um sistema de captura de movimento tridimensional. Os resultados mostraram que o 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.

Erden e Billard (2016) chegaram na mesma conclusão a partir de um sistema de captura de movimento tridimensional para gravar o movimento da tocha durante a soldagem. Os autores usaram câmeras que emitiam uma luz infravermelha e detectam a reflexão dos marcadores que estão localizados no soldador e na tocha. Um programa computacional computa as posições nas coordenadas. Foram feitas comparações de resultados entre soldadores com alta e baixa habilidade, e observou-se que quanto menos habilidoso e experiente era o soldador, maior era a variação de posicionamento da tocha e da velocidade de soldagem.

Como a habilidade é uma característica que demanda investimento e tempo, tanto por parte das empresas quanto por parte dos operadores, Chen et al. (2015), Erden e Billard (2016) e Erden e Maric (2011) 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.

O trabalho de Thongchuea, Warinsiriruk e Wang (2020) desenvolveu um experimento para determinar os valores de parâmetros adequados para um processo

de soldagem a laser para garantir a boa qualidade da solda. Os parâmetros analisados foram: tensão elétrica, comprimento do pulso e frequência de irradiação do *laser*. Foram feitos testes utilizando múltiplos valores desses parâmetros até que fosse possível obter a combinação que garantisse a melhor qualidade da solda.

2.1.2. 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) (BOLMSJO, 1988).

O desenvolvimento da programação de robôs de solda remete ao final da década de 80. Bolmsjo (1989) 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, Sullivan e Rajaram (1992) 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.

A programação *offline*, por sua vez, reduz a necessidade por mão-de-obra especializada e 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 (SULIVAN; RAJARAM, 1992).

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 remarcação de pontos quando alguma orientação da tocha ou peças a ser soldada são alteradas, tornando mais fácil a programação de peças com geometrias complexas (SULIVAN; RAJARAM, 1992).

2.1.3. 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.

Atualmente, é comum que o planejamento da sequência seja 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 Gao et al. (2020) e de Wang et al. (2016) propõem algoritmos genéticos de planejamento de movimento do robô, os quais evitam a redundância de tarefas.

Os trabalhos de Chen (2020), Liu e Tian (2019) e Tsai, Lee e Ann (2011), 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.

Outro aspecto importante no planejamento das sequencias 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 Wang et al. (2017a) e de Wang et al. (2017b) desenvolveram trajetórias de solda evitando colisões e deformações. Inicialmente foi estabelecido o modelo da célula robotizada, em seguida as soldas foram simplificadas como pequenos triângulos e todo o espaço foi dividido em pequenos cubos. Em seguida, foi aplicado o algoritmo de otimização de colônia de formigas para eliminar as colisões e o algoritmo de otimização de enxame de partículas para fazer a otimização da trajetória global do robô.

O trabalho de Chai et al. (2020) apresenta um sistema redundante de atuação de robôs paralelos para eliminar a singularidade. Foram feitas análises e otimização dimensional para garantir a eliminação de colisões entre os robôs e entre os robôs e a peça de trabalho. Já no trabalho de Tannous, Bologna e Stefanini (2020) informações de torque e sinais de força são obtidos de um sensor durante o processo de soldagem robotizada quando ocorre alguma colisão entre o robô e a peça de trabalho, isso ajuda na identificação das interferências e correção do programa.

Petiot, Chedmail e Hascoet (1998) e Wang; Min e Gu (2019) trabalharam na redução do tempo de ciclo da solda automatizada, com o intuito de melhorar sua eficiência produtiva. Como resultado, desenvolveram métodos de otimização de sequência de soldas que possibilitaram a realização do processo em um tempo menor.

2.1.4. 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, Chen et al. (2009),

Chen et al. (2003) e Chen e Yu (2018) 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 trabalho realizado por de Aviles-Vinas, Rios-Cabrera e Lopez-Juarez (2016), 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 Baskoro et al. (2009) e de Dong et al. (2018) 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 Shen et al. (2009) 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 desenho, os trabalhos de Jiang; Zhang; Wang (2017) e de Liu, Zhang e Zhang (2015) 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, Kim, Choi e Nnaji (1998) apresentam um modelo para estabilização da solda robotizada por meio de um algoritmo que define a configuração do movimento do robô fazendo uso também da possibilidade de rotação e inclinação do posicionador da peça. Dessa forma, é possível realizar a solda em uma posição mais desejável para a tocha de solda. Os

resultados da sua aplicação indicaram uma melhora na qualidade da solda e na produtividade da célula a partir do aumento do tempo de arco aberto sem deterioração.

Kim et al. (2006) 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 Ma et al. (2010) apresenta um método de seguimento de trajetória em tempo real baseado em um sensor visual que mede a diferença de posição entre a tocha e o centro da costura de solda. As informações são processadas e, caso necessário, é feita a correção na tensão elétrica.

Em se tratando das possíveis variações na geometria das peças e da necessidade de autoprogramação em tempo real dos parâmetros de solda, os trabalhos de Wu, Liu e Wu (1994) e Xu et al. (2006) 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.

Wu e Tung (2008) 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 caso. O trabalho de Lee et al. (2020) utilizou um sensor visual a *laser* e um algoritmo de processamento de imagens para extrair as linhas do *laser*. As informações foram utilizadas para estimar a qualidade das soldas.

Ribeiro, Ogunbiyi e Norrish (1997) e Chu e Tung (2005), por sua vez, desenvolveram modelos matemáticos para calcular e definir os parâmetros de solda com base nas informações coletadas na junta. Ambos os trabalhos focam no controle/ajuste da taxa de alimentação de arame de solda que regula a corrente elétrica do arco. O trabalho de Miller et al. (2002) 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 de Liu e Zhang (2017) 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.

2.1.5. 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 (QIN; LIU; GROSVENOR, 2016).

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 System*”, 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 (VAIDYA; AMBAD; BHOSLE, 2018).

No contexto da Indústria 4.0 e da introdução de CPS, 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.

A fim de se reduzir essas variações na geometria, de modo a garantir qualidade dimensional à solda e à peça final, Chen et al. (2013) propuseram um método de determinação da trajetória de soldas em J por interpolação. O processo de interpolação é realizado por meio de uma função matemática, alimentada por uma série histórica de dados, a qual é capaz de construir novos pontos ou dados com base em pontos conhecidos. Xu et al. (2008), Chen et al. (2005) Dinham e Fang (2013) e

Dinham e Fang (2014), por sua vez, fazem uso de algoritmos para gerar trajetórias com base em imagens 3D da junta de solda.

Os trabalhos de Lee e Park (2015) e Lee et al. (2000) 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 Liu, Wang e Ji (2018) permite obter o ponto inicial da solda filete formada por duas chapas. Os trabalhos de Ye et al. (2018) e de Ye et al. (2013) apresentam métodos de segmentar automaticamente o cordão de solda, utilizando polinômios para representar as características da junta.

Os trabalhos de Xue et al. (2019) e de Kim, Rhee e Lee (1999) 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 Shao, Huang e Zhang (2018) 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. O trabalho de Li et al. (2020) desenvolve um método de reconhecimento da trajetória de solda baseado no escaneamento a *laser*. Inicialmente o *laser* faz o escaneamento do sistema para medição dos ângulos e detectar as bordas das estruturas. Em seguida, a trajetória de solda é definida através de um algoritmo que extrai a forma das juntas construindo uma trajetória triangular para a solda.

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 Fan et al. (2017) 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 Zeng et al. (2016), Zeng et al. (2018) por sua vez, propõem o reconhecimento da junta de solda por meio da tecnologia de múltiplas camadas/múltiplos passes de solda. Um sistema de visão auxiliado por fontes complementares de luz captura imagens da junta, obtendo a posição da junta e da tocha. Tais informações são usadas como entrada para a equação de posição da superfície da peça em relação à tocha, possibilitando verificar a diferença entre a posição da tocha e a linha central da junta de solda. Já o trabalho de Zeng et al. (2020) apresenta um método de identificação de juntas de solda através de sensores visuais. É utilizada uma máquina de suporte

vetorial para fazer a extração dos vetores da junta, o que aumenta a acuracidade das informações obtidas pelos sensores.

O trabalho de Ciszak, Juszkievicz e Suszynski (2020) também apresentam um sistema de visão para identificação de formas para auxiliar na programação dos robôs. São utilizadas câmeras digitais para captar imagens da peça de trabalho, em seguida, um software faz a comunicação com essa câmera, processando as imagens e um algoritmo faz a detecção dos contornos/geometria da peça.

Lei et al. (2020) desenvolvem um sistema mais amplo, o qual, além de identificar essa diferença, a utiliza como parâmetro retroalimentador para a correção do desvio de trajetória em relação à linha central do movimento. Os trabalhos de Nilsen et al. (2019), de Pachidis e Lygouras (2005) e de Pachidis e Lygouras (2007) utilizam sistemas com câmeras para captura de imagens da junta e definição de pontos da trajetória. Shah, Sulaiman e Shukor (2017), Shah, Sulaiman e Shukor (2018a) e Shah, Sulaiman e Shukor (2018b) 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, os trabalhos de Ryu et al. (2009), de Fan et al. (2019), de Chen et al. (2006), de Chen et al. (2014) e de Zhu et al. (2005) apresentam métodos de determinação do ponto inicial através da combinação das restrições para cada solda com 2D e 3D. A partir da definição do ponto inicial, os demais pontos do cordão são obtidos meio de interpolação.

O trabalho de Liu, Bu e Tan (2010) 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.

Pensando na redução de tempo obtido por meio da programação *offline*, os trabalhos de Legoff e Hascoet (1998) e de Nagao et al. (2001) 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 Liu, Liu e Tian (2019) propõe o estabelecimento do modelo geométrico da solda, baseado no princípio da compensação por ferramentas 3D.

Os trabalhos de Yang et al. (2018a), de Yang et al. (2018b), de Yang et al. (2019a) e de Yang et al. (2019b) apresentam métodos para extração automática e identificação de juntas. Algoritmos são utilizados para reconstruir as formas 3D da costura de solda e obter informações de curvatura. Por último, o trabalho de Shi, Tian e Zhang (2015) 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.

2.1.6. 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 (LIU et al, 2015).

Os trabalhos de Zhu, Ni e Hong (2015), de Liu et al. (2015), de Bui et al. (2003), e de Fridenfalk e Bolmsjo (2004) lançam mão dessa ferramenta para propor controles adaptativos da trajetória de solda que reduzem a necessidade de programação acurada do robô.

Em alguns casos, são utilizados sistemas de visão para capturar imagens da junta e, assim, redefinir a trajetória em tempo real. Os trabalhos de Graaf et al. (2010), Bauchspiess, de Alfaro e Dobrzanski (2001) e de Chang et al. (2012) utilizam câmeras que captam e filtram as imagens, possibilitando que algoritmos servo-controladores eliminem virtualmente os erros de trajetória.

Xu et al. (2017) desenvolveram um sistema de soldagem de seguimento de trajetória baseado em *software* e sensoriamento por de visão. Nesse trabalho, o *software* 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 Kim e Bae (2005) apresenta um sistema de sensoriamento visual para soldas tampão. A captura de imagens é feita via câmeras com dispositivo de carga acoplada – CCD (“*Charge Coupled Device*”, em inglês) 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.

Kos et al. (2019) 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. Gao, You e Katayama (2012) 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 Xu et al. (2007) também usa um sistema de *laser* circular para obter as informações 3D da solda.

Já os trabalhos de Gu, Xiong e Wan (2013) e Murakami et al. (1989) 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 Kidde, Fang e Tan (2016) 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 de Wang et al. (2017) utiliza, ao invés de câmera de luz cruzada, um sistema com luzes de LED auxiliares para facilitar o processamento das imagens.

O trabalho de Jin et al. (2017) 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. Du et al. (2018)

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 Falkowski e Browne (1983) usa um sensor de luminosidade que utiliza a luz produzida pelo arco de solda para definir a trajetória de costura.

Elbert-Spiegel, Goecke e Rethmeier (2014) utilizam um sensor óptico na frente da tocha para medir a sua posição atual, em tempo real, e passar essas as informações para o controlador, o qual ajusta os parâmetros de processo utilizando um modelo dinâmico. Os trabalhos de Ding, Huang e Kovacevic (2016) e de Cederberg, Olsson e Bolmsjo (2002) 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 Nele, Sarno e Keshari (2013) 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 Guo et al. (2016) usa um algoritmo para identificar as arestas da solda para, em seguida, conectá-las e, por meio da transformação de Hough, obter o centro do arame.

Além do algoritmo de processamento de imagens, é essencial ter um controlador que garanta a correção do movimento durante o processo. Nesse sentido, há soluções de controladores dos mais variados tipos, baseados em modelos cinemáticos e dinâmicos do robô de solda (LU; ZHANG; WU, 2017), controlados por PID (XU et al., 2012) e/ou que aplicam rede neural fazer com que o robô siga a linha de solda (RAO; KALAIHELVI; KARTHIKEYAN, 2018).

A Figura 6 apresenta o diagrama esquemático do sistema GMAW (*Gas Metal Arc Welding* – “Soldagem por arco elétrico com eletrodo metálico e gás de proteção”, em português) utilizado no trabalho de Xu et al. (2015), formado por 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. Nesse sistema, há a captura de imagens do posicionador do robô, as quais são enviadas para o computador que, por meio de um algoritmo, faz a leitura das arestas e das características 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.

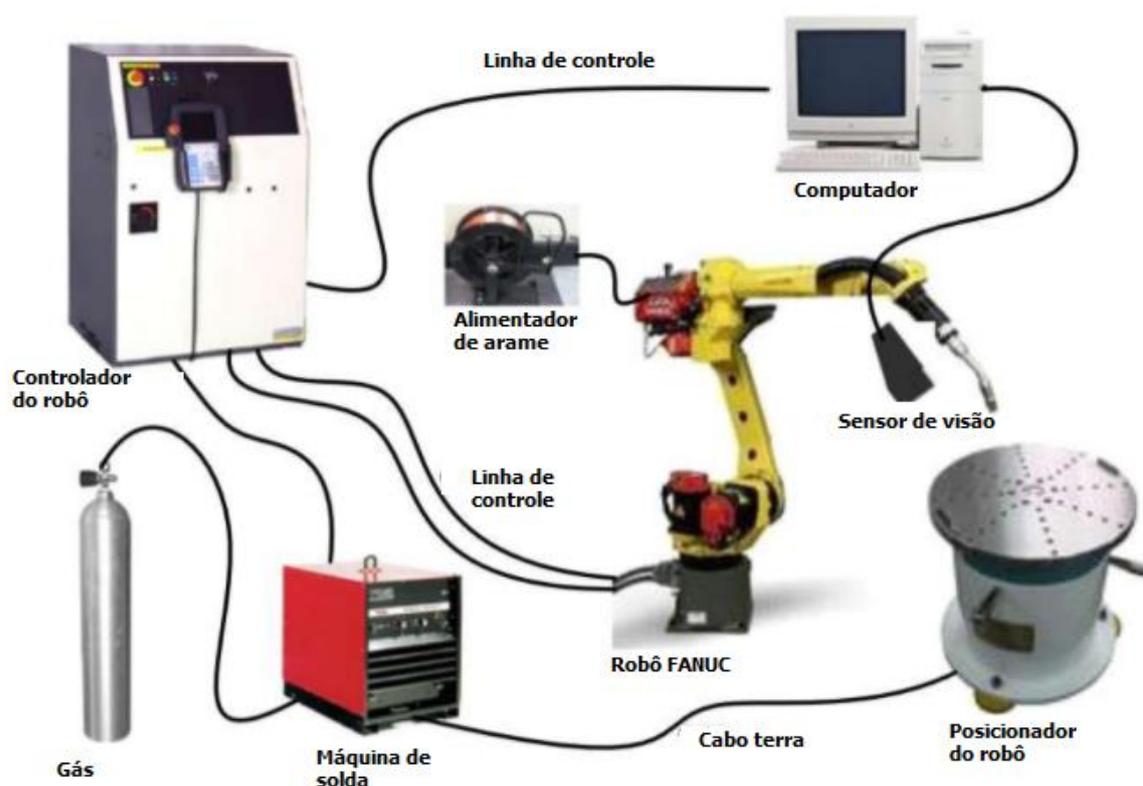


FIGURA 6 - SISTEMA DE SOLDAGEM GMAW
 FONTE: XU ET AL., 2015

Por meio de um sistema de visão passivo, Shen et al. (2008) lançam mão de um algoritmo para controlar a regulagem da corrente e da alimentação do arame, ao invés de controlar o posicionamento da tocha (coordenadas x, y, z; rotação em x, rotação em y e rotação em z).

Em algumas situações, são necessários sistemas adicionais ao robô para que seja feito o controle do seguimento de junta. O trabalho de Ebrahimpour, Fesharakifard e Rezaei (2018) apresenta um servomecanismo com parafuso de esfera 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 Shen et al. (2010) e de Zhou, Lin e Chen (2006) 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 de Kindermann, Silva e Dutra (2015) 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.

2.1.7. REALIDADE VIRTUAL E REALIDADE AUMENTADA EM SISTEMAS ROBOTIZADOS

De acordo com Vaidya, Ambad e Bhosle (2018), um dos pilares da Indústria 4.0 é o uso de Realidade Aumentada (RA), pois ela possibilita a execução de atividades 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, a 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.

Os trabalhos de Ni et al. (2017) e de Ong et al. (2019) 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 Reinhart, Munzert e Vogl (2008), 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.

Tavares et al. (2019) propõe 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 (RV). Os trabalhos de Liu (2016), de Liu e Zhang (2015) e de Liu e Zhang (2017), 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 7 representa o sistema utilizado no trabalho Liu e Zhang (2017), 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.

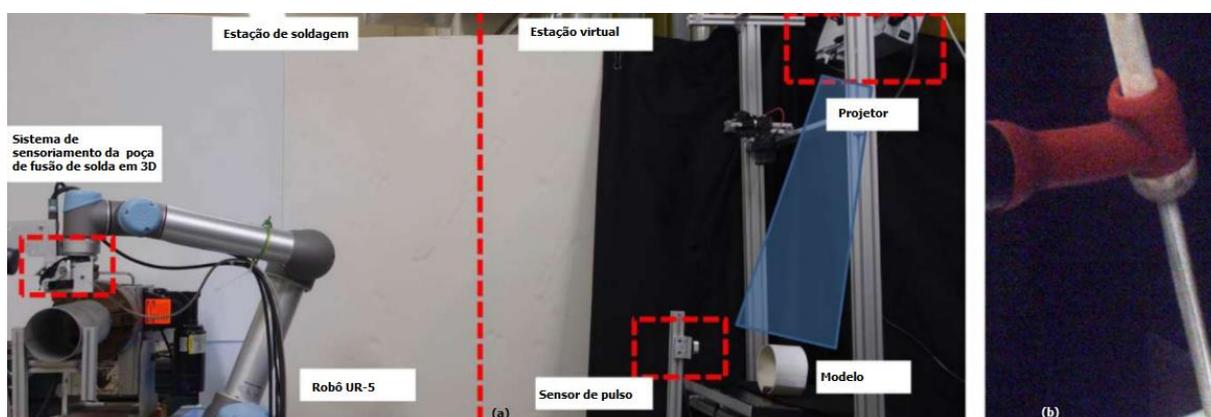


FIGURA 7 - (A) VISÃO GERAL DO SISTEMA DE SOLDAGEM VIRTUAL (B) TOCHA DE SOLDAGEM VIRTUAL (COM PESO E TAMANHO SIMILARES À TOCHA DE SOLDAGEM REAL).

FONTE: LIU E ZHANG, 2017

Ainda se tratando das novas tecnologias que vieram com a indústria 4.0, os trabalhos de Wang et al. (2019a) e de Wang et al. (2019b), apresentam sistemas *cyber* físicos 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.

O trabalho de Ebel et al. (2020) cobre o processamento de sinais para uma aplicação de soldagem robotizada controlada remotamente por humano. Esse sistema

permite que um habilidoso soldador faça a soldagem em tempo real, sem estar exposto ao estresse e fumos tóxicos do processo. O movimento da tocha feito pelo soldador é gravado por um sistema de sensoriamento estereoscópico. Foi utilizado um filtro de Kalman para eliminar os distúrbios dos dados e garantir a acurácia da informação que chega para o robô.

Por fim, o trabalho de Sanchez-Diaz et al. (2019) 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.

2.1.8. MÉTODOS DE APOIO À TOMADA DE DECISÃO APLICADOS AO PROCESSO DE SOLDAGEM

Considerando as diferentes tecnologias e métodos utilizados no processo de soldagem que foram apresentados nos subcapítulos anteriores, o trabalho de Correia e Ferraresi (2007) apresenta um modelo de seleção de processo de soldagem considerando os critérios: custo operacional e custo da não-qualidade. Para esse fim, utilizou-se um método de otimização baseado na função perda de Taguchi e comparou-se dois métodos de soldagem: o SAW (*Submerged Arc Welding* – “Soldagem por arco submerso”, em português) e o GMAW. Os resultados indicaram que apesar de os custos com não-qualidade serem um pouco maior para o SAW, eles são compensados pelo baixo custo operacional, o que leva esse método a ser a melhor opção para a aplicação avaliada.

Ravisankar, Balasubramanian e Muralidharan (2006) utilizaram o método AHP para selecionar o processo de soldagem mais adequado para juntas tampão de alumínio. As três alternativas de processos considerados foram: GMAW, GTAW (*Gas Tungsten Arc Welding* - “Soldagem por arco elétrico com eletrodo de tungstênio e gás de proteção”, em português) e PAW (*Plasma Arc Welding* – “Soldagem por arco de plasma”, em português). Foram considerados os seguintes critérios: preparação inicial requerida, disponibilidade de consumíveis, habilidades necessárias do soldador, procedimentos de soldagem, qualidade da solda, fadiga do operador, limpeza pós-soldagem, facilidade de informações, capacidade posicional da solda, custo do

processo. Os resultados mostraram que, para o caso analisado, a melhor opção era o processo de soldagem GTAW, seguido do processo GMAW e, por último, o PAW.

Ainda se tratando da seleção de métodos de soldagem, o trabalho de Balasubramanian et al. (2009) faz uso do AHP para selecionar entre cinco alternativas - SMAW (*Shielded Metal Arc Welding* – “Soldagem por arco elétrico com eletrodo revestido”, em português), GMAW, GTAW e SAW - qual é a mais adequada para o processo de soldagem de aço de caldeiras. Foram considerados os parâmetros quantitativos e qualitativos. Os resultados indicaram que o melhor método para esse caso foi o PTAW.

Pode-se observar que todos os trabalhos apresentados nessa subseção fizeram uso de métodos matemáticos de tomada de decisão para selecionar processos de soldagem, seja a seleção em termos de modelo de robô ou método de soldagem. Considerando a importância desses métodos na seleção de processos, a próxima subseção apresenta o método multicritério AHP COPRAS.

2.2. MÉTODO MULTICRITÉRIO AHP COPRAS

O AHP foi introduzido por Thomas Saaty (1980) na década de 80, e consiste em um método multicritério de apoio à de tomada de decisão baseado na avaliação de alternativas em termos de importância relativa, de acordo com os critérios adotados. Esse método usa uma combinação de critérios qualitativos e quantitativos ao mesmo tempo.

Três princípios guiam a solução de problemas através desse método: decomposição, comparação e síntese das prioridades. O princípio da decomposição é aplicado para a estruturação do problema e definição dos critérios. Já o princípio da comparação é aplicado para a comparação em pares da importância relativa dos critérios. O resultado é a matriz comparação e seu autovetor.

A matriz de comparação é construída utilizando a escala de níveis apresentada pela Tabela 3, na qual é feita uma comparação par-a-par de cada um dos critérios utilizados. Sendo assim, a diagonal da matriz comparação é diretamente definida como “1”, já que consiste na comparação de um critério com ele mesmo. Por fim, o

princípio da síntese consiste na multiplicação da matriz de comparação dos critérios pelo seu autovetor de priorização (SAATY, 1987).

Desde sua criação, esse método tem sido amplamente usado para tomada de decisões em situações comuns à indústria, como na seleção do melhor método de retrabalho de tubulações de água (ASCHILEAN et al., 2017), seleção do melhor provedor logístico para logística de terceirização - 3PL para uma empresa (GURCAN et al., 2016) e seleção de processos de conformação mecânica a serem utilizados (BOLOGA; BREAZ; RACZ; 2018).

TABELA 3 - ESCALA DE NÍVEIS SAATY

FONTE: SAATY (1987)

1	Igual importância	As duas contribuem igualmente para o objetivo
3	Importância pequena de uma sobre a outra	A experiência e o juízo favorecem uma atividade em relação a outra
5	Importância grande ou essencial	A experiência e o juízo favorecem fortemente uma atividade em relação a outra
7	Importância muito grande ou demonstrada	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra. Pode ser demonstrada na prática
9	Importância absoluta	A evidência favorece uma atividade em relação a outra, com o grau mais alto de segurança
2, 4, 6, 8	Valores intermediários	Quando se procura uma condição de compromisso entre duas definições

O COPRAS é um outro método multicritério de apoio à tomada de decisão que foi apresentado por Zavadskas, em 1994. Esse método usa o ranqueamento escalonado e um procedimento de avaliação das alternativas com base na sua significância e no grau de utilidade (ZAVADSKAS et al, 2008). Para isso, a aplicação do COPRAS necessita que os valores das alternativas sejam quantitativos, logo, é preciso transformar as variáveis qualitativas ou linguísticas em variáveis quantitativas. Isso é possível utilizando-se uma Tabela de Números *Fuzzy* (PITCHIPOO et al., 2014).

O primeiro passo do método COPRAS consiste na construção da matriz de decisão, na qual são ordenadas as alternativas. Em seguida, o cálculo dos pesos dos

critérios definidos é feito por meio do método AHP convencional. Nesse método, é importante compreender quais critérios são benéficos e quais não o são para o caso analisado. O terceiro e último passo consiste em ordenar as alternativas segundo os critérios estabelecidos e, assim, verificar qual a alternativa é mais adequada para o caso analisado.

O trabalho de Pitchipoo et al. (2014) apresenta a aplicação desse método na seleção do *design* mais adequado de transporte público para permitir a eliminação de pontos-cegos e, assim, reduzir acidentes. Os resultados da aplicação do método COPRAS foram comparados com uma simulação matemática de entropia e os resultados foram semelhantes.

Já o trabalho de Sen, Bhattacharjee e Mandal (2016) apresenta um estudo de caso no qual são comparados alguns métodos multicritérios de apoio à tomada de decisão, dentre eles o método COPRAS, na seleção do material mais adequado para a fabricação de bielas. Foram considerados critérios como: tensão de ruptura, dureza, limite de fadiga e tensão de escoamento. Os resultados mostraram que os diferentes métodos utilizados levaram a um *ranking* de materiais similar.

Por último, o trabalho de Gomathisankar, Gangatharan e Pitchipoo (2018) faz uso do método COPRAS para fazer a otimização de parâmetros do processo de soldagem por fricção, garantindo maior dureza e resistência à tração. Foram considerados os parâmetros velocidade angular da ferramenta, velocidade de soldagem, tempo de espera e ângulo de inclinação da ferramenta. O trabalho ainda faz uso da matriz ortogonal Taguchi L9 para realizar as funções e da análise de variância ANOVA para determinar a porcentagem de contribuição dos parâmetros do processo.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são descritos os procedimentos metodológicos empregados para o desenvolvimento do presente trabalho.

Considerando os critérios da metodologia científica (Miguel, 2007), esta dissertação pode ser definida como:

- **Quanto à natureza:** pesquisa do tipo empírica ou de campo, que busca dados através da experiência do pesquisador, estuda um problema para o qual se busca uma resposta.
- **Quanto ao objetivo científico:** Como pesquisa descritiva, já que tem por finalidade descrever sistematicamente uma situação, problema ou fenômeno: o uso do método AHP COPRAS na definição de qual o processo de soldagem mais adequado para uma determinada solda em uma linha de produção de uma empresa multinacional do ramo metalúrgico.
- **Quanto à abordagem:** esse trabalho tem abordagem qualitativa e quantitativa, já que a pesquisa consistiu em coletar evidências e fazer observações de um determinado processo, bem como houve a coleta de informações numéricas tais como a frequência e a intensidade dos comportamentos dos dados analisados.
- **Quanto ao método:** pode ser considerado como teórico-conceitual porque visa desenvolver um método de apoio à tomada de decisão para a seleção de uma tecnologia de soldagem, baseado nas informações coletadas por meio de um estudo de caso.
- **Quanto às técnicas de coleta de dados:**
 - Como bibliográfico, pois utiliza o conhecimento científico atual como base;
 - Como documental, pois utiliza fontes de informações não acadêmicas, bancos de dados e procedimentos da empresa utilizada no estudo de caso;

Para a realização do presente estudo, seguiu-se as quatro etapas apresentadas pela Figura 1: Revisão Bibliométrica; Seleção do Estudo de Caso; Seleção de Critérios e Coleta de Dados; e Aplicação do Método AHP COPRAS.

3.1. ETAPA 1 - REVISÃO BIBLIOMÉTRICA

Nessa etapa, foram realizadas pesquisas em artigos, dissertações, teses e livros referentes aos temas de processos de soldagem (manual, automatizado) e método de apoio à tomada de decisão AHP COPRAS. Desta forma, foi possível conhecer os conceitos e aplicações sobre os tópicos, além de entender qual o estado atual da literatura e quais são as tecnologias de soldagem mais utilizadas atualmente.

Visando mapear as principais mudanças nos processos de soldagem utilizados na indústria, optou-se por fazer a busca por artigos na base de dados internacional *Web of Science*. Para essa pesquisa, utilizou-se a palavra-chave “*welding*” (“soldagem”, em português) em conjunto com outros termos relevantes à pesquisa, como “*robot*” (“robô”, em português), “*industry 4.0*” (“indústria 4.0”, em português) e “*cyber physical*” (“ciber físico”, em português). Para além do uso dos termos acima, utilizou-se filtros de língua para que fossem selecionados apenas textos em português, inglês e espanhol. A composição final dos termos de busca é mostrada na Tabela 4:

TABELA 4 - TERMOS UTILIZADOS NA BUSCA

Termo de busca utilizado
(TS= ((welding AND robot) OR (welding AND "industry 4.0") OR (welding AND "cyber physical"))) AND IDIOMA: (English OR Portuguese OR Spanish) AND TIPOS DE DOCUMENTO: (Article)

A busca retornou 1026 trabalhos, dos quais apenas 526 deles estavam com o acesso aberto (500 trabalhos estavam protegidos por *paywall* ou acesso pago). Com esses 526 trabalhos disponíveis, foi feita uma triagem inicial do título, resumo e palavras-chave, verificando se o artigo realmente estava alinhado com a proposta do projeto.

Após esse primeiro filtro, restaram 207 artigos. Em seguida, foram avaliadas introdução e conclusão para novamente verificar se os artigos deveriam ser considerados. Por último, foi feita a leitura completa dos artigos e, após as verificações, selecionou-se 122 artigos para formar a base bibliográfica do presente estudo, conforme mostra a Figura 8:

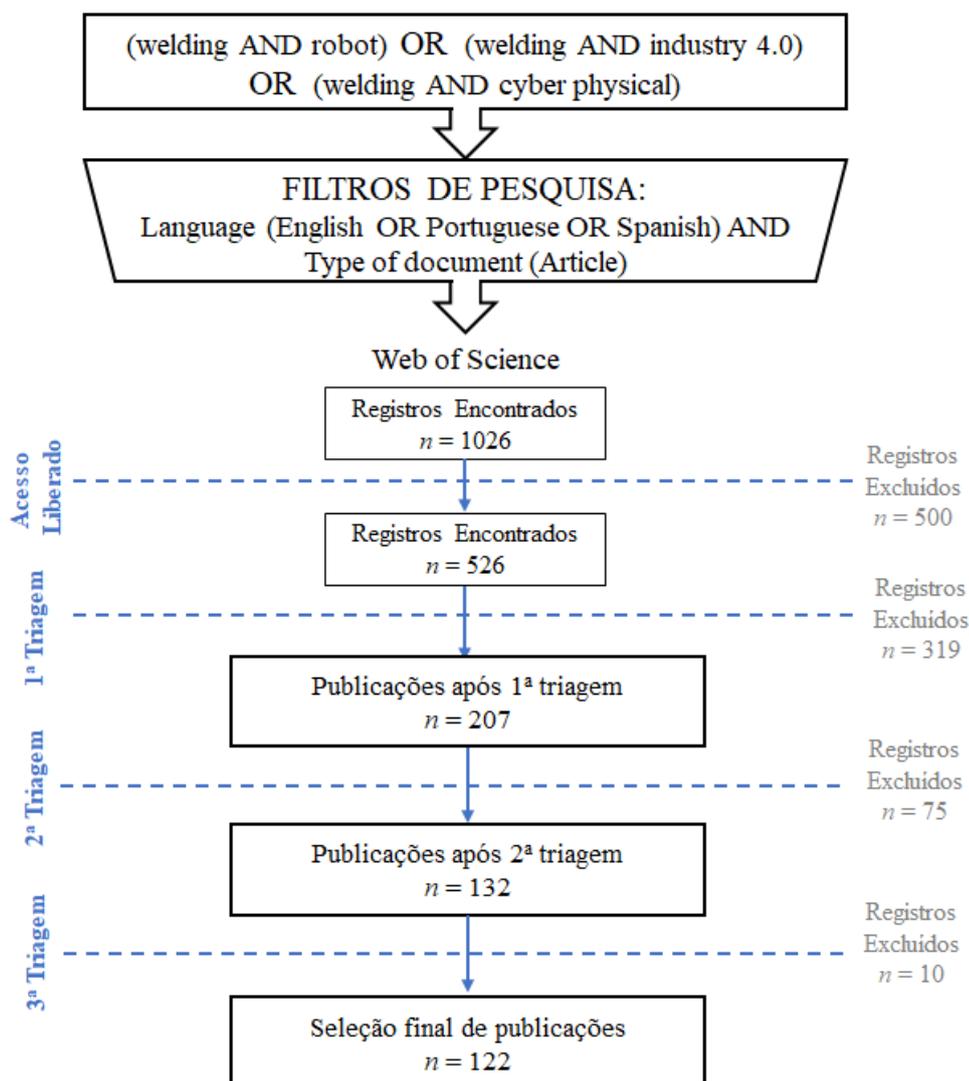


FIGURA 8 - RESULTADO DAS BUSCAS NA LITERATURA

O Gráfico 2 apresenta a quantidade de artigos encontrados por país. Pode-se observar que dos 122 artigos analisados, 59 deles tiveram origem na China, ou seja, 48,36% do total. O segundo país com o maior número de publicações é os EUA, com 9,02% do total (11 artigos). Essas informações se relacionam com os dados da Tabela 1 do *Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots* (International Federation of Robotics, 2018), o qual mostra a China e os EUA entre os países com maior quantidade de instalação de robôs industriais por ano.

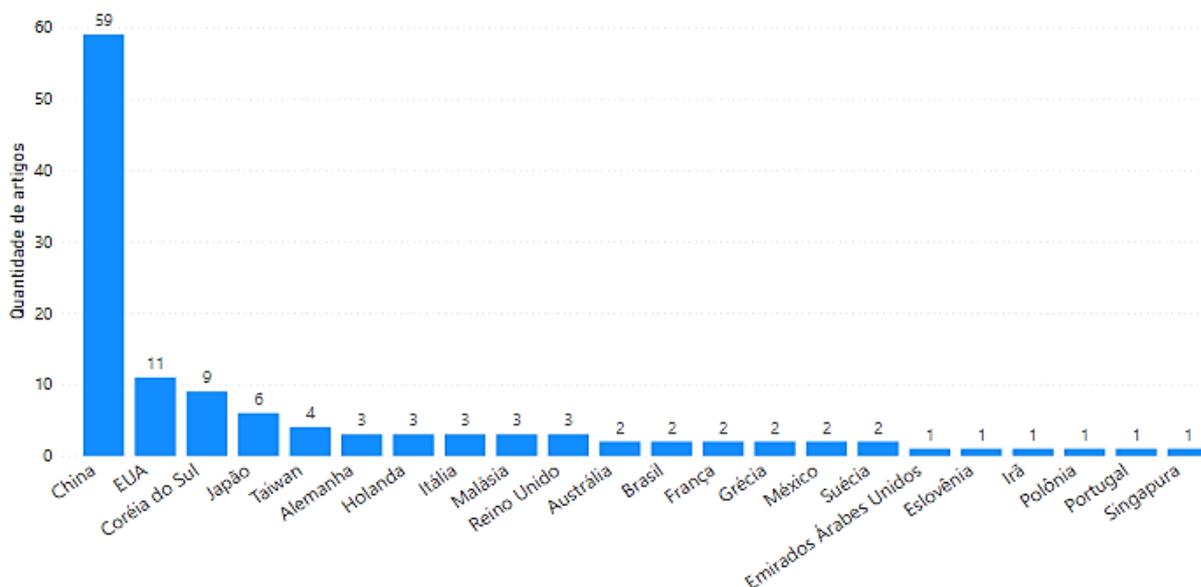


GRÁFICO 2 - NÚMERO DE ARTIGOS ANALISADOS POR PAÍS DE ORIGEM

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

O Gráfico 3 mostra a quantidade de artigos encontrados por ano, desde 1983 até 2020. Os dados mostram um crescente aumento por estudos na área de tecnologias do processo de soldagem, o que pode ser explicado pelo aumento na competição entre as empresas nos últimos anos e necessidade de processos mais flexíveis e eficientes a partir de novas tecnologias.

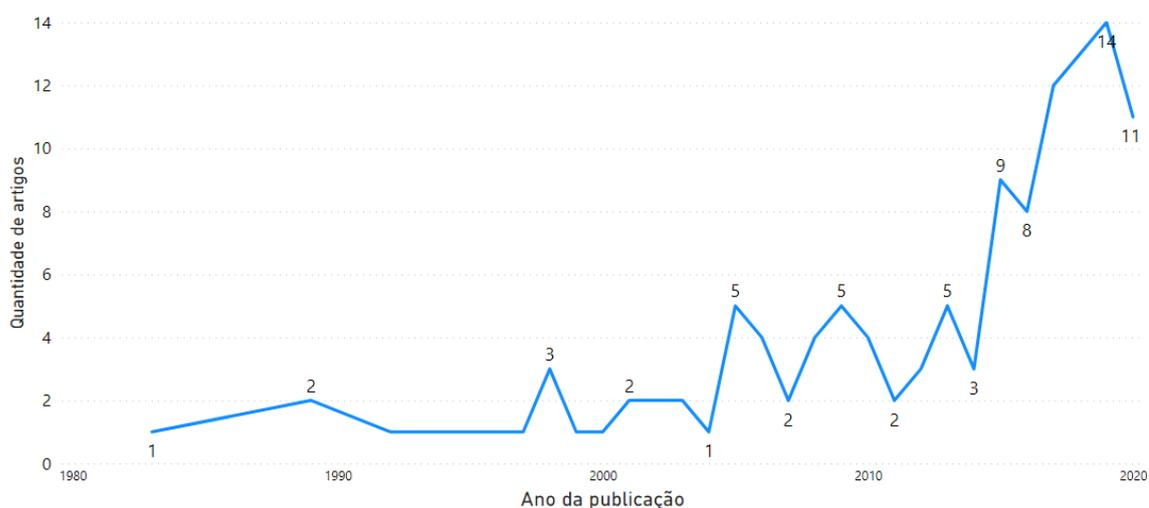


GRÁFICO 3 - NÚMERO DE ARTIGOS ANALISADOS POR ANO

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Além disso, a revisão bibliométrica mostrou que quase a metade das publicações (~48%) se concentraram em apenas 4 periódicos: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* (25,41%), *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* (12,3%), *Journal of Intelligent & Robotic Systems* (65,74%) e *Sensors* (4,92%).

O Gráfico 4 apresenta a porcentagem de artigos encontrados por tema, sendo eles: Detecção de juntas e desenvolvimento de trajetórias de solda (32,79%); Controle de costura de solda – *seam tracking* (27,05%); Controle de parâmetros de solda robotizada através de sistemas de visão (16,39%); Planejamento e otimização de sequência de soldas (9,02%); Realidade virtual em sistemas robotizados (5,74%); Controle de parâmetros de solda manual (4,1%); Realidade aumentada em sistemas robotizados (3,28%); Método de programação de robôs (1,64%).

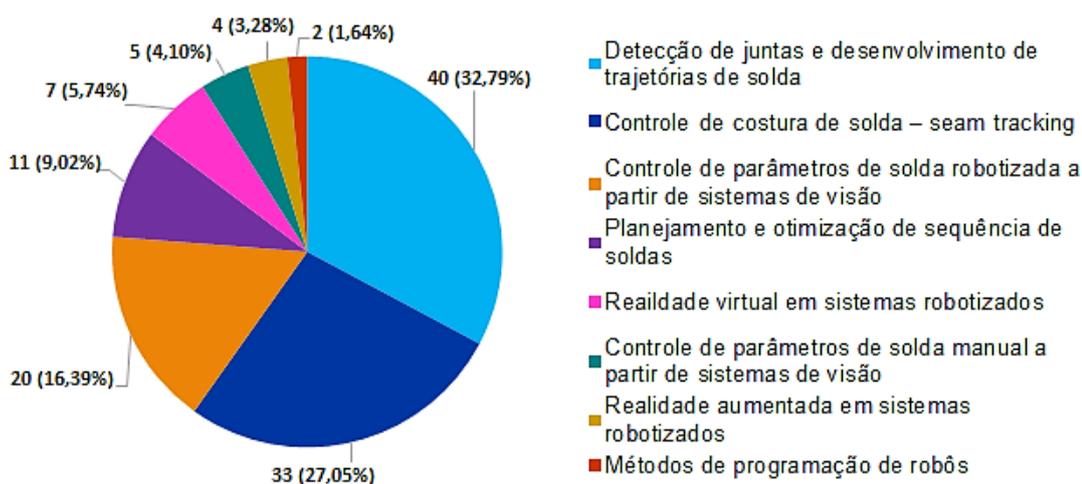


GRÁFICO 4 - PORCENTAGEM DE ARTIGOS ANALISADOS POR TEMA

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

A análise dos artigos mostra uma busca contínua pela melhoria do processo de soldagem a partir 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 por meio 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 a corrente e tensão elétrica e a velocidade de alimentação de arame. Também são discutidos métodos de avaliar o grau de habilidade de um soldador com o auxílio de sensores que captam variação de movimento e a impedância do braço do soldador. 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, diminuindo o tempo de processo, os erros de leitura da peça e reduzindo as distorções geradas pela soldagem.

Sobre a programação de robôs de solda, observa-se a busca por métodos mais simplificados e *offline*, que demandam menos tempo de parada do robô e geram 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 de micro pistola e bicos. A programação *offline* de robôs é possível por meio de *softwares* CAD, os quais se comunicam com *softwares* dos robôs de solda.

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 em tempo real e a junta projetada/desejada. São utilizados controladores (e.g., Proporcional, Integral e Derivativo - PID, *Fuzzy*) que corrigem esse erro por meio 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/mitigação de erros de rasgos nas peças, de porosidade e de 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 com as quais ele controla e corrige remotamente o posicionamento da tocha em tempo real. É utilizada a realidade aumentada para fazer o alinhamento entre os sistemas CAD e o ambiente da célula de soldagem, bem como para fazer a programação de tarefas do robô, facilitando a integração homem-máquina.

A Figura 9 sintetiza os resultados da pesquisa feita neste trabalho, apresentando quais são as principais tecnologias nos processos de solda manual, automatizado e integrado com CPS:

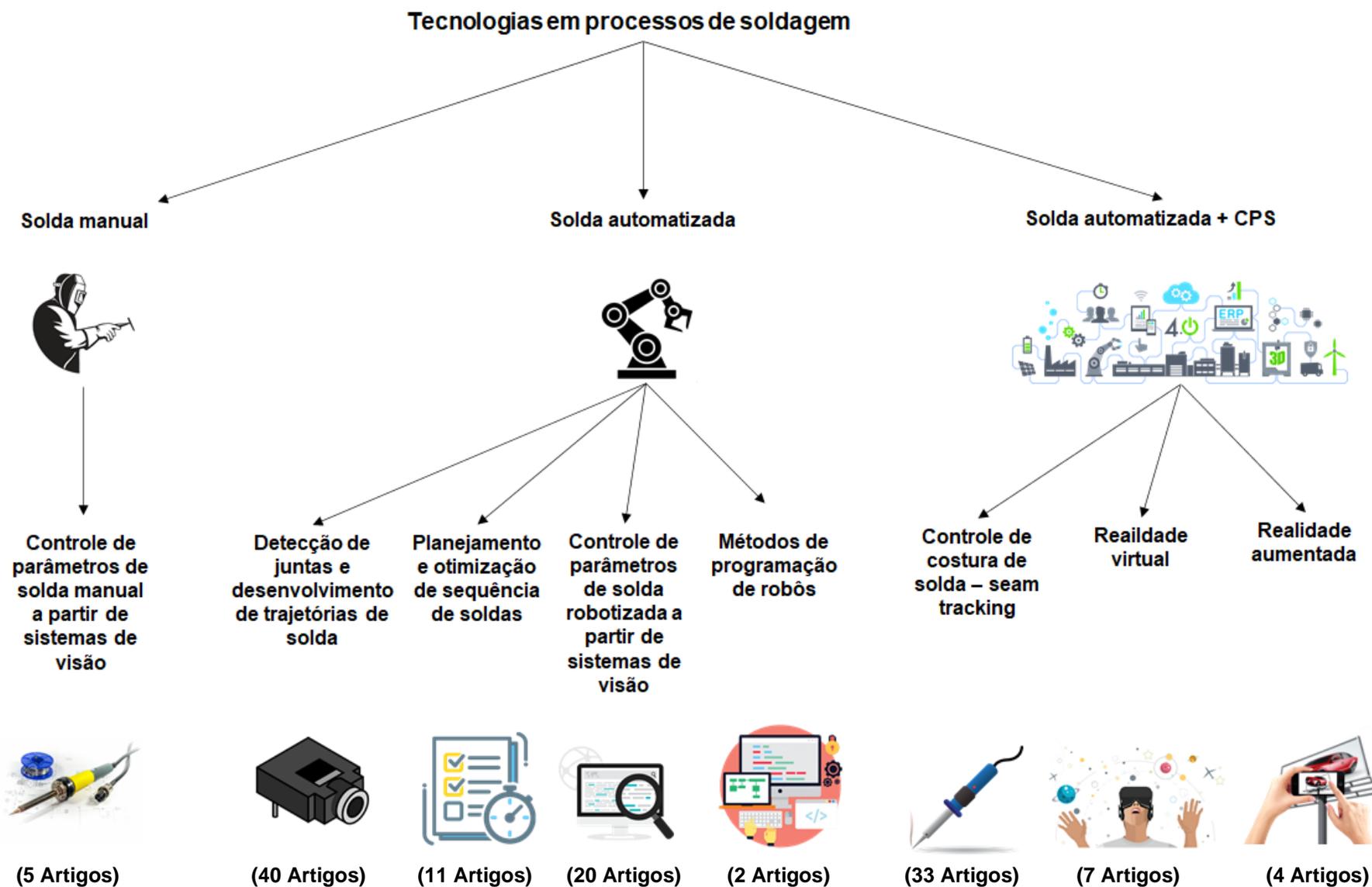


Figura 9 - Tecnologias utilizadas nos processos de soldagem

3.2. SELEÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso foi realizado em uma empresa multinacional de grande porte do setor metalúrgico localizada na região em Piracicaba (SP). Dentre os vários produtos que ela produz, é feita a fabricação (i.e., processos de tratamento térmico, soldagem, rebarbação e usinagem) de chassis de tratores, pintura de componentes, e montagem do trator e de componentes nas submontagens e linhas de produção.

Dentre as operações realizadas, foi selecionado o processo de soldagem para uma peça específica de tratores, a qual faz uso tanto de processos manuais quanto automatizados de soldagem. A peça escolhida para a análise é mostrada pela Figura 10. Conforme é possível observar, deve ser feita uma solda com preenchimento de 14mm no chanfro da junta em 1/2V, mais uma solda filete de 20mm em todo o contorno da junta e dos dois lados da peça.

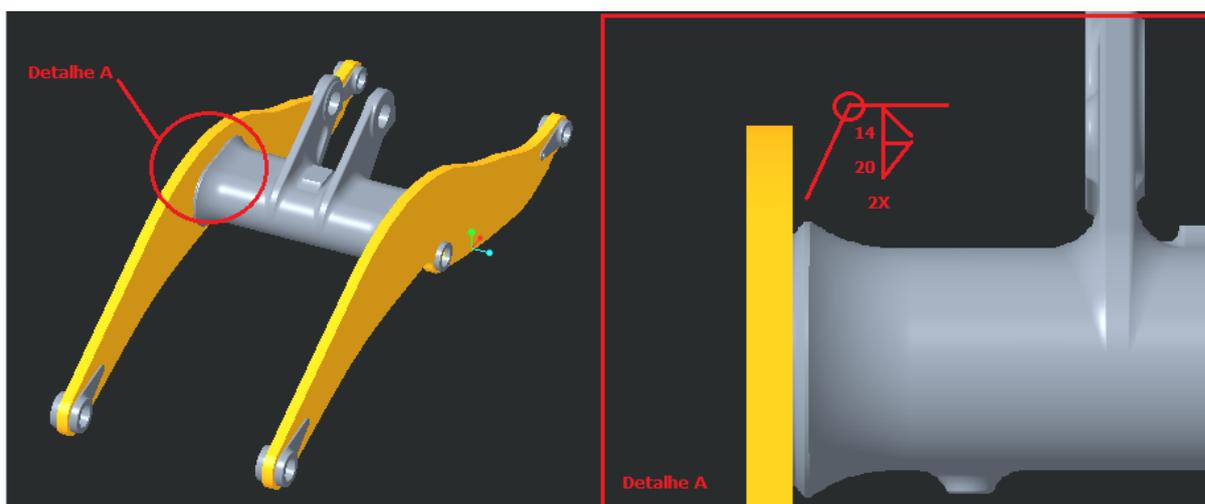


FIGURA 10 - PEÇA A SER SOLDADA POR UM DOS PROCESSOS SUGERIDOS NESTE TRABALHO

FONTES: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

De acordo com a empresa, o processo manual foi recentemente substituído pelo processo automatizado, porém o primeiro ainda funciona como um “processo tampão”. Assim, é feita soldagem manual da peça em casos de quebra do robô, paradas para manutenção ou caso a demanda de produção de peças seja maior que a capacidade do robô. A utilização do método AHP COPRAS feita nesse estudo servirá como parâmetro de validação da tomada de decisão pela escolha da tecnologia de solda mais adequada ao processo (manual ou automatizado).

3.1. ETAPA 3 – SELEÇÃO DE CRITÉRIOS E COLETA DE DADOS

Nessa etapa, foi necessária a realização de visitas na planta fabril da empresa. Durante as visitas, efetuou-se o levantamento dos processos internos; a coleta de dados sobre os processos de solda manual e automatizado, a partir da observação sistemática (observação da estrutura e equipamentos das células de soldagem, dos equipamentos de proteção individual utilizados em cada um dos processos, da posição de trabalho do soldador e ergonomia, da qualidade das soldas e do tempo de ciclo do processo); e análise documental de informações de cada um dos processos.

Juntamente com quatro especialistas do processo de soldagem da empresa analisada (três engenheiros de solda e um analista de processo de solda), foram definidos os quatro critérios mais importantes nessa atividade, usados então como referência para a coleta de dados e, posteriormente, avaliação.

A definição dos critérios foi previamente agendada com os especialistas e inicialmente foi apresentado o projeto de pesquisa e os objetivos do estudo. Em seguida, foram apresentados os modelos de seleção de tecnologias de soldagem (atual e AHP COPRAS). A Figura 11 apresenta o modelo atual de tomada de decisão e a Figura 12 apresenta o modelo proposto nesse trabalho.



FIGURA 11 - MODELO ATUAL DE TOMADA DE DECISÃO

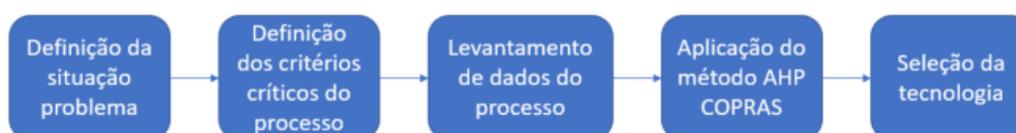


FIGURA 12 - MODELO AHP COPRAS PROPOSTO

Os critérios definidos para análise foram: Segurança e Ergonomia; Qualidade; Produtividade; e Custo.

3.1.1. SEGURANÇA E ERGONOMIA

O processo de solda envolve emissão de gases tóxicos e temperaturas elevadas. Além disso, dependendo da geometria da peça, pode haver problemas de ergonomia para o soldador, já que essa atividade é repetitiva e nem sempre a posição de trabalho é adequada. Sendo assim, normalmente a atividade é avaliada pela área de *Environmental, Health & Safety* - EHS (“Meio ambiente, Saúde e Segurança”, em português) e pontuada de acordo com a ferramenta de *Safety Failure Modes and Effects Analysis* - SFMEA (“Análise de modo e efeito de falha”, em português) para se identificar e classificar os riscos relacionados à atividade, com o intuito de eliminá-los ou mitigá-los.

O SFMEA é uma ferramenta baseada na metodologia FMEA e é utilizada para identificar onde um processo pode falhar, estimar o risco, avaliar o plano de controle para prevenir as falhas, definir correções interinas caso a falha ocorra e implantar ações que eliminem a possibilidade de falha. Durante uma avaliação de SFMEA é calculado o Número de Prioridade de Risco (RPN), que consiste na multiplicação de quatro índices relativos à atividade que está sendo analisada: severidade, ocorrência, detecção e recuperação (Rotondaro, 2002).

A severidade está relacionada com à importância do efeito sobre o cliente (e.g., quão grave é o dano que pode ser causado ao operador). A ocorrência diz respeito à frequência com que uma dada causa ocorre, diretamente relacionada à geração/ocorrência de falha. A detecção consiste na capacidade do processo em detectar falhas antes de elas ocorrerem (e.g., o uso de mecanismos/dispositivos *poka yokes* no processo ajudam a identificar e reduzir/eliminar o risco). Por último, a recuperação é a capacidade de se recuperar após a ocorrência da falha. Em alguns casos, o valor RPN calculado é transformado em valores qualitativos - risco baixo, médio, alto e muito alto (Rotondaro, 2002).

3.1.2. QUALIDADE

O processo de solda pode gerar algumas não-conformidades que prejudicam a funcionalidade da peça soldada, resultando em elevação dos custos com descartes

e/ou retrabalhos. Dentre os problemas mais comuns estão os níveis de porosidade fora do padrão, falta de fusão, penetração insuficiente, mordedura e trincas.

Os motivos para a ocorrência desses problemas são, muitas vezes, relacionados à carência de manutenção preventiva, falta de limpeza dos equipamentos, e/ou da limpeza inadequada da junta de solda. Muitas vezes o soldador não consegue identificar as não-conformidades na solda devido à falta de visibilidade (Figura 13) e acúmulo de sílica e respingos de solda.

No caso estudado, para o critério qualidade foi considerado o gasto com retrabalho interno de não-conformidades de solda da peça analisada, pois, segundo avaliou-se, esse é o maior gargalo relacionado à qualidade da solda. Após fabricadas e pintadas, as peças são inspecionadas de acordo com especificações da empresa. Quando é verificada alguma não-conformidade, a peça é enviada novamente à área de fabricação - onde é feito o retrabalho da solda, para, em seguida, ser levada até a área de pintura - onde é feito o retoque. É aberto um evento de qualidade para registrar a não-conformidade, no qual constam informações como número da peça, número de série de fabricação, descrição da não-conformidade e tempo total gasto no retrabalho.



FIGURA 13 - ACESSO E VISIBILIDADE DO SOLDADOR DURANTE A SOLDAGEM MANUAL

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

A quantificação do critério de qualidade foi definida a partir do gasto anual com retrabalho, referente a cada tecnologia avaliada. Assim, para o caso da solda manual, considerou-se o gasto anual durante um ano antes da instalação da célula robotizada

(quando o processo era feito apenas de modo manual). Para o caso da solda automatizada, foi considerado o gasto anual após a instalação da célula robotizada. Vale ressaltar que a quantidade de peças produzidas em ambos os casos foi a mesma.

3.1.3. PRODUTIVIDADE

O tempo de ciclo do processo de solda é um fator importante na seleção da tecnologia de soldagem, visto que impacta na eficiência da atividade. Quanto menor o tempo de ciclo, maior a velocidade do processo e maior o número de peças que podem ser produzidas em um turno de trabalho.

Por esse motivo, o parâmetro de Produtividade foi calculado como o inverso do tempo de ciclo, uma vez que tal procedimento resultará no indicador de peças produzidas por hora de processo (Equação 1):

$$Prod = \frac{1}{t_{ciclo}} \quad (1)$$

tal que,

- **Prod** é a produtividade do processo [peças/h];
- **t_{ciclo}** é o tempo médio de ciclo do processo [h].

3.1.4. CUSTO

O custo de instalação de uma célula de soldagem deve ser levado em conta visto que é preciso avaliar o tempo que leva para que o investimento feito nesse tipo de processo retorne à empresa. Para além do custo de instalação, deve-se avaliar o impacto no custo da mão de obra, pois, embora a automatização leve a uma redução no número de trabalhadores necessários para a realização do processo, a operação do processo automatizado exige uma mão-de-obra mais qualificada e, por consequência, mais cara.

Para a avaliação do presente critério, foi calculado o período de *payback* para os processos manual e automatizado. O período de *payback* mede o tempo necessário para que o investimento cumulativo de um projeto e outras despesas iniciais do projeto sejam compensadas pelas receitas líquidas cumulativas. Assim, quanto menor for o tempo de retorno do investimento, mais atraente o projeto parece ser (ALLEN, 1991).

A Equação 2 apresenta o cálculo usado para se obter o período de *payback*:

$$PP = \frac{I_C}{RL_C} \quad (2)$$

tal que,

- **PP** é o período de *payback* [anos];
- **I_C** é o investimento cumulativo [R\$];
- **RL_C** é a receita líquida cumulativa [R\$/ano].

A receita líquida cumulativa, por sua vez, representa a subtração do faturamento anual relacionado ao processo pelos custos e impostos associados à operação, conforme apresenta a Equação 3:

$$RL_C = F_{anual} - C_{anual} - T_{anual} \quad (3)$$

tal que,

- **RL_C** é a receita líquida cumulativa [R\$/ano].
- **F_{anual}** é o faturamento anual associado ao processo [R\$];
- **C_{anual}** são os custos anuais associados ao processo [R\$];
- **T_{anual}** são os impostos anuais associados ao processo [R\$].

Como o processo de soldagem avaliado é parte fundamental para a construção da peça escolhida (Figura 10), considerou-se como faturamento anual o preço da peça completa vezes a quantidade de peças que cada tecnologia de solda avaliada consegue produzir em um ano. Desse modo, a produtividade de cada alternativa estudada influenciar no resultado do período de *payback*.

Os custos anuais foram calculados por meio da somatória dos custos de mão-de-obra, manutenção, materiais e de retrabalho associados a cada alternativa

avaliada. A partir dos resultados de faturamento, preço da peça e receita líquida anual, calculou-se os impostos associados ao processo (Tabela 5):

TABELA 5 - TABELA DE IMPOSTOS INCIDENTES NO PROCESSO/PRODUTO AVALIADO

Imposto	Base de Cálculo	Alíquota
PIS - Programa de Integração Social ^a	Faturamento Bruto	1,65%
COFINS - Contribuição para Financiamento da Seguridade Social ^a		7,60%
IRPJ - Imposto de Renda de Pessoa Jurídica ^b	Receita Líquida	15% - até R\$240.000,00 de lucro anual; 25% - acima de R\$240.000,00 de lucro anual
CSLL - Contribuição Social sobre o Lucro Líquido ^c		9,00%
ICMS - Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços ^d	Preço do Produto	12 %+1,3%
IPI - Imposto sobre os Produtos Industrializados ^e		0%

^a Alíquotas e base de cálculo definidas pela República Federativa do Brasil (2003);

^b Alíquotas e base de cálculo definidas pela República Federativa do Brasil (1977), de acordo com a regra de tributação para lucro real;

^c Alíquotas e base de cálculo definidas pela República Federativa do Brasil (1988), de acordo com a regra de tributação para lucro real;

^d Alíquotas e base de cálculo definidas pelo Governo do Estado de São Paulo (2000);

^e Isenção do IPI devido ao credenciamento do produto avaliado na Agência Especial de Financiamento Industrial – FINAME (BNDES, 2021).

3.2. ETAPA 4 - APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP COPRAS

A aplicação do Método AHP COPRAS deve ser realizada a partir dos critérios definidos e dados coletados na Etapa 3.

O primeiro passo para a aplicação do método consiste na definição da matriz de comparação. Essa matriz é feita de acordo com o número de critérios. A diagonal é definida automaticamente como “1”, devido à comparação do critério com ele mesmo. Os outros elementos da matriz são resultado da comparação par-a-par das alternativas, por parte dos entrevistados/tomadores de decisão, os quais podem classificar uma comparação como: igual, marginalmente forte, forte, muito forte e

extremamente forte. Para além da classificação qualitativa, há a classificação quantitativa, por meio das relações de conversões apresentadas pela Tabela 6:

TABELA 6 - ESCALA PARA COMPARAÇÃO QUANTITATIVA DE ALTERNATIVAS.

Fonte: Bhushan e Rai (2007)

Opções	Valores Numéricos
Igual	1
Marginalmente Forte	3
Forte	5
Muito Forte	7
Extremamente Forte	9
Valores intermediários que refletem as entradas <i>Fuzzy</i>	2, 4, 6, 8
Reflete a dominância da segunda alternativa em comparação com a primeira	Recíprocas

É válido salientar a característica recíproca das comparações par-a-par: se um parâmetro A é 3 vezes mais importante que um parâmetro B, tem-se que B possui 1/3 da importância de A. Sendo assim, somente metade das comparações são necessárias (diagonal superior da matriz), já que cada elemento da metade restante (diagonal inferior) pode ser calculado como o inverso de seu elemento simétrico.

A Equação 4 apresenta a definição da matriz de comparação:

$$X_{att} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (4)$$

tal que,

- X_{att} é a matriz de decisão;
- a_{ij} é o termo da matriz de comparação localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, n$).

Uma vez definida a matriz de comparação, ela é normalizada, dividindo cada elemento pela soma dos elementos das respectivas colunas (Equações 5, 6 e 7):

$$N_{att} = \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} & \dots & N_{1n} \\ N_{21} & N_{22} & \dots & N_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ N_{n1} & N_{n2} & & N_{nn} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$N_{ij} = \frac{a_{ij}}{T_j} \quad (6)$$

$$T_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}, 1 \leq j \leq n \quad (7)$$

tal que,

- N_{att} é a matriz de decisão normalizada;
- N_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, n$);
- a_{ij} é o termo da matriz de decisão localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, n$);
- T_j é a soma dos elementos da coluna j ($j = 1, 2, \dots, n$).

Em seguida, é obtido o autovetor de prioridades W_{att} , por meio da média aritmética de cada linha da matriz normalizada (Equações 8 e 9).

$$W_{att} = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ w_3 \\ \vdots \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$w_j = \frac{\sum_{i=1}^n N_{ij}}{n} \quad (9)$$

tal que,

- W_{att} é o autovetor de prioridades;
- w_j é a prioridade/peso de cada critério, referente à coluna j ($j = 1, 2, \dots, n$) da matriz normalizada;
- N_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, n$);

Após a definição do autovetor, deve-se verificar a consistência da matriz de comparações, para identificar possíveis contradições nas entradas, provenientes de

problemas como definição vaga do sistema; informações insuficientes; informações incertas; falta de conhecimento/foco do decisor. Para isso, é necessário calcular o índice de consistência (CI) e a taxa consistência (CR). O índice de consistência é calculado pela Equação 10:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (10)$$

Em que λ_{max} é o máximo autovalor e n é o número de critérios de decisão do problema. A taxa de consistência (CR) é computada a partir da Equação 11:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (11)$$

Tal que **RI** se refere ao índice randômico, que varia a depender do número de critérios analisados, conforme mostra a Tabela 7:

TABELA 7 - ÍNDICE RANDÔMICO.

Fonte: Polat; Bingol; Var (2017).

Número de itens	Índice randômico	Número de itens	Índice randômico
1	0	6	1,24
2	0	7	1,32
3	0,58	8	1,41
4	0,90	9	1,45
5	1,12	10	1,49

Para que a matriz atinja um nível de consistência aceitável, a sua taxa de consistência (CR) da matriz deve ser menor que 0,1 (ou seja, 10%), em uma escala de 0 a 1. A razão disso está no fato de o método aceitar apenas um certo nível de contradições, de modo a mitigar o efeito de contradições nas comparações. Um fator decisivo para manter a CR baixo consiste em comparar um número pequeno de elementos, pois quanto maior o número de elementos da matriz, menores serão as prioridades relativas, aumentando os índices de erro (e.g., por arredondamento), influenciando consideravelmente na priorização (SAATY, 1987).

Caso a CR atinja valores maiores que 0,1, a matriz de comparação deve ser revisada. Caso a CR da matriz seja menor 0,1, é feita a classificação ou ranqueamento das alternativas a partir do autovetor.

O método AHP COPRAS é derivado do AHP tradicional. Ao invés de se definir uma matriz de decisão considerando os atributos de cada uma das alternativas, no AHP COPRAS é feito o desenvolvimento de uma matriz de decisão a partir das informações quantitativas e qualitativas de cada uma das alternativas.

Por exemplo, caso o AHP fosse aplicado para a seleção de um material para uma determinada aplicação, seriam aqui definidos os critérios mais importantes (Por exemplo: densidade, preço, dureza e resistência) e os especialistas construiriam a matriz de decisão considerando sua opinião sobre cada alternativa em relação aos atributos críticos definidos. Caso o AHP COPRAS fosse aplicado para a mesma situação, a matriz seria definida com base nos valores de densidade, preço, dureza e resistência de cada um dos materiais considerados.

Segundo Pitchipoo et al. (2014), o método AHP COPRAS inicia-se com a ordenação das alternativas segundo os critérios avaliados. São coletados os dados das alternativas e são inseridos em uma matriz de decisão conforme mostrado pela Equação 12:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{n1} & x_{n2} & & x_{nm} \end{bmatrix} \quad (12)$$

tal que,

- X é a matriz de decisão com as alternativas e atributos;
- x_{ij} é o termo da matriz de decisão com as alternativas e atributos localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, m$).

Em seguida, essa matriz é normalizada dividindo cada elemento pela soma das respectivas colunas (Equações 13 e 14):

$$\bar{X} = \begin{bmatrix} \bar{x}_{11} & \bar{x}_{12} & \dots & \bar{x}_{1m} \\ \bar{x}_{21} & \bar{x}_{22} & \dots & \bar{x}_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{x}_{n1} & \bar{x}_{n2} & & \bar{x}_{nm} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\bar{x}_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}} \quad (14)$$

tal que,

- \bar{X} é a matriz de decisão normalizada das alternativas e atributos;
- \bar{x}_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, m$);

O próximo passo é multiplicar essa matriz normalizada das alternativas pelo autovetor W_{att} de prioridades da matriz dos critérios, conforme indicado nas Equações 15 e 16:

$$\hat{X} = \begin{bmatrix} \hat{x}_{11} & \hat{x}_{12} & \dots & \hat{x}_{1m} \\ \hat{x}_{21} & \hat{x}_{22} & \dots & \hat{x}_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{x}_{n1} & \hat{x}_{n2} & & \hat{x}_{nm} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$\hat{x}_{ij} = \bar{x}_{ij} * W_{att} \quad (16)$$

tal que,

- \hat{X} é a matriz de decisão ponderada das alternativas e atributos;
- \hat{x}_{ij} é o termo matriz ponderada das alternativas e atributos, localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, m$);
- \bar{x}_{ij} é o termo da matriz normalizada localizado na linha i ($i = 1, 2, \dots, n$) e na coluna j ($j = 1, 2, \dots, m$);
- W_{att} é o autovetor de prioridades.

Depois, é feita a determinação do índice de maximização P_j e do índice de minimização R_j , indicados pelas Equações 17 e 18. Os critérios utilizados para na composição de P_j são aqueles que quanto maior o seu valor, melhor será o resultado da alternativa. Os critérios usados para a composição do R_j , por outro lado, são o inverso: Quanto menor o valor, melhor será o resultado da alternativa.

$$P_j = \sum_{i=1}^k \hat{x}_{ij} \quad (17)$$

$$R_j = \sum_{i=k+1}^m \hat{x}_{ij} \quad (18)$$

tal que,

- P_j é o índice de maximização para j ($j = 1, 2, \dots, n$);
- R_j é o índice de minimização para j ($j = 1, 2, \dots, n$);

- \hat{x}_{ij} é o termo matriz ponderada das alternativas e atributos;
- k é o número de atributos que deve ser maximizado.

Por último, é feita a determinação do peso relativo para cada alternativa (Q_j), que é o que possibilita a priorização das alternativas: quanto maior o valor de Q_j , melhor será a alternativa. (Equação 19).

$$Q_j = P_j + \frac{\sum_{j=1}^n R_j}{R_j \sum_{j=1}^n \frac{1}{R_j}} \quad (19)$$

tal que,

- Q_j é peso relativo da alternativa j ($j = 1, 2, \dots, n$);
- P_j é o índice de maximização para j ($j = 1, 2, \dots, n$);
- R_j é o índice de minimização para j ($j = 1, 2, \dots, n$).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. QUANTIFICAÇÃO DOS CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

Após as definições apresentadas na Secção 3.3, realizou-se a coleta de informações na empresa, por meio de entrevistas com especialistas (analistas e engenheiros do processo de solda, e profissionais de EHS) e da análise de dados dos processos. Utilizando-se as informações obtidas da revisão bibliométrica e compreendendo quais são os parâmetros/critérios mais importantes para o processo de soldagem, foi feita a quantificação dos quatro critérios de seleção das tecnologias de soldagem: Segurança e Ergonomia, Qualidade, Velocidade e Custo.

4.1.1. SEGURANÇA E ERGONOMIA

Segundo avaliação da empresa estudada, por meio da qualificação realizada a partir da ferramenta SFMEA, o processo de solda manual da peça escolhida tem risco médio, já que a posição de soldagem do soldador não é adequada, a atividade é repetitiva e, em alguns momentos, o soldador precisa se posicionar por debaixo da peça. A Figura 14 mostra a posição do soldador para a operação de soldagem manual:



FIGURA 14 - POSIÇÃO DO SOLDADOR DURANTE O PROCESSO DE SOLDAGEM MANUAL

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

No caso da soldagem automatizada, por outro lado, a avaliação do estudo SFMEA indica que o processo tem risco baixo, já que o soldador só entra em contato com a peça quando coloca ela no dispositivo de soldagem e quando vai removê-la.

A partir da avaliação qualitativa dos riscos ocupacionais das duas tecnologias de soldagem, realizou-se a quantificação desses riscos com o auxílio da Tabela 8, que apresenta uma regra de conversão de variáveis linguísticas em valores *Fuzzy*.

TABELA 8 - CONVERSÃO DE VARIÁVEL LINGUÍSTICA EM VALOR FUZZY

Fonte: RAO (2013)

Variável Linguística	Valor <i>Fuzzy</i>
Excepcionalmente baixo	0,0455
Extremamente baixo	0,1364
Muito baixo	0,2273
Baixo	0,3182
Abaixo da média	0,4091
Média	0,5000
Acima da média	0,5990
Alto	0,6818
Muito alto	0,7727
Extremamente alto	0,8636
Excepcionalmente alto	0,9545

A Tabela 9 apresenta os resultados, tanto qualitativos quanto quantitativos, das tecnologias de soldagem estudadas para o critério “Segurança e Ergonomia”.

TABELA 9 - CLASSIFICAÇÃO PRIORIZAÇÃO: SEGURANÇA E ERGONOMIA

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Tecnologia	Risco	Valor <i>Fuzzy</i> [-]
Solda manual	Médio	0,5
Solda automatizada	Baixo	0,3182

4.1.2. QUALIDADE

A partir dos tempos anuais de retrabalho interno (5 horas para o caso da solda manual e 3 horas para o caso da solda automatizada) e do custo da hora de retrabalho (R\$ 200,00), foi possível atribuir os valores de classificação para o critério “Qualidade” (Custo de anual total de retrabalho interno), conforme apresenta a Tabela 10:

TABELA 10 - CLASSIFICAÇÃO PRIORIZAÇÃO: QUALIDADE

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Tecnologia	Tempo total de retrabalho [h]	Custo por hora [R\$/h]	Custo de anual total de retrabalho interno [R\$]
Solda manual	5	R\$200,00	R\$ 1.000,00
Solda automatizada	3	R\$200,00	R\$ 600,00

4.1.3. PRODUTIVIDADE

Comparado com o processo manual, o processo de solda automatizado permite movimentos mais rápidos e precisos que o homem, garantindo melhor rendimento do processo, pois não varia o tamanho da solda e não apresenta paradas. Excluído o tempo de manutenção, o robô não para. A Figura 15 apresenta uma célula similar àquela analisada no estudo:

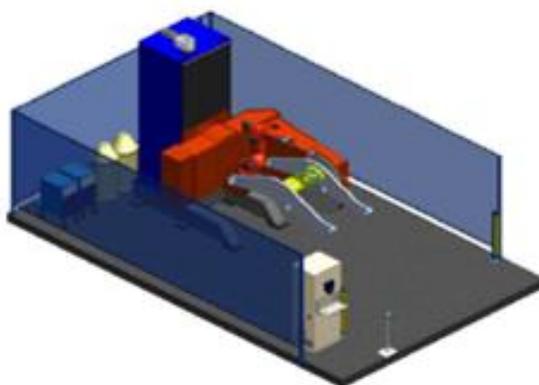


FIGURA 15 - ESTRUTURA DA CÉLULA DE SOLDAGEM AUTOMATIZADA

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Após análise dos dados de produção dos dois tipos de tecnologia, verificou-se que tempo médio de ciclo para cada um dos processos foi de 3,79 horas para o caso da solda manual e 1,45 horas para o caso da solda automatizada. A partir dessas informações, calculou-se o indicador de produtividade para cada caso (Equação 1), apresentado pela Tabela 11:

TABELA 11 - CLASSIFICAÇÃO PRIORIZAÇÃO: PRODUTIVIDADE

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Tecnologia	Tempo médio de ciclo [h]	Produtividade [peças/h]
Solda manual	3,79	0,264
Solda automatizada	1,45	0,690

4.1.4. CUSTO

A Tabela 12 apresenta os dados gerais de faturamento, custos e impostos anuais referentes ao processo de soldagem manual e de soldagem automatizado. Em ambos os casos, considerou-se que um ano possui 252 dias úteis e que cada dia útil

tinha dois turnos de trabalho, totalizando 16 horas diárias. O custo anual por operador (R\$ 58.613,40), o custo de material por peça produzida (R\$ 11.847,40) e o faturamento por peça (R\$ 17.721,94) também foram considerados os mesmos para os dois casos. Para cada tipo de processo, considerou-se o indicador de produtividade apresentado pela Tabela 11. O custo anual com retrabalho foi o mesmo utilizado como indicador de qualidade para os processos (Tabela 10). Outro ponto importante de diferença entre os processos foi a necessidade de um operador a menos para o processo automatizado, em comparação com o processo manual.

TABELA 12 - DADOS DE FATURAMENTO, CUSTOS E IMPOSTOS ANUAIS REFERENTES AOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO.

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Parâmetro	Solda Manual	Solda Automatizada
Produtividade [peça/h]	0,264	0,690
Horas trabalhadas em um dia [h/dia]	16	16
Dias trabalhados em um ano [dia/ano]	252	252
Horas trabalhadas no ano [h/ano]	4032	4032
Capacidade de produção anual [peças/ano]	1064	2782
Faturamento por peça [R\$/peça]	R\$ 17.721,94	R\$ 17.721,94
Faturamento Anual Total [R\$]	R\$ 18.856.144,16	R\$ 49.302.437,08
Custo Anual por Operador [R\$/ano]	R\$ 58.613,40	R\$ 58.613,40
Números de operadores [-]	3	2
Custo anual com mão de obra [R\$]	R\$ 175.840,20	R\$ 117.226,80
Custo de material por peça [R\$/peça]	R\$ 11.847,40	R\$ 11.847,40
Custo anual com material [R\$]	R\$ 12.605.633,60	R\$ 32.959.466,80
Custo anual com retrabalho [R\$]	R\$ 1.000,00	R\$ 600,00
Outros Processos [R\$]	R\$ -	R\$ -
Custos Anuais Totais [R\$]	R\$ 12.782.473,80	R\$ 33.077.293,60
Base para IRPJ e CSLL (1º ano) [R\$]	R\$1.918.418,15	R\$4.384.255,90
Base para PIS e COFINS (1º ano) [R\$]	R\$16.348.276,99	R\$42.745.212,95
IRPJ - Alíquota 15% [R\$]	R\$ 36.000,00	R\$ 36.000,00
IRPJ - Alíquota 25% [R\$]	R\$419.604,54	R\$1.036.063,98
CSLL [R\$]	R\$172.657,63	R\$394.583,03
PIS [R\$]	R\$269.746,57	R\$705.296,01
COFINS [R\$]	R\$1.242.469,05	R\$3.248.636,18
ICMS [R\$]	R\$2.507.867,17	R\$6.557.224,13
Impostos Anuais Totais[R\$]	R\$4.648.344,96	R\$11.977.803,33

A partir dos dados anuais de faturamento, custos e impostos, bem como do investimento cumulativo necessário tanto para a soldagem manual quanto para a

automatizada, foi possível calcular o período de *payback* (em anos) para cada um dos processos (Tabela 13):

TABELA 13 - INVESTIMENTO CUMULATIVO, RECEITA LÍQUIDA CUMULATIVA ANUAL E PERÍODO DE PAYBACK EM ANOS DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Parâmetro	Solda Manual	Solda Automatizada
Investimento Cumulativo do Processo [R\$]	R\$ 135.169,42	R\$ 1.329.731,26
Receita Líquida Cumulativa Anual [R\$]	R\$ 1.425.325,40	R\$ 4.247.340,15
Período de <i>Payback</i> [anos]	1	1

A partir dos dados apresentados pela Tabela 13, é possível verificar que o investimento acumulado para implementação da montagem célula de soldagem automatizada é muito mais elevado que a da célula de soldagem manual. Isso se deve à maior quantidade de equipamentos e sistemas de segurança necessários para seu funcionamento. Outro ponto que vale a pena ressaltar é que o período de *payback* foi de apenas 1 ano para ambos os casos. Isso aconteceu pois a receita líquida cumulativa anual de ambos os processos foi maior do que seus respectivos investimentos cumulativos.

Como o resultado de *payback* foi o mesmo tanto para a solda manual, quanto para a solda automatizada, decidiu-se, então, avaliar o período de *payback* em meses, com o intuito de se verificar a diferença entre essas duas opções no critério de Custo. Assim, os parâmetros avaliados foram ajustados para da base anual para a base mensal, conforme apresentado pela Tabela 14. A partir dos dados mensais ajustados de faturamento, custos e impostos, mantendo-se o investimento cumulativo necessário tanto para a soldagem manual quanto para a automatizada, foi possível calcular o período de *payback* em meses para cada um dos processos (Tabela 15).

TABELA 14 - DADOS DE FATURAMENTO, CUSTOS E IMPOSTOS ANUAIS REFERENTES AOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO.

FONTES: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Parâmetro	Solda Manual	Solda Automatizada
Produtividade [peça/h]	0,264	0,690
Horas trabalhadas em um dia [h/dia]	16	16
Dias trabalhados em um mês [dia/mês]	21	21
Horas trabalhadas em um mês [h/mês]	336	336
Capacidade de produção mensal [peças/mês]	88,67	231,83
Faturamento por peça [R\$/peça]	R\$ 17.721,94	R\$ 17.721,94
Faturamento Mensal Total [R\$]	R\$ 1.571.404,42	R\$ 4.108.477,35
Custo Mensal por Operador [R\$/mês]	R\$ 4.884,45	R\$ 4.884,45
Números de operadores [-]	3	2
Custo mensal com mão de obra [R\$]	R\$ 14.653,35	R\$ 9.768,90
Custo de material por peça [R\$/peça]	R\$ 11.847,40	R\$ 11.847,40
Custo mensal com material [R\$]	R\$ 1.050.508,96	R\$ 2.746.582,74
Custo mensal com retrabalho [R\$]	R\$ 83,33	R\$ 50,00
Outros Processos [R\$]	R\$ -	R\$ -
Custos Mensais Totais [R\$]	R\$ 1.065.245,64	R\$ 2.756.401,64
IRPJ - Alíquota 15% [R\$]	R\$3.000,00	R\$ 3.000,00
IRPJ - Alíquota 25% [R\$]	R\$34.967,05	R\$86.338,67
CSLL [R\$]	R\$14.388,14	R\$32.881,92
PIS [R\$]	R\$22.478,88	R\$58.774,67
COFINS [R\$]	R\$103.539,09	R\$270.719,68
ICMS [R\$]	R\$208.988,93	R\$546.435,34
Impostos Anuais Totais [R\$]	R\$387.362,08	R\$998.150,28

TABELA 15 - INVESTIMENTO CUMULATIVO, RECEITA LÍQUIDA CUMULATIVA MENSAL E PERÍODO DE PAYBACK EM MESES DOS PROCESSOS DE SOLDAGEM MANUAL E AUTOMATIZADO

FONTES: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Parâmetro	Solda Manual	Solda Automatizada
Investimento Cumulativo do Processo [R\$]	R\$ 135.169,42	R\$ 1.329.731,26
Receita Líquida Cumulativa mensal [R\$]	R\$ 118.796,70	R\$ 353.925,43
Período de <i>Payback</i> [meses]	2	4

Finalmente, a partir dos dados apresentados pela Tabela 15, é possível identificar que o período de *payback* para a solda manual foi de 2 meses e o da solda automatizada de 4 meses.

4.2. APLICAÇÃO DO MÉTODO AHP COPRAS

A primeira etapa do método AHP COPRAS consiste no desenvolvimento da matriz de comparação. Nesse estudo de caso, a definição dos elementos da matriz de comparação foi realizada juntamente com os especialistas entrevistados (engenheiros de solda e analistas de processos), por meio de um processo de decisão por consenso. A Tabela 16 apresenta a matriz de comparação obtida e a Tabela 17 apresenta a mesma matriz normalizada.

TABELA 16 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO
 FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

	Segurança e ergonomia	Qualidade	Produtividade	Custo
Segurança e ergonomia	1	7	8	9
Qualidade	0,14	1	4	5
Produtividade	0,13	0,25	1	2
Custo	0,11	0,20	0,50	1

TABELA 17 - MATRIZ DE COMPARAÇÃO NORMALIZADA
 FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

	Segurança e ergonomia	Qualidade	Produtividade	Custo
Segurança e ergonomia	0,73	0,83	0,59	0,53
Qualidade	0,10	0,12	0,30	0,29
Produtividade	0,09	0,03	0,07	0,12
Custo	0,08	0,02	0,04	0,06

Em seguida foi definido o vetor de priorização dos critérios W_{att} , conforme indicado na Tabela 18:

TABELA 18 - VETOR DE PRIORIZAÇÃO DOS CRITÉRIOS W_{att}
 FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Critério	Valor em W_{att}
Segurança e ergonomia	0,669
Qualidade	0,203
Produtividade	0,078
Custo	0,050

Após a matriz de preferência estar completa, verificou-se a sua consistência para identificar possíveis contradições nas entradas. Para essa avaliação, foram calculados o índice de consistência CI e, posteriormente, a taxa de consistência CR, mostrados na Tabela 19. Como a taxa de consistência CR encontrada foi menor que 0,1, deu-se continuidade aos cálculos.

TABELA 19 - VERIFICAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DA MATRIZ DE COMPARAÇÃO

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

Elementos de consistência	Valor
CI	0,088
CR	0,097

Em seguida, foram coletadas as informações de Segurança e Ergonomia, Qualidade, Velocidade e Custo para a criação da matriz de decisão (Tabela 20) e a matriz de decisão normalizada (Tabela 21).

TABELA 20 - MATRIZ DE DECISÃO

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

	Segurança e ergonomia	Qualidade	Produtividade	Custo
Solda manual	0,50	R\$ 1.000,00	0,264	2
Solda automatizada	0,3182	R\$ 600,00	0,690	4

TABELA 21 - MATRIZ DE DECISÃO NORMALIZADA

Fonte: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

	Segurança e ergonomia	Qualidade	Produtividade	Custo
Solda manual	0,61	0,63	0,28	0,33
Solda automatizada	0,39	0,38	0,72	0,67

Realizou-se, então, a multiplicação da matriz de decisão normalizada pelo vetor de priorização dos critérios W_{att} (Tabela 18). O resultado consiste na matriz ponderada das alternativas com relação aos critérios definidos anteriormente (Tabela 22).

TABELA 22 - MATRIZ PONDERADA DE DECISÃO

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

	Segurança e ergonomia	Qualidade	Produtividade	Custo
Solda manual	0,41	0,13	0,02	0,02
Solda automatizada	0,26	0,08	0,06	0,03

A partir da matriz ponderada de decisão (Tabela 22), é feita a determinação do índice de maximização P_j , por meio dos somatórios dos critérios benéficos, e do índice de minimização R_j , por meio do somatório dos critérios não-benéficos.

Foi considerado benéfico o critério *Produtividade*, uma vez que quanto maior a velocidade do processo, maior é a eficiência e menor o tempo de ciclo necessário para se produzir uma peça. Foram considerados não-benéficos os critérios: **Segurança e Ergonomia**, já que quanto maior o valor numérico para a alternativa, pior é o seu resultado no SFMEA; **Qualidade**, porque quanto maior o custo do retrabalho no ano, maior é a ocorrência de não-conformidades no processo de solda; **Custo**, uma vez que quanto maior o período de *payback* para a implementação de uma tecnologia, menos atrativa ela é.

A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos para P_j e R_j :

TABELA 23 - DETERMINAÇÃO DE P_j E R_j

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

	P_j	R_j
Solda manual	0,02	0,55
Solda automatizada	0,06	0,37

Por último, foi feita a determinação dos pesos relativos de cada alternativa Q_j , conforme mostrado na Tabela 24:

TABELA 24 - DETERMINAÇÃO DE Q_j

FONTE: RESULTADOS ORIGINAIS DA PESQUISA

	Q_j
Solda manual	0,39
Solda automatizada	0,61

Dessa forma, de acordo com os resultados obtidos da aplicação do método AHP COPRAS, o processo automatizado é o mais adequado para soldagem da peça avaliada nesse estudo de caso.

4.3. DISCUSSÃO

O vetor de priorização W_{att} (mostrado na Tabela 18) indica que, para os especialistas entrevistados, o grau de importância dos critérios, do maior para o menor, se dá da seguinte forma: Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo.

O fato de o critério Segurança e Ergonomia ser considerado o mais importante pode estar relacionado com o seguimento de normas internas da empresa e com a preocupação com a saúde dos profissionais envolvidos. A Segurança e Ergonomia são parte da Engenharia do Trabalho, um dos campos da Engenharia de Produção, que busca avaliar, desenvolver e aperfeiçoar processos, atividades, produtos e ambientes de modo a melhorar a qualidade e produtividade deles, ao mesmo tempo em que preserva a saúde dos funcionários.

O fator Qualidade também é compreendido como de alto grau de importância porque a empresa precisa se adequar às normas internacionais e deve garantir a satisfação do cliente. Além disso, o processo deve ter alta confiabilidade e repetibilidade de modo a evitar retrabalhos e inspeções. Também é importante comentar que existe uma recomendação do *design* da peça para que as soldas sejam feitas de modo automatizado/robotizado, uma vez que isso reduz o tempo de ciclo do processo e proporciona soldas com alto desempenho à fadiga. A soldagem automatizada também permite melhor aparência e penetração de solda.

Os fatores Produtividade e Custo, apesar de terem sido considerados de menor importância, permitem verificar a eficiência produtiva e financeira do processo. Se o projeto de um novo processo de manufatura não proporciona a redução de tempo de ciclo, de custo operacional (e.g., mão-de-obra, insumos) ou se o custo de implantação dele é muito alto, ele pode ser inviabilizado, mesmo estando de acordo com os itens de Qualidade, Segurança e Ergonomia.

Quanto ao resultado da aplicação do método AHP COPRAS para o estudo de caso escolhido, identificou-se que a soldagem automatizada é mais adequada, se destacando na maioria dos fatores avaliados:

1) Segurança e ergonomia: melhor pontuação dentro do SFMEA da operação devido à redução da interação homem-peça, ausência de posições não-ergonômicas do operador durante a atividade e ausência de contato direto do operador com gases e fumos gerados pelo processo. Além disso, para garantir a segurança do operador do robô, o sistema de segurança da célula de soldagem conta com barreira de luz e *scanner* (para garantir que ninguém esteja dentro da célula ao ser resetado e reiniciado), portas de segurança, botões de emergência e botão de habilitação para movimentação em modo manual.

2) Qualidade: processo automatizado gerou menos não-conformidades, levando a uma redução no custo com retrabalho interno de defeitos de solda. Tal indicador garante maior repetibilidade do processo, eliminando as variações de tamanho e direcionamento do arame. É importante ressaltar que, enquanto o processo manual é feito em 20 passes de solda, o processo automatizado é feito em 7 passes, o que reduz a chance de gerar não-conformidades de solda.

O robô também conta com recursos para seguimento de junta, assim toda a trajetória na junta da peça é orientada por meio de pontos contidos na mesma. O robô faz a correção da trajetória a partir da variação da corrente elétrica obtida durante o movimento de costura (*weave*). Ele permite compensar os desvios dimensionais e as distorções da peça durante o processo de soldagem. Isso ajuda a garantir a qualidade da solda, reduzindo/eliminando problemas como: falta de fusão, solda com pernas desiguais, sobreposição e mordedura.

Além disso, a ferramenta *search* do robô permite corrigir a variação das peças desde o primeiro ponto, antes de iniciar a soldagem. O arame é energizado e dirigido lentamente à junta afim de obter a diferença de posição (x, y, z) em relação à peça de referência e, conseqüentemente, atribuir essa diferença em todos os pontos dessa junta.

3) Produtividade: com a aquisição da célula de soldagem foi possível reduzir em 61,7% o tempo de ciclo de cada peça e, assim, aumentar a capacidade

produtiva do processo. Além disso, o robô permite movimentos livres mais rápidos e tempos reduzidos de parada para manutenção e de troca de peça.

4) Custo: apesar de o custo da célula de soldagem automatizada ser quase 10 vezes maior que o da célula manual (9,8 vezes maior), o uso do processo automatizado permite redução de mão-de-obra, redução do consumo de equipamentos de proteção individual, melhora o fluxo de produção com diminuição do tempo de ciclo e diminuição das paradas do processo. Além disso, essa aquisição elimina gastos extras com a capacitação de mão-de-obra, manutenção, *turnover*, a compra de máquinas de solda, lanças, tochas e posicionadores que seriam necessários para o aumento da capacidade produtiva por meio do processo manual.

5. CONCLUSÕES

A aplicação do método proposto, baseado no AHP COPRAS, para o processo estudado indicou que a opção de solda automatizada foi a mais adequada. Para essa avaliação/conclusão, foram definidos/utilizados critérios de Segurança e Ergonomia, Qualidade, Produtividade e Custo, de acordo com a orientação de engenheiros e especialistas do processo de solda. O método proposto para a seleção de tecnologia para o processo de soldagem se mostrou válido e os resultados são aplicáveis.

O resultado obtido foi consequência do destaque da alternativa de solda automatizada na maioria dos fatores avaliados, em especial nos fatores identificados como mais relevantes: Segurança e Ergonomia, e Qualidade. No primeiro fator, a alternativa mais bem avaliada obteve melhor pontuação no SFMEA da operação, pois proporcionou a redução da interação homem-peça, a eliminação de posições não-ergonômicas do operador durante a atividade e a eliminação de contato direto do operador com gases e fumos gerados pelo processo. No segundo fator, o processo automatizado reduziu a ocorrência de não-conformidades, levando a uma diminuição do custo com retrabalho interno de defeitos de solda.

Apesar de largamente difundida a ideia de que automatizar é sempre a melhor opção, é muito importante garantir que essa automatização proporcione robustez ao processo, e que as possíveis variações e distúrbios sejam controlados. Além disso, o alto custo de uma célula robotizada muitas vezes é significativo durante a tomada de decisão para uma pequena e média empresa. Sendo assim, apesar de a automatização melhorar questões de segurança, ergonomia e qualidade, o fator financeiro, em muitos casos, inviabiliza a implementação desse tipo de tecnologia.

Por fim, assim como o método AHP COPRAS foi aplicado na seleção do processo de soldagem para essa peça do estudo de caso, uma proposta de trabalho futuro seria aplicá-lo em outros casos/peças, considerando, evidentemente, as especificidades para a produção individuais de cada processo/peça, como requisitos de geometria e desenho, pontuação no SFMEA, custos de investimento e operacionais, bem como o atendimento às exigências de qualidade e tempo de processo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLEN, D. H. **Economic Evaluation of Projects: A Guide**. 3ª ed. Institution of Chemical Engineers: Rugby, 1991.
- ASCHILEAN, I., BADEA, G., GIURCA, I., NAGHIU, G.S., ILOAIE, F.G. **Choosing the optimal technology to rehabilitate the pipes in water distribution systems using the AHP method**. 2017. Energy Procedia, 112, 19-26.
- AVILES-VINAS, J. F., RIOS-CABRERA, R., LOPEZ-JUAREZ, I. **On-line learning of welding bead geometry in industrial robots**. 2016. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 83(1-4), 217-231.
- BASKORO, A. S., MASUDA, R., KABUTOMORI, M., SUGA, Y. **An application of genetic algorithm for edge detection of molten pool in fixed pipe welding**. 2009. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 45(11-12), 1104-1112.
- BAUCHSPIESS, A., ALFARO, S. C. A., DOBRZANSKI, L. A. **Predictive sensor guided robotic manipulators in automated welding cells**. 2001. Journal of Materials Processing Technology, 109(1-2), 13-19.
- BALASUBRAMANIAN, V., VARAHAMOORTHY, R., RAMACHANDRAN, C.S., MURALIDHARAN, C. **Selection of welding process for hardfacing on carbon steels based on quantitative and qualitative factors**. 2009. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 40, 887-897.
- BHUSHAN, N.; RAI, K. **Strategic Decision Making: Applying the Analytic Hierarchy Process**. 1. ed. Springer-Verlag: Londres, 2007.
- BOLMSJO, G.S. **Robotic Arc Welding**. 1988. IFAC Robot Control.
- BOLMSJO, G. S. **Programming Robot Systems for Arc-welding in Small Series Production**. 1989. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 5(2-3), 199-205.
- BOLOGA, O., BREAZ, R., RACZ, S. **Using the Analytic Hierarchy Process (AHP) and fuzzy logic to evaluate the possibility of introducing single point incremental forming on industrial scale**. 2018. Procedia Computer Science, 139, 408-416.
- BNDES. **BNDES Finame - financiamento de máquinas e equipamentos**. 2021. Disponível em <<https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/produto/bndes-finame-todos>>. Acessado em 10/02/2021.
- BUI, T. H., CHUNG, T. L., KIM, S. B., NGUYEN, T. T. **Adaptive tracking control of two-wheeled welding mobile robot with smooth curved welding path**. 2003. Ksme International Journal, 17(11), 1682-1692.

- CEDERBERG, P., OLSSON, M., BOLMSJO, G. **Virtual triangulation sensor development, behavior simulation and CAR integration applied to robotic arc-welding.** 2002. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 35(4), 365-379.
- CHAI, X., ZHANG, N., HE, L., LI, Q., YE, W. **"Kinematic Sensitivity Analysis and Dimensional Synthesis of a Redundantly Actuated Parallel Robot for Friction Stir Welding"**. Chinese Journal of Mechanical Engineering 33,1.
- CHANG, D., SON, D., LEE, J., LEE, D., KIM, T. W., LEE, K. Y. LEE, KIM, J. **A new seam-tracking algorithm through characteristic-point detection for a portable welding robot.** 2012. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 28(1), 1-13.
- CHEN, C. L., HU, S. S., HE, D. L., SHEN, J. Q. **An approach to the path planning of tube-sphere intersection welds with the robot dedicated to J-groove joints.** 2013. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 29(4), 41-48.
- CHEN, H. B., LV, F. L., LIN, T., CHEN, S. B. **Closed-Loop Control of Robotic Arc Welding System with Full-penetration Monitoring.** 2009. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 56(5), 565-578.
- CHEN, H. Y., LIU, K., XING, G. S., DONG, Y., SUN, H. X., LIN, W. **A robust visual servo control system for narrow seam double head welding robot.** 2014. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 71(9-12), 1849-1860.
- CHEN, L., WANG, Z., MO, Y., PAN, H. **"The Path Planning of Synchronous Cooperative Motion Control between Robot and Positioner for Complex Space Curve Processing."** Electronics 9, 1917
- CHEN, S. B., CHEN, X. Z., QIU, T., LI, J. Q. LI. **Acquisition of weld seam dimensional position information for arc welding robot based on vision computing.** 2005. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 43(1), 77-97.
- CHEN, S. B., ZHANG, Y., QIU, T., LIN, T. **Robotic welding systems with vision-sensing and self-learning neuron control of arc welding dynamic process.** 2003. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 36(2), 191-208.
- CHEN, S. J., HUANG, N., LIU, Y. K., ZHANG, Y. M. **Machine-assisted travel speed control in manual welding torch operation.** 2015. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 76(5-8), 1371-1381.
- CHEN, X. Z., CHEN, S. B., LIN, T., LEI, Y.C. **Practical method to locate the initial weld position using visual technology.** 2006. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 30(7-8), 663-668.
- CHEN, X. Z., YU, J. **Acquisition and optimization of weld trajectory and pose information for robot welding of spatial corrugated web sheet based on laser sensing.** 2018. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 96(9-12), 3033-3041.

- CHU, W. H., TUNG, P. C. **Development of an automatic arc welding system using SMAW process.** 2005. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 27(3-4), 281-287.
- CISZAK, O., JUSZKIEWICZ, J., SUSZYNSKI, M. **"Programming of Industrial Robots Using the Recognition of Geometric Signs in Flexible Welding Process."** *Symmetry* 12, 1429
- CORREIA, D.S., FERRARESI, V.A. **Welding process selection through a double criteria: Operational costs and non-quality costs.** 2007. *Journal of Materials Processing Technology*, 184, 47-55.
- DE GRAAF, M., AARTS, R., JONKER, B., MEIJER, J. **Real-time for robotic laser welding using trajectory-based control.** 2010. *Control Engineering Practice*, 18(8), 944-953.
- DING, Y. Y., HUANG, W., KOVACEVIC, R. **An on-line shape-matching weld system.** 2016. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 42, 103-112.
- DINHAM, M., FANG, G. **Autonomous weld seam identification and localization using eye-in-hand stereo vision for robotic arc welding.** 2013. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29(5), 288-301.
- DINHAM, M., FANG, G. **Detection of fillet weld joints using an adaptive line growing algorithm for robotic arc welding.** 2014. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 30(3), 229-243.
- DONG, H., CONG, M., ZHANG, Y.M., LIU, Y. K., CHEN, H. P. **Modeling and real-time prediction for complex welding process based on weld pool.** 2018. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96(5-8), 2495-2508.
- DU, J. H., DENG, J. X., HUANG, K. J., HUANG, J. S., LEI, X. **Seam tracking system based on rotating arc sensor for robot arc welding.** 2018. *Journal of Discrete Mathematical Sciences & Cryptography*, 21(6), 1407-1412.
- EBEL, L.C., ZUTHER, P., MAASS, J., SHEIKHI, S. **"Motion Signal Processing for a Remote Gas Metal Arc Welding Application"**. *Robotics* 9, 30
- EBERT-SPIEGEL, M., GOECKE, S. F., RETHMEIER, M. **Efficient gap filling in MAG welding using optical sensors.** 2014. *Welding in the World*, 58(5), 637-647.
- EBRAHIMPOUR, R., FESHARAKIFARD, R., REZAEI, S. M. **An adaptive approach to compensate error in robotic welding process by a moving fixture.** 2018. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15(6), 9.
- ERDEN, M. S., BILLARD, A. **Robotic Assistance by Impedance Compensation for Hand Movements While Manual Welding.** 2016. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 46(11), 2459-2472.
- ERDEN, M. S., MARIC, B. **Assisting manual welding with robot.** 2011. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(4), 818-828.

ERDEN, M. S., TOMIYAMA, T. **Identifying welding skills for training and assistance with robot.** 2009. Science and Technology of Welding and Joining, 14(6), 523-532.

FALKOWSKI, J. L., BROWNE, M. A. **VISION SENSING FOR ARC-WELDING ROBOTS - A NEW APPROACH.** 1983. Journal of Physics E-Scientific Instruments, 16(11), 1081-1085.

FAN, J. F., JING, F. S., FANG, Z. J., TAN, M. **Automatic recognition system of welding seam type based on SVM method.** 2017. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(1-4), 989-999.

FAN, J. F., JING, F. S., YANG, L., LONG, T., TAN, M. **A Precise Initial Weld Point Guiding Method of Micro-Gap Weld Based on Structured Light Vision Sensor.** 2019. IEEE Sensors Journal, 19(1), 322-331.

FRIDENFALK, M., BOLMSJO, G. **Design and validation of a universal 6D seam-tracking system in robotic welding using arc sensing.** 2004. Advanced Robotics, 18(1), 1-21.

GAO, W. X., TANG, Q., YAO, J., YANG, Y. R. **Automatic motion planning for complex welding problems by considering angular redundancy.** 2020. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 62, 16.

GAO, X. D., YOU, D. Y., KATAYAMA, S. **Infrared image recognition for monitoring during fiber laser welding.** 2012. Mechatronics, 22(4), 370-380.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Lei Nº 10.619, de 19 de Julho de 2000.** Introduz alterações na Lei nº 6.374, de 1º de março de 1989, que institui o Imposto sobre Operações Relativas à Circulação de Mercadorias e sobre Prestações de Serviços de Transporte Interestadual e Intermunicipal e de Comunicação - ICMS - e dá outras providências. São Paulo, 2000.

GU, W. P., XIONG, Z. Y., WAN, W. **Autonomous seam acquisition and tracking system for multi-pass welding based on vision sensor.** 2013. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 69(1-4), 451-460.

GUO, B., SHI, Y. H., YU, G. Q., LIANG, B., WANG, K. **Weld deviation detection based on wide dynamic range vision sensor in MAG welding process.** 2016. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(9-12), 3397-3410.

GURCAN, O.F., YAZICI, I., BEYCA, O.F., ARSLAN, C.Y., ELDEMIR, F. **Third Party Logistics (3PL) Provider Selection with AHP Application.** 2016. Procedia – Social and Behavioral Sciences, 235, 226-234.

GOMATHISANKAR, M., GANGATHARAN, M, PITCHIPOO, P. **A novel optimization of friction stir welding process parameters on Aluminum Alloy 6061-T6.** 2018. Materials today: Proceedings, 5 (6 (2)), 14397-14404.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **Executive Summary World Robotics 2017 Industrial Robots.** 2017. Disponível em <https://ifr.org/downloads/press/Executive_Summary_WR_2017_Industrial_Robots.pdf>. Acessado em 29/05/2019.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **Executive Summary World Robotics 2018 Industrial Robots.** 2018. Disponível em <https://ifr.org/downloads/press2018/Executive_Summary_WR_2018_Industrial_Robots.pdf>. Acessado em 30/10/2019.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **Executive Summary World Robotics 2019 Industrial Robots.** 2019. Disponível em <<https://ifr.org/downloads/press2018/Executive%20Summary%20WR%202019%20Industrial%20Robots.pdf>>. Acessado em 27/09/2019.

INTERNATIONAL FEDERATION OF ROBOTICS. **Executive Summary World Robotics 2020 Industrial Robots.** 2020. Disponível em <https://ifr.org/downloads/press2018/Presentation_WR_2020.pdf>. Acessado em 11/06/2021.

JIANG, C., ZHANG, F. B., WANG, Z. M. **Image Processing of Aluminum Alloy Weld Pool for Robotic VPPAW Based on Visual Sensing.** 2017. IEEE Access, 5, 21567-21573.

JIN, Z. S., LI, H. C., ZHANG, C. H., WANG, Q. Y., GAO, H. M. **Online welding path detection in automatic tube-to-tube sheet welding using passive vision.** 2017. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 90(9-12), 3075-3084.

KIDDEE, P., FANG, Z. J., TAN, M. **An automated weld system for thick plate using cross mark structured light.** 2016. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 87(9-12), 3589-3603.

KIM, D. W., CHOI, J. S., NNAJI, B. O. **Robot arc welding operations planning with a rotating/tilting positioner.** 1998. International Journal of Production Research, 36(4), 957-979.

KIM, J. W., BAE, H. S. **A study on a vision sensor system for tracking the I-butt weld joints.** 2005. Journal of Mechanical Science and Technology, 19(10), 1856-1863.

KIM, P., RHEE, S., LEE, C. H. **Automatic teaching of welding robot for free-formed seam using laser vision sensor.** 1999. Optics and Lasers in Engineering, 31(3), 173-182.

KIM, T., SUTO, T., KOBAYASHI, J., KIM, J., SUGA, Y. **Automatic welding system using speed controllable autonomous mobile robot.** 2006. Jsme International Journal Series a-Solid Mechanics and Material Engineering, 49(1), 53-57.

KINDERMANN, R. M., SILVA, R., DUTRA, J. C. **Development and Validation of Algorithms Employed for Sensor Systems in Robotic Orbital Root Pass Welding of Pipelines.** 2015. Soldagem & Inspeção, 20(4), 391-402.

KOS, M., ARKO, E., KOSLER, H., JEZERSEK, M. **"Remote laser welding with in-line adaptive 3D."** 2019. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 103(9-12), 4577-4586.

- LEE, K., HWANG, I., KIM, Y., LEE, H., KANG, M., YU, J. **"Real-Time Weld Quality Prediction Using a Laser Vision Sensor in a Lap Fillet Joint during Gas Metal Arc Welding"**. *Sensors* 20, 1625.
- LEE, S., PARK, J. **Hand-eye LRF-based Iterative Plane Detection Method for Autonomous Robotic Welding**. 2015. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 12, 14.
- LEE, S. K., CHANG, W. S., YOO, W. S., NA, S. J. **A study on a vision sensor-based laser welding system for bellows**. 2000. *Journal of Manufacturing Systems*, 19(4), 249-255.
- LEGOFF, O., HASCOET, J. Y. **From CAD to computer aided welding**. 1998. *International Journal of Production Research*, 36(2), 417-436.
- LEI, T., HUANG, Y., SHAO, W. J., LIU, W. N., RONG, Y. M. **A tactual weld method in super narrow gap of thick plates**. 2020. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 62, 9.
- LI, G., HONG, Y., GAO, J., HONG, B., LI, X. **"Welding Seam Trajectory Recognition for Automated Skip Welding Guidance of a Spatially Intermittent Welding Seam Based on Laser Vision Sensor"**. *Sensors* 20, 3657.
- LIU, F. Q., WANG, Z. Y., JI, Y. **Precise initial weld position identification of a fillet weld seam using laser vision technology**. 2018. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 99(5-8), 2059-2068.
- LIU, J., HU, Y. M., WU, B., ZHOU, K. B., GE, M. F. **An adaptive sliding mode control technology for weld**. 2015. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 10(1), 95-101.
- LIU, Y., LIU, Y., TIAN, X. C. **Trajectory and velocity planning of the robot for sphere-pipe intersection hole cutting with single-Y welding groove**. 2019. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 56, 244-253.
- LIU, Y., TIAN, X. C. **Robot path planning with two-axis positioner for non-ideal sphere-pipe joint welding based on laser scanning**. 2019. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 105(1-4), 1295-1310.
- LIU, Y. K. **"Toward intelligent welding robots: virtualized welding-based learning of human welder behaviors"**. 2016. *Welding in the World*, 60(4), 719-729.
- LIU, Y. K., ZHANG, W. J., ZHANG, Y. M. **Dynamic Neuro-Fuzzy-Based Human Intelligence Modeling and Control in GTAW**. 2015. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(1), 324-335.
- LIU, Y. K., ZHANG, Y. M. **Toward Welding Robot with Human Knowledge: A Remotely-Controlled Approach**. 2015. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 12(2), 769-774.
- LIU, Y. K., ZHANG, Y. M. **Supervised Learning of Human Welder Behaviors for Intelligent Robotic Welding**. 2017. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 14(3), 1532-1541.

- LIU, Y. K., ZHANG, Y. M. **Fusing machine algorithm with welder intelligence for adaptive welding robots.** 2017. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, 18-25.
- LIU, Z. Y., BU, W. H., TAN, J. R. **Motion navigation for arc welding robots based on feature mapping in a simulation environment.** 2010. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 26(2), 137-144.
- LU, X. Q., ZHANG, K., WU, Y. X. **The seam position detection and tracking for the mobile welding robot.** 2017. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 88(5-8), 2201-2210.
- MA, H. B., WEI, S. C., SHENG, Z. X., LIN, T., CHEN, S. B. **Robot welding method based on passive vision for thin plate closed-gap butt welding.** 2010. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 48(9-12), 945-953.
- MARQUES, P.V., MODENESI, J.P., BRACARENSE, A.Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia.** 3ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009.
- MIGUEL, P.A.C. **Estudo de caso na engenharia de produção: estruturação e recomendações para sua condução.** 2007. *Produção*, 17 (1), 216-229.
- MILLER, M., MI, B. KITA, A. KITA, UME I. C. **Development of automated real-time data acquisition system for robotic weld quality monitoring.** 2002. *Mechatronics*, 12(9-10), 1259-1269.
- MURAKAMI, S., TAKEMOTO, F., FUJIMURA, H., IDE, E. **WELD-LINE TRACKING CONTROL OF ARC-WELDING ROBOT USING FUZZY-LOGIC CONTROLLER.** 1989. *Fuzzy Sets and Systems*, 32(2), 221-237.
- NAGAO, Y., URABE, H., HONDA, F., KAWABATA, J. I., KAWAMURA, T., MIYAMOTO, N. **Development of a teachingless robot system for welding a large-sized box-type construction.** 2001. *Advanced Robotics*, 15(3), 287-291.
- NELE, L., SARNO, E., KESHARI, A. **An image acquisition system for real-time.** 2013. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 69(9-12), 2099-2110.
- NI, D., YEW, A. W. W., ONG, S. K., NEE, A. Y. C. **Haptic and visual augmented reality interface for programming welding robots.** 2017. *Advances in Manufacturing*, 5(3), 191-198.
- NILSEN, M., SIKSTROM, F., CHRISTIANSSON, A. K., ANCOVA, A. **Robust vision-based joint tracking for laser welding of curved closed-square-butt joints.** 2019. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 101(5-8), 1967-1978.
- ONG, S. K., NEE, A. Y. C., YEW, A. W. W., THANIGAIVEL, N. K. **AR-assisted robot welding programming.** *Advances in Manufacturing*, 9.
- PACHIDIS, T. P., LYGOURAS, J. N. **Vision-based path generation method for a robot-based arc welding system.** 2007. *Journal of Intelligent & Robotic Systems*, 48(3), 307-331.

PACHIDIS, T. P., TARCHANIDIS, K. N., LYGOURAS, J. N. TSALIDES, P. G. **Robot path generation method for a welding system based on pseudo stereo visual servo control.** 2005. Eurasip Journal on Applied Signal Processing, 2005(14), 2268-2280.

PETIOT, J. F., CHEDMAIL, P., HASCOET, J. Y. **Contribution to the scheduling of trajectories in robotics.** 1998, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 14(3), 237-251.

PINTO, G.F.L., SILVA, F.J.G., CAMPILHO, R.D.S.G., CASAIS, R.B., FERNANDES, A.J., BAPTISTA, A. **Continuous improvement in maintenance: a case study in the automotive industry involving Lean tools.** 2019. Procedia Manufacturing, 38, 1582-1591.

PITCHIPOO, P., VINCENT, D.S., RAJINI, N., RAJAKARUNAKARAN, S. **COPRAS Decision Model to Optimize Blind Spot in Heavy Vehicles: A Comparative Perspective.** 2014. Procedia Engineering, 97, 1049-1059.

POLAT, G, BINGOL, B.N., VAR, O. **An Integrated Multi-Criteria-Decision-Making Tool for Mechanical Designer Selection.** 2017, Procedia Engineering, 196, p278-285.

QIN, J.; LIU, Y.; GROSVENOR, R. **A Categorical Framework of Manufacturing for Industry 4.0 and Beyond, Changeable, Agile, Reconfigurable & Virtual Production.** 2016, Procedia CIRP, 52, p173-178.

RAJANI, P., JAWAHARBABU, A. **Implementation of Analytic Hierarchy Process (AHP) as a decision support tool for selection of robot for spot welding operation.** 2016. IJRET International Journal of Research in Engineering and Technology, 5, 7-12.

RAO, S. H., KALAICHELVI, V., KARTHIKEYAN, R. **Tracing a Weld Line using Artificial Neural Networks.** 2018. International Journal of Networked and Distributed Computing, 6(4), 216-223.

RAO, V. R. **Decision Making in the Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods.** Volume 2. Surat, Gujarat - India: Editora Springer, 2013.

RAVISANKAR, V., BALASUBRAMANIAN, V, MURALIDHARAN, C. **Selection of welding process to fabricate butt joints of high strength aluminium alloys using analytic hierarchic process.** 2006. Materials and Design, 27, 373-380.

REINHART, G., MUNZERT, U., VOGL, W. **A programming system for robot-based remote-laser-welding with conventional optics.** 2008. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 57(1), 37-40.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Decreto-Lei Nº 1.598, de 26 de Dezembro de 1977.** Altera a legislação do imposto sobre a renda. Brasília, 1977.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Lei Nº 7.689, de 15 de Dezembro de 1988.** Institui contribuição social sobre o lucro das pessoas jurídicas e dá outras providências. Brasília, 1988.

REPÚBLICA FEDERATIVA DO BRASIL. **Lei Nº 10.833, de 29 de Dezembro de 2003**. Altera a Legislação Tributária Federal e dá outras providências. Brasília, 2003.

RIBEIRO, F., OGUNBIYI, B., NORRISH, J. **Mathematical model of welding parameters for rapid prototyping using robot welding**. 1997. Science and Technology of Welding and Joining, 2(5), 185-190.

ROTONDARO, R.G. **SFMEA: análise do efeito e modo de falha em serviços – aplicando técnicas de prevenção na melhoria de serviços**. 2002. Production, 12(2).

RYU, L. H., KIM, T. W., OH, M. J., KU, N. K., LEE, K. Y. **Workspace analysis to generate a collision-free torch path for a ship welding robot**. 2009. Journal of Marine Science and Technology, 14(3), 345-358.

SAATY, T. L. **The Analytic Hierarchy Process**. 1980. Nova York, EUA: McGraw-Hill

SAATY, T.L. **The analytic Hierarchy Process – What it is and how it is used**. 1987. Mathl Modelong, 9(3-5), 161-176.

SANCHEZ-DIAZ, A., ZALDIVAR-COLADO, U., PAMANES-GARCIA, J. A., ZALDIVAR-COLADO, X. **Operation of a haptic interface for offline programming of welding robots by applying a spring-damper model**. 2019. International Journal of Computer Integrated Manufacturing, 32(11), 1098-1116.

SEN, B.; BHATTACHARJEE, P.; MANDAL, U.K. **A comparative study of some prominent multi criteria decision making methods for connecting rod material selection**. 2016. Perspectives in Science, 8, 547-549.

SHAH, H. N. M., SULAIMAN, M., SHUKOR, A. Z. **Autonomous detection and identification of weld seam path shape position**. 2017. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 92(9-12), 3739-3747.

SHAH, H. N. M., SULAIMAN, M., SHUKOR, A. Z., KAMIS, Z. **Recognition and identification the position and location of tooth saw butt joint shape**. 2018. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 98(9-12), 2497-2504.

SHAH, H. N. M., SULAIMAN, M., SHUKOR, A. Z., KAMIS, Z. **An experiment of detection and localization in tooth saw shape for butt joint using KUKA welding robot**. 2018. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 97(5-8), 3153-3162.

SHAO, W. J., HUANG, Y., ZHANG, Y. **A novel weld seam detection method for space weld seam of narrow butt joint in laser welding**. 2018. Optics and Laser Technology, 99, 39-51.

SHEN, H. Y., HUANG, X. X., LIN, T., CHEN, B. **Weld formation control for arc welding robot**. 2009. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 44(5-6), 512-519.

SHEN, H. Y., LIN, T., CHEN, S. B., LI, L. P. **Real-Time Technology of Welding Robot with Visual Sensing**. 2010. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 59(3-4), 283-298.

- SHEN, H. Y., WU, J., LIN, T., CHEN, S. B. **Arc welding robot system with and weld pool control based on passive vision**. 2008. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 39(7-8), 669-678.
- SHI, L., TIAN, X. C., ZHANG, C. H. **Automatic programming for industrial robot to weld intersecting pipes**. 2015. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81(9-12), 2099-2107.
- SILVA, G. V., SILVA, G. C. **Virtual Prototyping of an Automotive Manufacturing Cyber-Physical System based on Artificial Neural Network**. 2018. Journal of Production and Automation (JPAUT), 1, 41-58.
- SULLIVAN, E. C., RAJARAM, N. S. **A KNOWLEDGE-BASED APPROACH TO PROGRAMMING WELDING ROBOTS**. 1992. Isa Transactions, 31(2), 115-133.
- TAVARES, P., COSTA, C. M., ROCHA, L., MALACA, P., COSTA, P., MOREIRA, A. P., SOUSA, A., VEIGA, G. **Collaborative Welding System using BIM for Robotic Reprogramming and Spatial Augmented Reality**. 2019. Automation in Construction, 106, 12.
- TANNOUS, M., BOLOGNA, F., STEFANINI, C. **Load cell torques and force data collection during tele-operated robotic gas tungsten arc welding in presence of collisions**. 2010. Data in Brief, v. 31, p. 105981.
- THONGCHUEA, N., WARINSIRIRUK, E., WANG, Y. **"Laser Welding on Cerclage Wire Joining in Femur Surgery"**. Applied Sciences 10, 2407.
- TSAI, M. J., LEE, H. W., ANN, N. J. **Machine vision-based path planning for a robotic golf club head welding system**. 2011. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27(4), 843-849.
- VAIDYA, S.; AMBAD, P.; BHOSLE, S. **Industry 4.0 – A Glimpse**. 2018. Procedia Manufacturing, 20, 233-238.
- WANG, Q. Y., CHENG, Y. C., JIAO, W. H., JOHNSON, M. T., ZHANG, Y. M. **Virtual reality human-robot collaborative welding: A case study of weaving gas tungsten arc welding**. 2019. Journal of Manufacturing Processes, 48, 210-217.
- WANG, Q. Y., JIAO, W. H., YU, R., JOHNSON, M. T., ZHANG, M. **Modeling of Human Welders' Operations in Virtual Reality Human-Robot Interaction**. 2019. IEEE Robotics and Automation Letters, 4(3), 2958-2964.
- WANG, X. W., MIN, Y., GU, X. S. **Multi-objective path optimization for arc welding robot based on discrete DN multi-objective particle swarm optimization**. 2019. International Journal of Advanced Robotic Systems, 16(6), 10.
- WANG, X. W., SHI, Y. P., DING, D. Y., GU, X. S. **Double global optimum genetic algorithm-particle swarm optimization-based welding robot path planning**. 2016. Engineering Optimization, 48(2), 299-316.

- WANG, X. W., SHI, Y. P., YAN, Y. X., GU, X. S. **Intelligent welding robot path optimization based on discrete elite PSO**. 2017. *Soft Computing*, 21(20), 5869-5881.
- WANG, X. W., XUE, L. K., YAN, Y. X., GU, X. S. **Welding Robot Collision-Free Path Optimization**. 2017. *Applied Sciences-Basel*, 7(2), 11.
- WANG, Z. G., ZHANG, K., CHEN, Y. X., LUO, Z. F., ZHENG, J. **A real-time weld line detection for derusting wall-climbing robot using dual cameras**. 2017. *Journal of Manufacturing Processes*, 27, 76-86.
- WU, C. S., LIU, D. J., WU, L. **AN AUTO-PROGRAMMING SYSTEM OF MAG WELDING PARAMETERS FOR VISION-BASED ROBOT**. 1994. *Robotics and Autonomous Systems*, 13(4), 291-296.
- WU, C. Y., TUNG, P. C. **Application of genetic algorithm to external noise cancellation and compensation in automatic arc welding system**. 2008. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 19(3), 249-256.
- XU, P. Q., TANG, X. H., LU, F. G., YAO, S. **An active vision sensing method for welded seams location using "circle-depth relation" algorithm**. 2007. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 32(9-10), 918-926.
- XU, P. Q., TANG, X. H., LU, F. Q., YAO, S. **Welded seam 3D calculation and seam location for welding robot system**. 2006. *Science and Technology of Welding and Joining*, 11(3), 352-357.
- XU, P. Q., XU, G. X., TANG, X. H., YAO, S. **A visual system for robotic arc welding**. *International Journal of 2008. Advanced Manufacturing Technology*, 37(1-2), 70-75.
- XU, Y. L., FANG, G., LV, N., CHEN, S. B., ZOU J. J. **Computer vision technology for robotic GTAW and GMAW**. 2015. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 32, 25-36.
- XU, Y. L., LV, N., FANG, G., DU, S. F., ZHAO, W. J., YE, Z., CHEN, S. B. **Welding in robotic gas metal arc welding**. 2017. *Journal of Materials Processing Technology*, 248, 18-30.
- XU, Y. L., YU, H. W., ZHONG, J. Y., LIN, T., CHEN, S. B. **Real-time control technology during welding robot GTAW process based on passive vision sensor**. 2012. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(8), 1654-1662.
- XUE, B., CHANG, B. H., PENG, G. D., GAO, Y. J., TIAN, Z. J., DU, D., WANG, G. Q. **A Vision Based Detection Method for Narrow Butt Joints and a Robotic System**. 2019. *Sensors*, 19(5), 18.
- YANG, L., LI, E., FAN, J. F., LONG, T., ZIANG, Z. Z. **Automatic extraction and identification of narrow butt joint based on ANFIS before GMAW**. 2019. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(1-4), 609-622.
- YANG, L., LI, E., LONG, T., FAN, J. F., LIANG, Z. Z. **A High-Speed Seam Extraction Method Based on the Novel Structured-Light Sensor for Arc Welding Robot: A Review**. 2018. *IEEE Sensors Journal*, 18(21), 8631-8641.

- YANG, L., LI, E., LONG, T., FAN, J. F., LIANG, Z. Z. **A Novel 3-D Path Extraction Method for Arc Welding Robot Based on Stereo Structured Light Sensor.** 2019. IEEE Sensors Journal, 19(2), 763-773.
- YANG, L., LI, E., LONG, T., FAN, J. F., MAO, Y. J., FANG, Z. J., LIANG, Z. Z. **A welding quality detection method for arc welding robot based on 3D reconstruction with SFS algorithm.** 2018. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 94(1-4), 1209-1220.
- YE, G. L., GUO, J. W., SUN, Z. Z., LI, C., ZHO, S. Y. **Weld bead recognition using laser vision with model-based classification.** 2018. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 52, 9-16.
- YE, Z., FANG, G., CHEN, S. B., ZOU, J. J. **Passive vision-based system for pulse-MAG welding.** 2013. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 67(9-12), 1987-1996.
- ZENG, J., CAO, G., PENG, Y., HUANG, SU. **"A Weld Joint Type Identification Method for Visual Sensor Based on Image Features and SVM."** Sensors 20, 471.
- ZENG, J. L., CHANG, B. H., DU, D., HONG, Y. X., CHANG, S. H., ZOU, Y. R. **A Precise Visual Method for Narrow Butt Detection in Specular Reflection Workpiece Welding.** 2016. Sensors, 16(9), 25.
- ZENG, J. L., CHANG, B. H., DU, D., WANG, L., CHANG, S. H., PENG, G. D., WANG, W. Z. **A Weld Position Recognition Method Based on Directional and Structured Light Information Fusion in Multi-Layer/Multi-Pass Welding.** 2018. Sensors, 18(1), 19.
- ZHOU, L., LIN, T., CHEN, S. B. **Autonomous acquisition of seam coordinates for arc welding robot based on visual servoing.** 2006. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 47(3), 239-255.
- ZHU, W. L., NI, F. S., HONG, C. G. **An Algorithm for the Welding Torch Weaving Control of Arc Welding Robot.** 2015. Elektronika Ir Elektrotechnika, 21(2), 3-9.
- ZHU, Z. Y., LIN, T., PIAO, Y. J., CHEN, S. B. **Recognition of the initial position of weld based on the image pattern match technology for welding robot.** 2005. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 26(7-8), 784-788.
- ZAVADSKAS, E.K., TURKIS, Z., TAMOSAITIENE, J., MARINA, V. **Selection of construction project managers by applying COPRAS-G method.** 2008. Computer Modelling and New Technologies, 12(3), 22-28.
- ZOLFANI, S.H., POURHOSSEIN, M., YAZDANI, M., ZAVADSKAS, E.K. **Evaluating construction projects of hotels based on environmental sustainability with MCDM framework.** 2018. Alexandria Engineering Journal, 57, 357-365.