

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ENOCH VIEIRA SANCHES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DOS PRÓS E CONTRAS DA SUBSTITUIÇÃO DA
SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICA PELA SOLDAGEM ROBÓTICA
MIG/MAG EM TERMOS DE CUSTO DA OPERAÇÃO**

**UBERLÂNDIA
2025**

ENOCH VIEIRA SANCHES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DOS PRÓS E CONTRAS DA SUBSTITUIÇÃO DA
SOLDAGEM SEMIAUTOMÁTICA PELA SOLDAGEM ROBÓTICA
MIG/MAG EM TERMOS DE CUSTO DA OPERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Orientador:
Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov

Uberlândia
2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

S211 Sanches Júnior, Enoch Vieira, 2001-
2025 Avaliação dos Prós e Contras da Substituição da
Soldagem Semiautomática pela Soldagem Robótica MIG/MAG
em Termos de Custo da Operação [recurso eletrônico] /
Enoch Vieira Sanches Júnior. - 2025.

Orientador: Volodymyr Ponomarov.
Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Uberlândia, Graduação em
Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Ponomarov, Volodymyr, 1955-
, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia.
Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

ENOCH VIEIRA SANCHES JÚNIOR

**AVALIAÇÃO DOS PRÓS E CONTRAS DA SUBSTITUIÇÃO DA SOLDAGEM
SEMAUTOMÁTICA PELA SOLDAGEM ROBÓTICA MIG/MAG EM TERMOS
DE CUSTO DA OPERAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito
parcial para obtenção do título de Bacharel
em Engenharia Mecânica.

Uberlândia, 2025

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Volodymyr Ponomarov,
FEMEC/UFU (Orientador);

Prof.^a Dra. Anna Tokar,
Universidade Federal da Grande Dourados;

Dr. Edmundo Benedetti Filho,
Laprosolda, FEMEC/UFU

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela misericórdia em me conceder vida, saúde e força; a Ele toda honra e glória.

Aos meus pais, pelo cuidado, carinho e por investirem em minha educação com o suor de seus rostos e ao meu irmão, pelos momentos de descontração.

À minha noiva, por ter confiado em mim nos momentos mais difíceis e pela companhia indispensável.

Ao meu estimado professor orientador, Volodymir Ponomarov, pelos conhecimentos compartilhados e pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

Ao Laprosolda, pela oportunidade de desenvolvimento pessoal e apoio técnico.

Ao Lamau, pela oportunidade de aprendizado em gestão e na área técnica.

Aos meus amigos, Lucas Humberto e Luis Eduardo, pelo apoio em muitos momentos, e aos demais amigos e apoiadores distantes.

Aos meus colegas de graduação, que me ajudaram a atravessar essa etapa importante em minha vida acadêmica.

À Universidade Federal de Uberlândia, pelos programas de auxílio que me permitiram cursar o ensino superior.

RESUMO

O processo de soldagem é um dos principais processos de fabricação mecânica, apresenta diferentes métodos de aplicação e muitas peculiaridades em relação à sua história e classificação. Dentre os processos de soldagem, destaca-se o processo MIG/MAG, criado em 1948 e que rapidamente se disseminou como um dos processos mais utilizados na atualidade. Esse processo, combinado com as tecnologias implementadas a partir da década de 60, os chamados robôs, pode apresentar vantagens em relação à sua forma de aplicação manual, cuja característica principal, o soldador, é substituído pelo robô. Portanto, através da análise de estudos acadêmicos, com ênfase em estudos de caso realizados em empresas em mais de um continente, realizou-se a avaliação dos prós e contras da substituição da soldagem semiautomática pela soldagem robótica em termos de custo da operação. Os custos são avaliados em termos físicos, de tempo e humanos, e são, quando explicitados, ressaltados como indicadores para tomadas de decisão. Após a avaliação de onze pesquisas, foi conclusivo que a maior vantagem da implementação do método de aplicação robotizado é o aumento da produção e a maior desvantagem, o alto custo de investimento.

Palavras-chave: Soldagem, MIG/MAG, Custos, Robótica, Prós, Contras

ABSTRACT

Welding is one of the most important mechanical manufacturing processes, with various application methods and unique characteristics in terms of its history and classification. Among welding processes, MIG/MAG stands out—developed in 1948 and quickly becoming one of the most widely used methods today. When combined with robotic technologies introduced in the 1960s, this process offers advantages over manual welding, where the welder is replaced by a robot. Through an analysis of academic studies, particularly case studies conducted across multiple continents, this work evaluates the pros and cons of replacing semi-automatic welding with robotic welding in terms of operational costs. Costs are assessed in physical, time, and human terms, and when quantified, they serve as key decision-making indicators. After reviewing eleven studies, the findings indicate that the primary advantage of robotic welding is increased production, while the main drawback is the high initial investment cost.

Keywords: Welding, MIG/MAG, Costs, Robotics, Pros, Cons

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Tempo Total de Operação	15
Figura 2 – Linha do Tempo da Soldagem	18
Figura 3 – Robô Unimate e Joseph Engelberger (Esquerda)	21
Figura 4 – Linha do Tempo da Robótica	21
Figura 5 – Classificação dos Processos a Arco	22
Figura 6 – Processo MIG/MAG	23
Figura 7 – Chassis de Trem	29
Figura 8 – Peça JR Teste 3	32
Figura 9 – Análise dos Tempos dos Movimentos (Em Segundos) - Peça Cilíndrica	33
Figura 10 – Anel de Elevação	34
Figura 11 – Análise dos Tempos dos Movimentos (Em Segundos) - Anel de Elevação	35
Figura 12 – Gráfico de Custos - Anel de Elevação	35
Figura 13 – Peça Jr Teste 2	36
Figura 14 – Análise dos Tempos (Em Segundos) dos Movimentos - Montagem para Içamento	37
Figura 15 – Equipamento para Manutenção de Estrada	38
Figura 16 – Layout da Célula Robótica	39
Figura 17 – Assento Dianteiro	41
Figura 18 – Soldador e Montador na Aplicação Manual	42
Figura 19 – Suporte do Capô	44
Figura 20 – Mesa e o Robô de Solda Simulados	50
Figura 21 – Comparação dos Custos Totais	55
Figura 22 – Cordões de Solda no Tanque	59
Figura 23 – Comparação do Percentual de Defeitos	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação dos Métodos de Aplicação dos Processos de Soldagem	13
Tabela 2 – Classificação dos Métodos de Aplicação dos Processos de Soldagem	13
Tabela 3 – Tempo Total de Produção Aplicação Manual x Robotizada (Traduzida)	30
Tabela 4 – Projeção Financeira em Cinco Anos (Traduzida)	30
Tabela 5 – Payback do Processo	43
Tabela 6 – Tempo de Produção para Aplicação Manual	45
Tabela 7 – Tempo de Produção para Aplicação Robotizada	45
Tabela 8 – Análise Comparativa dos Custos para uma Mesma Quantidade de Pe- ças (Traduzida)	48
Tabela 9 – Análise Comparativa dos Custos para Maior Quantidade Anual de Pe- ças (Traduzida)	49
Tabela 10 – Tempo de Produção Final	51
Tabela 11 – Custos de Produção Final	51
Tabela 12 – Estrutura de Custos de Ciclo de Vida (LCC) para Dois Modos de Fa- bricação (Adaptada e Traduzida)	53
Tabela 13 – Análise Comparativa da Produção Robotizada e Tradicional (Traduzida) .	54
Tabela 14 – Síntese dos Prós e Contras dos Estudos Analisados	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AWS	American Welding Society
CAD	Computer Aided Design
CC	Corrente Contínua
CNY	Yuan Chinês
CO_2	Dióxido de Carbono
CR	Total Cost of Robotic Production
CRD	Disposal Cost
CRI	Investment Cost
CRO	Operation Cost
CRM	Maintenance Cost
COR	Intangible Cost
COT	Intangible Cost
CT	Total Cost of Traditional Production
CTC	Compensation Cost
CTM	Management Cost
CTW	Welfare Cost
CTO	Operation Cost
DBCP	Distância Bico de Contato Peça
EPI	Equipamento de Proteção Individual
ER	Eletrodo Revestido
EUA	Estados Unidos da América
FCAW	Flux Cored Arc Welding
GM	General Motors
GMAW	Gas Metal Arc Welding

GTAW	Gas Tungsten Arc Welding
IRR	Internal Rate of Return
ISO	International Organization for Standardization
LCC	Life Cycle Cost
MAG	Metal Active Gas
MIG	Metal Inert Gas
MOST	Maynard Operation Sequence Technique
MTM	Methods-Time Measurement
NPV	Net Present Value
O_2	Oxigênio
PLN	Złoty Polaco
QR	Output of the Industrial Robot Production
QR	Output of the Traditional Production
ROI	Return of Investment
rl	Idle Loss Rate
rE	Efficiency Loss Rate
rU	Unqualified Product Rate
rV	Added Value Rate
SAW	Submerged Arc Welding
SME	Small and Medium Enterprises
TIG	Tungsten Inert Gas
TMU	Time Measurement Unit
WFS	Wire Feed Speed

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
2.1	Linha do tempo da soldagem	17
2.2	Linha do tempo da robótica	19
2.3	Processo de soldagem MIG/MAG (GMAW)	22
2.4	Métodos de Aplicação de Soldagem	24
3	METODOLOGIA	28
4	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	29
4.1	Dissertação: Otimização e Simulação do Processo de Fabricação de Chassis de Trem por Soldagem (CAMPAÑA, 2024)	29
4.2	Dissertação: Estudo Comparativo da Soldagem Robótica e Manual em um Ambiente de Fabricação de Baixo Volume e Alta Variedade: Estudo de Caso do JR Teste 3 (SRINIVASAMURTHY, 2024)	31
4.3	Dissertação: Estudo Comparativo da Soldagem Robótica e Manual em um Ambiente de Fabricação de Baixo Volume e Alta Variedade: Estudo de Caso do Anel de Elevação (POTHAMSETTI, 2024)	34
4.4	Dissertação: Estudo Comparativo da Soldagem Robótica e Manual em um Ambiente de Fabricação de Baixo Volume e Alta Variedade: Estudo de Caso do JR Teste 2 (MYSORE, 2024)	36
4.5	Dissertação: Análise de um Sistema de Soldagem Robótica e Conceitos Possíveis de Melhoria para uma Pequena e Média Empresa (SME) Norueguesa (KONIG, 2019)	38
4.6	Monografia: Otimização do Processo de Soldagem de Estruturas de Assentos Veiculares (DUMONT, 2016)	41
4.7	Monografia: Implantação de Processo de Soldagem Robotizado em um Conjunto de Peças (WIDZ, 2018)	44
4.8	Artigo: Comparação dos Custos e Eficiência da Soldagem MAG Manual e Robotizada em Termos de Qualidade e Fatores Sociais (RESTECKA; WOLNIAK, 2018)	47
4.9	Artigo: Dispositivo Padrão de Fixação para Soldagem Robótica – Produção de Mesa de Ar para Máquinas de Trabalhar Madeira (SCHLICK-MANN; ALBERTON; RIBEIRO, 2019)	50

4.10	Artigo: Análise Comparativa do Custo do Ciclo de Vida da Substituição por Robô: Um Caso de Produção de Soldagem Automotiva na China (ZHAO; WU; LIU, 2021)	52
4.11	Artigo: Automação do Processo de Soldagem Manual Semiautomático GMAW Visando Melhoria da Qualidade do Produto (SOARES; NASCIMENTO; TEIXEIRA, 2016)	58
4.12	Síntese dos Prós e Contras	60
5	CONCLUSÃO	63
	REFERÊNCIAS	64

1 INTRODUÇÃO

A soldagem é um dos principais processos de fabricação mecânica, indispensável aos diversos produtos que estão presentes na sociedade mundial e brasileira. Conforme o método de aplicação, os processos de soldagem podem apresentar modo de operação manual, semiautomático, mecanizado, automático e robotizado, mostrados na Tabela 1 conforme a norma (AWS, 2010).

Tabela 1 – Classificação dos Métodos de Aplicação dos Processos de Soldagem

Método	Definição
Manual	Uma operação em que a tocha, pistola ou suporte de eletrodo é segurado e manipulado manualmente. Equipamentos acessórios, como dispositivos de movimentação de peças e alimentadores manuais de material de adição, podem ser utilizados.
Semiautomático	Uma operação realizada manualmente com equipamento que controla uma ou mais condições do processo.
Mecanizado	Uma operação com equipamento que requer ajuste manual por um operador em resposta à observação visual, com a tocha, pistola, conjunto guia de arame ou suporte de eletrodo segurado por um dispositivo mecânico.
Automático	Uma operação realizada com equipamento que requer observação ocasional ou nenhuma, e nenhum ajuste manual durante sua operação.
Robotizado	Uma operação com equipamento que se movimenta ao longo de um caminho controlado, utilizando parâmetros controlados, sem intervenção manual após o início do ciclo.

Fonte: Norma AWS A3.0:2010

Uma outra classificação dos modos de aplicação é apresentada na Tabela 2 abaixo:

Tabela 2 – Classificação dos Métodos de Aplicação dos Processos de Soldagem

Atividades	Método de Aplicação				
	Manual	Semi-mecanizado	Mecanizado	Automatizado	
				Fixo (sem robô)	Flexível (com robô)
Deslocamento da tocha porta-eletrodo	manual	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico
Velocidade de soldagem	manual	manual ou gravidade	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico
Programação do ciclo de soldagem	não há	não há	não há	mecânico e/ou eletrônico	mecânico e/ou eletrônico

Fonte: Felizardo; Bracarense (2006)

Ambas as classificações não são totalmente claras e geram questionamentos. Algumas perguntas que surgem em relação à norma AWS A3.0:2010 são: Um processo de soldagem TIG com pedal para o controle do metal de adição pode ser considerado um processo aplicado de forma manual ou semiautomática? Caso um processo seja realizado sem necessariamente um robô mas com equipamento controlado esse processo é automático ou robotizado? Algumas perguntas que podem ser feitas sobre a proposta de (FELIZARDO; BRACARENSE, 2006): O método de aplicação semi-mecanizado e semiautomático são

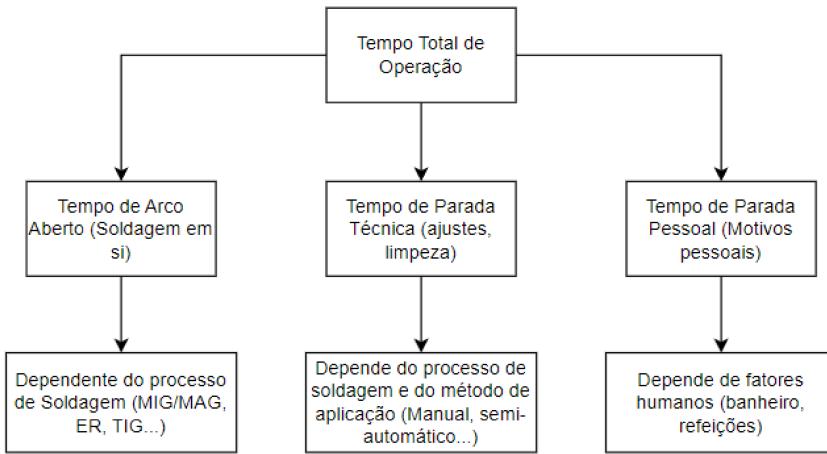
iguais? Em qual aplicação um processo semi-mecanizado apresenta velocidade de soldagem por gravidade? O que efetivamente difere o processo mecanizado do automatizado é apenas a programação do ciclo de soldagem ou o requerimento de ajuste das condições de soldagem?

Portanto, é possível perceber que há dificuldade em se definir o método de aplicação de soldagem. Esses tópicos serão rediscutidos posteriormente na revisão bibliográfica, com sugestão de uma definição que seja de fácil entendimento, pois esse conceito é necessário para a melhor compreensão do tema do presente trabalho.

Dando prosseguimento, para a mesma junta soldada podem ser adequados mais de um processo de soldagem e os principais fatores a serem considerados para a escolha do processo de soldagem são a produção e a produtividade. A produção depende da taxa de fusão do metal de adição ou do metal de base e é avaliada apenas durante o tempo de arco aberto. Já a produtividade relaciona-se com o tempo total de operação, visto que o alto ciclo de trabalho do processo MIG/MAG (não há necessidade de remover escórias ou trocar eletrodos) proporciona uma alta produtividade. Assim, por exemplo, caso as soldas de MIG/MAG sejam curtas e intermitentes, o ciclo de trabalho pode ser tão baixo como o do Eletrodo Revestido, mas a produção vai continuar sendo mais alta (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

Os processos manuais a arco, como a soldagem por eletrodo revestido - SMAW e GTAW (TIG em outra nomenclatura) manual, caracterizam-se por um tempo total de operação maior que os processos semiautomáticos, como o GMAW (MIG/MAG), eletrodo tubular - FCAW, e os que podem ser mecanizados ou automatizados, como o GMAW, GTAW e o arco submerso - SAW. Isso justifica-se devido ao tempo de parada, que é somado ao tempo de arco aberto, ou seja, o processo de soldagem propriamente dito. Portanto, esse tempo de parada influencia no aumento do tempo total de operação. Na Figura 1 é apresentada uma definição para o tempo total de operação tomando como base o tempo de parada segundo (BRITO; PARANHOS, 2005), que foi subdividido em dois tempos de parada: **Tempo de Parada Técnica e Tempo de Parada Pessoal**.

Figura 1 – Tempo Total de Operação



Fonte: O autor

Consequentemente a essa definição, é possível definir um importante fator para a análise de custos entre processos, chamado de **fator de operação**. O fator de operação é a razão entre o tempo de arco aberto e o tempo total de operação e é um indicativo do quanto um processo de soldagem é influenciado por aspectos diversos como características do processo de soldagem, método de aplicação, ambiente de trabalho, etc. Por exemplo, se um processo possui um fator de operação de 50%, isso significa que o tempo de paradas corresponde a metade do tempo para executar o processo de soldagem por completo.(BRITO; PARANHOS, 2005) Logo, para que se tenha um aumento no fator de operação, é necessário reduzir o tempo de parada técnica e o tempo de parada pessoal.

Em vista disso, os processos de soldagem por fusão a arco, que são uma especificidade de soldagem por fusão, apresentam características diferentes entre os processos que o compõem. Essas características diferentes implicam em custos diferentes associados a cada processo, portanto, é possível propor uma definição para custos em soldagem. Define-se primeiro o que é custo: custo é o valor monetário dos recursos necessários para a produção de um bem ou serviço. Os recursos podem ser exemplificados em termos físicos (algo material ou energético), em termos de tempo (tempo esse que pode ser produtivo ou não) e em termos humanos (como salário, indenização).

Buscando ser o mais abrangente possível, na soldagem é possível definir um custo relacionado com o processo, um custo relacionado com as técnicas associadas a esse processo e um custo associado com fatores humanos. A título de exemplo, um processo de soldagem por eletrodo revestido apresenta custos com equipamentos (a fonte, o porta eletrodos, os cabos e o grampo terra, além de EPI's), consumíveis (os eletrodos), energia elétrica, ou seja, custos físicos e relativos ao processo em si. Mas apresenta também custos com paradas para limpeza, troca dos eletrodos (que são custos mensurados em termos de tempo), retrabalho por falha humana (que são custos mensurados em termos físicos e de tempo) e esses custos são custos técnicos, pois dependem do método de aplicação do processo e

não do processo em si. Todavia, também inevitavelmente apresentará custos em termos humanos, como o salário de todas as partes envolvidas, seja o soldador ou operador do processo, ou caso seja uma empresa de soldagem, salário dos demais colaboradores que serão repassados ao valor do serviço de soldagem.

Mediante a esse cenário, são muitos os fatores a serem considerados para definir o custo associado com os processos de soldagem, que já são expressivos em quantidade. Dentre os processos mais utilizados, devido, principalmente, a suas altas "produção e produtividade", assim como à facilidade de domínio pelo soldador, se encontra o processo MIG/MAG, na sua versão semiautomática. Contudo, é válido ter em conta que a interferência do soldador acarreta em menor repetibilidade e que é mais propenso a geração de defeitos que o processo MIG/MAG automático. Em contrapartida, com o advento dos robôs industriais pela General Motors na década de 60, na chamada indústria 3.0, os processos de fabricação passaram a ter uma ferramenta a mais para aumentar a produtividade. Surge então o processo MIG/MAG automático e robotizado, que é um processo contínuo, não necessitando o controle da soldagem durante o procedimento.

Destarte, o presente trabalho apresenta uma avaliação técnica relevando os prós e contras da substituição da soldagem semiautomática MIG/MAG pela soldagem robótica MIG/MAG. O processo de avaliação é realizado com base nos custos da operação e pretende definir, mediante alguns dos diversos fatores citados anteriormente embasados através de estudos acadêmicos e casos industriais, em quais situações a soldagem robotizada torna-se mais vantajosa do que a soldagem semiautomática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A primeira pergunta a ser respondida é: O que é soldagem? A etimologia da palavra em português, ou seja, sua origem, é incerta. Uma hipótese que justifica o termo **soldagem** é originada do verbo em latim *solido*, que significa tornar sólido, consolidar, endurecer. Esse verbo é proveniente do termo *solidus*, que significa sólido ou maciço. Portanto, segundo a etimologia, soldagem seria o ato de tornar algo maciço e consistente. (FARIA, 1962). Logo, juntar duas chapas por fusão ou pressão é enquadrado pelo conceito de soldagem segundo a etimologia da palavra, pois as tornaria consistentes.

Contudo, atualmente, soldagem pode ser definida de outra forma de acordo com alguns autores. Em uma das definições analisadas na obra (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012), a soldagem visa à união de duas ou mais peças, assegurando que a junta soldada tenha propriedades metalúrgicas, físicas e químicas contínuas. Ou seja, propriedades que não mudam ao atravessar a junta soldada de uma peça à outra. Isto é certo apenas parcialmente e não pode ser aplicado para juntas dissimilares.

Do ponto de vista de normas técnicas, segundo a (AWS, 2010), soldagem é o processo de união que realiza a coalescência, ou junção, de materiais aquecendo-os à temperatura de soldagem, com ou sem o uso de pressão ou com o uso apenas de pressão, e com ou sem o uso de material de adição.

Todas essas definições tendem à união de dois ou mais materiais. Mas a definição de soldagem não se estende somente à união, pois os processos de soldagem também podem ser utilizados para a deposição de material em revestimentos ou recuperação de peças (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Indo além, a deposição pode ser usada também em manufatura aditiva e para realizar preenchimentos de cavidades, defeitos superficiais, que não necessariamente se enquadra na união de dois ou mais materiais.

2.1 Linha do tempo da soldagem

A soldagem não é um processo recente. Antes da soldagem por arco elétrico ser desenvolvida, havia a soldagem por forjamento, ou seja, ao aquecer o metal até próximo da temperatura de fusão e realizar marteladas sucessivas, uniam-se duas partes em uma. Há indícios de uso da soldagem por forjamento de um pingente de ouro na Pérsia por volta de 4000 a.C., de um pilar de sete metros na Índia e de armas como espadas na Idade Média. (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012).

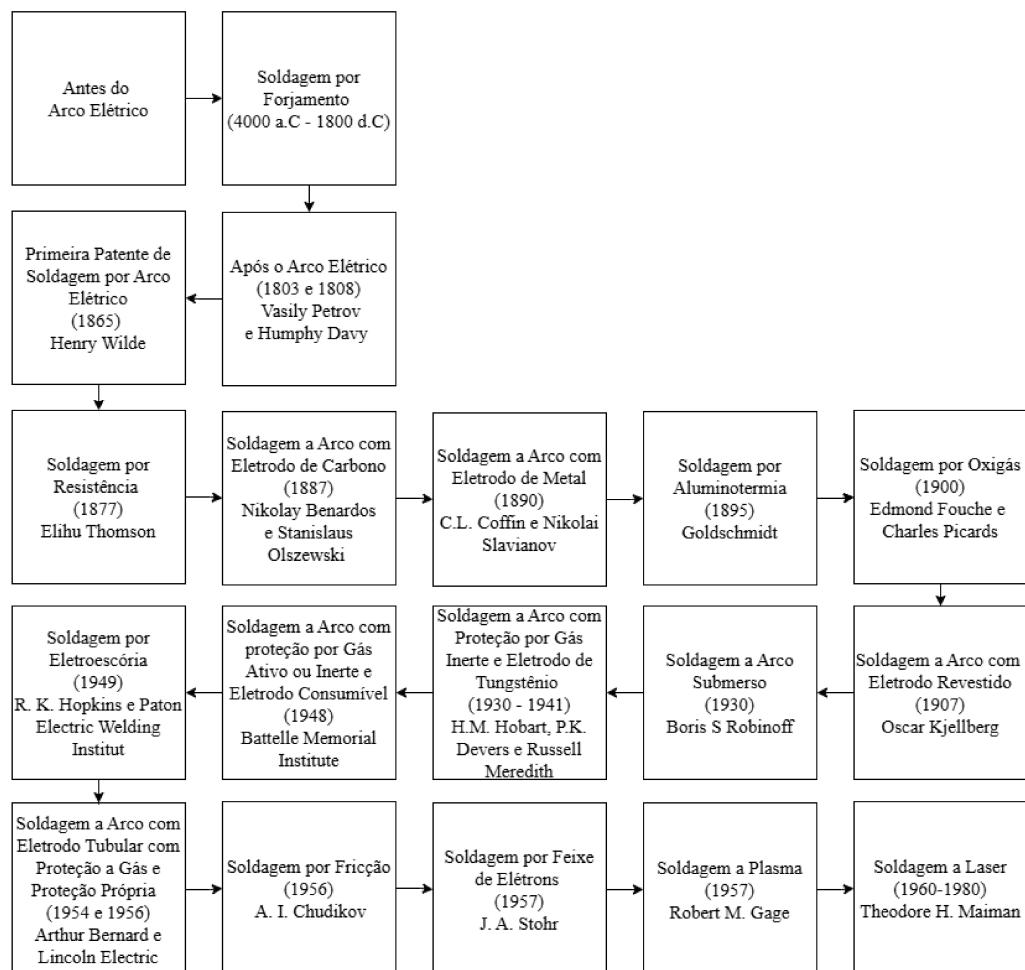
Existem discussões a respeito de quem foram os criadores do arco elétrico e de quem foram os criadores da soldagem por arco elétrico. Sobre o arco elétrico, é considerado que o físico inglês Humphry Davy, em 1802, em uma palestra, realizou uma faísca, mas não há nenhum documento que comprove explicitamente. Apenas em 1808 é considerado

que Davy apresentou o arco elétrico em um experimento realizado na Royal Society de Londres. Todavia, em 1803, o físico russo Vasily Petrov publicava um livro onde descrevia os experimentos realizados com o arco elétrico, chamado *"The News of Galvanic-Volt Experiments"*, portanto, anterior a Humphry. (YVINEC, 2021)

Sobre o processo de soldagem por arco elétrico, são considerados pioneiros o barão francês Auguste de Meriténus e o russo Nikolay Nikolayevich Benardos. É suposto que Auguste, em 1881, recebeu uma patente francesa pela criação da soldagem por arco elétrico com eletrodo de carbono. Todavia, a única patente possível de encontrar é datada de 1892 nos EUA, enquanto a patente do engenheiro russo, chamada de Elektrogefest, é datada de 1887 nos EUA. Logo, pela falta de informações, é difícil precisar quem de fato foi o vanguardista entre os dois, mas a invenção de Benardos foi mais aceita pela indústria, visto que Meriténus não apresentou uma verdadeira aplicação. (YVINEC, 2021)

Os processos de soldagem que foram desenvolvidos após a soldagem por resistência e as primeiras soldagens por arco elétrico atualmente ultrapassam a faixa de 50 processos (MODENESI; MARQUES; SANTOS, 2012). Os processos mais amplos são colocados em ordem cronológica com seus respectivos criadores na Figura 2.

Figura 2 – Linha do Tempo da Soldagem



Fonte: O autor

Cabem aqui algumas discussões a mais sobre a origem da soldagem. Fontes como (ASDS, 1968) mostram que mesmo após a descoberta do arco elétrico, os primeiros processos de soldagem a surgir foram desenvolvidos pelos ingleses Henry Wilde e Elihu Thomson. Todavia, a patente de Wilde é de difícil acesso e o processo de Thomson não é soldagem por arco, mas por resistência, que é considerado um processo de soldagem por pressão. Logo, pela aplicação industrial, Benardos e Olszewski são considerados os pioneiros na soldagem a arco.

Outro esclarecimento necessário é relacionado com a soldagem a laser. Sua origem está diretamente relacionada com a criação do laser por Theodore, logo, não há uma pessoa ou instituição em específico que tenha sido o responsável direto por patentes e pelo conceito de soldagem a laser.

Algo interessante a ser pontuado ainda no tema da cronologia da soldagem é o custo. Processos como a soldagem por oxigás eram custosos em seu início devido à dificuldade de produção do oxigênio e de comprimí-lo. Processos que dependem de gás inerte como TIG e MIG eram custosos devido à dificuldade de isolar os gases inertes como o argônio e o hélio e o retorno do investimento não era disponível rapidamente (MILLER, 2025). Processos como a soldagem por feixe de elétrons apresentam um alto custo por causa da necessidade de a soldagem ser realizada ao vácuo. Todavia, esses processos estão sempre em constante desenvolvimento e quando uma tecnologia é aprimorada e envolve um aumento na produção, reflete na queda do preço do produto final. Segundo (ASDS, 1968), uma das maiores evoluções na soldagem foi o desenvolvimento dos eletrodos revestidos, que permitiu uma melhor proteção e consequente qualidade da solda. Logo, as tecnologias associadas à soldagem são fatores que alteram o custo e podem influenciar na tomada de decisão sobre o uso de um determinado processo. É importante essa consideração, pois permitirá a expansão do raciocínio para a cronologia da robótica e o prosseguimento para o tema do presente trabalho.

2.2 Linha do tempo da robótica

A ideia de máquinas que realizam trabalho de forma autônoma não é recente, pois desde os tempos antigos os homens já realizavam conceitos semelhantes. No Egito antigo, por volta de 3000 a.C., a clepsidra, um dispositivo para medição de tempo pela vazão de água. (STANFORD, s.d.). Outro exemplo de mecanismo autônomo é o tear automático de Jacquard, que, através de um cartão perfurado, conseguia realizar complexos padrões de tecidos, substituindo um tecelão e seu assistente. (SCIENCE; MUSEUM, 2019).

Vários outros modelos de dispositivos autônomos foram desenvolvidos ao longo dos séculos, mas o conceito de robô e robótica não era ainda definido. Foi apenas em 1921 que o dramaturgo Karl Capek criou a peça Rossum's Universal Robots (R.U.R.), onde utilizou a palavra em Tcheco, que significa trabalho forçado, ou *Robot*. O conceito de robô idealizado por Capek era de homens mecânicos que trabalhavam em linhas de montagem

fabris, realizando o trabalho mais pesado e que em determinado momento se rebelariam. (STANFORD, s.d.)

Já o termo robótica tem sua origem com o escritor Russo-American Isaac Asimov, em sua obra *Runaround* escrita em 1941. Diferentemente de Karl, ele apresentava uma visão mais otimista dos robôs, como servos úteis aos humanos e algo bastante citado de sua obra, *I, Robot* são as três leis da robótica (STANFORD, s.d.):

1. Um robô não pode ferir um ser humano ou, por omissão, permitir que um ser humano sofra dano.
2. Um robô deve obedecer às ordens dadas por seres humanos, exceto quando estas ordens entrarem em conflito com a Primeira Lei.
3. Um robô deve proteger sua própria existência, desde que tal proteção não entre em conflito com a Primeira ou Segunda Lei.

Essas leis são precursoras da segurança associadas ao uso de robôs, mas também da ideia de controle sobre eles. Desde a ideia de um robô controlado diretamente por um humano a um robô pré-programado, ambas satisfazem a segunda lei.

Mas o que é um robô? As definições atuais do termo **robô** podem variar significativamente e ser de difícil consenso. Segundo o dicionário (PRIBERAM, 2008-2025), o termo pode apresentar três significados:

1. Aparelho capaz de agir de maneira automática numa dada função.
2. Autômato com figura humana. = ANDROIDE, HUMANOIDE
3. (Figurado) Indivíduo que obedece mecanicamente.

As duas primeiras definições podem ser observadas com facilidade na atualidade. Desde os robôs aspiradores que limpam o chão até bonecos e bonecas de controle remoto disponíveis nas lojas. Contudo, destes significados, o que mais tende à ideia de robô do presente trabalho é a primeira, mas com a ressalva de que o robô, na atualidade, pode possuir uma ou mais funções e a aplicação almejada é industrial.

O primeiro robô industrial foi criado em 1959 pelo americano George C. Devol, mas foi o compatriota engenheiro Joseph Engelberger quem comprou a patente, fundou a empresa Unimation e introduziu o *Unimate* no mercado, que pode ser visto na Figura 3.

Figura 3 – Robô Unimate e Joseph Engelberger (Esquerda)

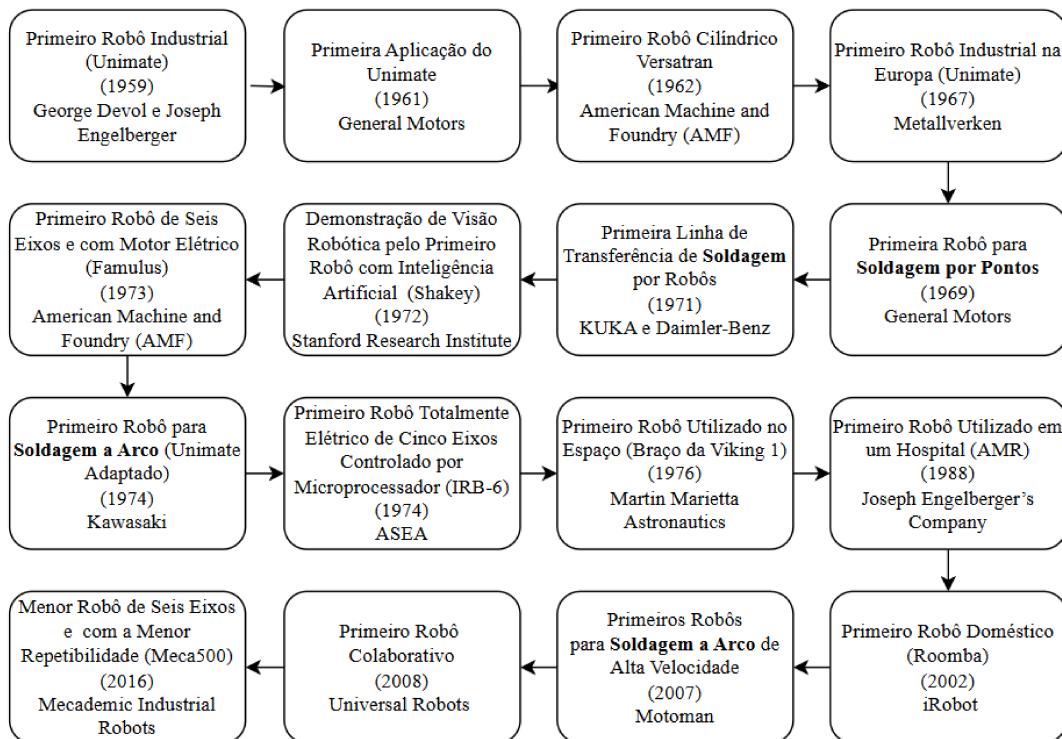


Fonte: IFR (2025)

A primeira aplicação do Unimate cumpria exatamente o primeiro significado de robô dado anteriormente. Em 1961, foi instalado na linha de produção da fábrica da General Motors (GM), na planta de Ternstedt, em Trenton, Nova Jersey. Sua função era empilhar peças de metal fundido sob pressão, algo perigoso para os trabalhadores humanos (IFR, 2025).

Mais fatos importantes sobre a cronologia da robótica são ilustrados na Figura 4, criada com base em (IFR, 2025).

Figura 4 – Linha do Tempo da Robótica



Fonte: O autor

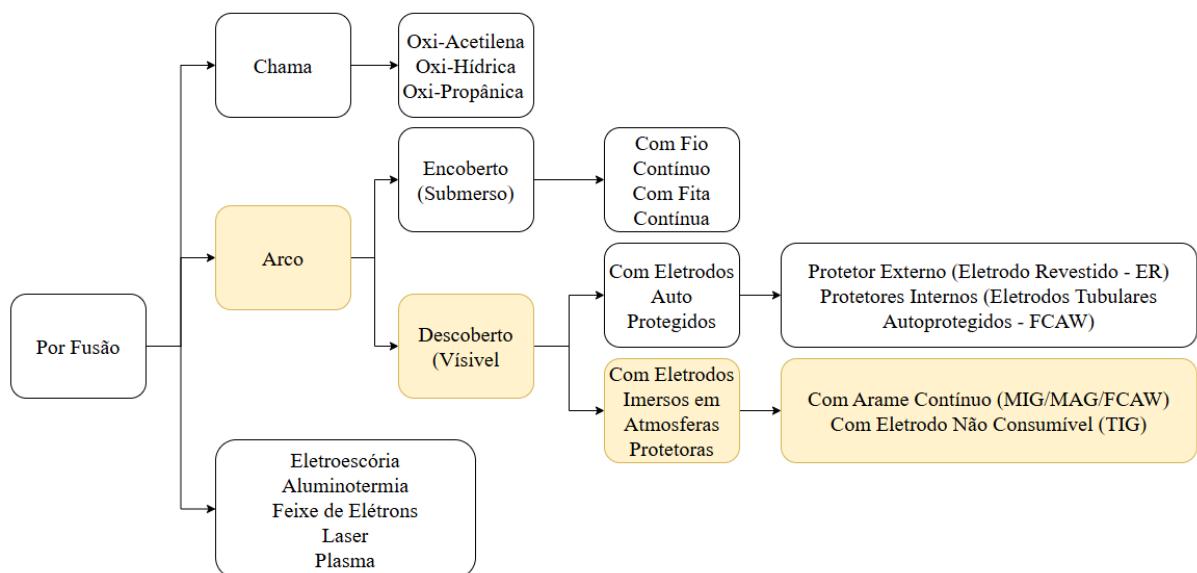
É notável que a soldagem e a robótica andaram juntas em alguns momentos da história e foram indispensáveis para aplicações que exigiam produção em cadeia como na indústria automobilística. Logo, a priori, os primeiros momentos onde é possível definir uma necessidade dos robôs são em processos contínuos e processos perigosos. Mas, conforme será discutido posteriormente, também há espaço para o uso de robôs em processos de precisão e de versatilidade na soldagem.

2.3 Processo de soldagem MIG/MAG (GMAW)

Conforme apresentado na linha do tempo da soldagem, o processo de soldagem a arco com proteção por gás ativo ou inerte e eletrodo metálico consumível foi idealizado por volta de 1948 pelo Instituto Memorial Batelle. No Brasil, é comumente chamado de MIG (Metal Inert Gás) ou MAG (Metal Active Gás) e nos EUA, GMAW (Gas Metal Arc Welding). Segundo (ASDS, 1968), a motivação para a criação do processo foi a procura por métodos para soldagem de alumínio, durante o período da Segunda Guerra Mundial, e foi concebido logo após o processo TIG (Tungsten Inert Gás). Uma das características inerentes do processo, que é a alimentação automática de arame, foi desenvolvida anteriormente ao processo, entre 1925 e 1928.

Em relação à classificação, os processos de soldagem são divididos convencionalmente em dois grandes grupos: soldagem por fusão e soldagem por pressão. Dentre esses, o processo MIG/MAG é um processo de soldagem por fusão a arco descoberto (arco visível), com eletrodo consumível imerso em atmosfera protetora. É possível situar-se melhor observando a Figura 5.

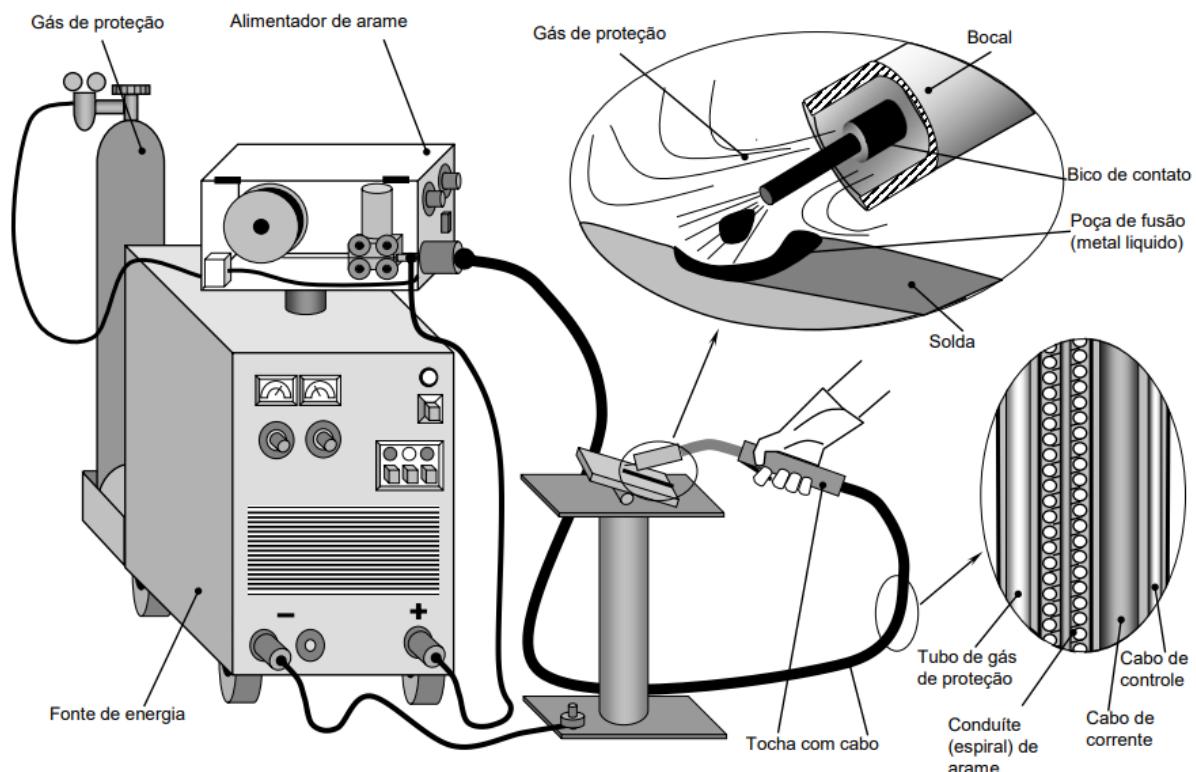
Figura 5 – Classificação dos Processos a Arco



Fonte: O autor

O processo MIG/MAG em sua configuração mais simples utiliza uma fonte de soldagem de tensão constante, um cilindro ou recipiente com gás de proteção inerte (como o argônio, Ar) ou ativo (como o dióxido de carbono, CO_2) ou uma mistura dos gases, uma tocha e um alimentador de arame, conforme pode ser visualizado na Figura 6.

Figura 6 – Processo MIG/MAG



Fonte: Scotti e Ponomarev, Soldagem MIG/MAG (2014, p.18)

A fonte de soldagem usualmente é utilizada com corrente contínua e polaridade positiva, CC+, no eletrodo, que para esse processo é o arame consumível. O alimentador de arame utiliza um carretel com o eletrodo bobinado e o arame é tracionado por roletes através de um motor elétrico. As tochas podem ser refrigeradas a água ou pelo próprio gás de proteção, e são constituídas de empunhadura com gatilho, cabo, bico de contato e bocal.

Os principais parâmetros de soldagem atribuídos ao processo de soldagem MIG/MAG são: Tensão (V), velocidade de alimentação do arame - WFS, velocidade de soldagem, distância bico de contato-peça (DBCP), diâmetro do eletrodo e ângulo de avanço do eletrodo. São os consumíveis associados ao processo: Arames-Eletrodos, que podem ser maciços ou tubulares e gás de proteção. Em casos que exijam proteção da raiz do cordão, como soldagem de alumínio e aços inoxidáveis, pode ser utilizado também gás de purga.

A emissão de elétrons no arco na soldagem no processo MIG/MAG é através da emissão por campo, também chamada de emissão a frio. Mas o que é arco elétrico? A definição de arco elétrico é dada: É a passagem de corrente elétrica de alta densidade entre dois

condutores separados por gás ou vapor com uma diferença de potencial relativamente pequena entre eles. (ENCYCLOPAEDIA, 2025). O arco elétrico é formado pela passagem de corrente elétrica entre os dois condutores, ou seja, pelo fluxo ordenado dos elétrons. Com base nisso, a emissão por campo é o processo onde os elétrons localizados nas camadas de óxidos, mediante a um alto gradiente de tensão, criado entre a camada de óxido e o material de base, são acelerados em direção ao ânodo. (SCOTTI; PONOMAREV, 2014).

O processo de soldagem MIG/MAG é comumente considerado um processo semiautomático. Há uma ressalva aqui, sobre como se referir corretamente ao modo de aplicação do processo e o que exatamente é um processo semiautomático. Para tal, na próxima seção será abordado de uma forma melhor o conceito de aplicação de soldagem.

2.4 Métodos de Aplicação de Soldagem

Mediante o que foi apontado anteriormente no Cap. 1, a conceituação dos métodos de aplicação de forma facilitada e bem exemplificada se faz necessária. Existem alguns termos que podem causar confusão por similaridade semântica, ou de escrita, como os termos automático e automatizado, mas que representam conceitos diferentes. Outros termos como autônomo, mecanizado e robotizado ou robótico também serão discutidos, bem como os conceitos de manual e semi-automático.

De forma inicial, a fim de facilitar a conceituação, tem-se a divisão de um processo de soldagem em duas partes: a **parte elétrica** e a **parte mecânica**. A parte elétrica integra todo o circuito de soldagem, como a fonte, o cabo obra (que é conectado à peça de trabalho) e o eletrodo. Como exemplo, para o processo por Eletrodos Revestidos, a parte elétrica compreende o cabo obra, a fonte e o eletrodo juntamente ao porta-eletrodo. Para o processo MIG/MAG, a parte elétrica inclui o eletrodo-arame como consumível, diferentemente do processo TIG, onde o eletrodo e o consumível são separados.

A parte mecânica se refere ao **deslocamento da tocha**, **proteção da poça de fusão** e **alimentação do arame** no processo de soldagem MIG/MAG. Esclarecendo melhor:

O deslocamento da tocha para um processo de soldagem pode ser realizado por um soldador, por um aparato mecânico simples (como uma mesa com apenas um movimento) ou complexo (como uma mesa com três eixos ou, ainda, um robô). Por exemplo, o processo por eletrodo revestido pode ser realizado pelo soldador ou por um aparato que utiliza a gravidade como força motriz. O processo MIG/MAG pode ser realizado por um soldador, por um aparato mecânico que fixa a tocha e rotaciona a peça, mas também por uma mesa de três eixos ou por um robô.

A proteção da poça de fusão varia de acordo com o processo. Para os eletrodos revestidos, a proteção é realizada pelo revestimento, não exigindo interferência. No processo MIG/MAG, o gás de proteção usualmente é controlado pela fonte ao acionar o gatilho, semelhantemente ao processo TIG. Para o processo de arco submerso, é feito através do fluxo, que pode ser feita por um soldador ou operador ou de forma controlada.

A alimentação de arame/eletrodo pode variar também de acordo com o processo. Para o processo por eletrodo revestido, a alimentação é feita pelo soldador. Para o processo MIG/MAG, a alimentação é realizada de forma automática. Para o processo TIG, a alimentação pode ser de forma controlada pela fonte, através do próprio soldador ou, em caso de soldagem autógena, não exigir alimentação.

Pertinente a essas duas partes, elétrica e mecânica, existe o **controle**. Em alguns processos, há o controle da parte elétrica, no tocante principalmente à fonte, que pode controlar os parâmetros do arco de soldagem, realizando ajustes como de indutância, tensão e corrente. Quanto à parte mecânica, o controle pode estar associado ao deslocamento da tocha, por exemplo, ao variar a velocidade de soldagem de um carro de solda ou alterando o percurso de solda de um robô aplicado na soldagem. Também é possível controlar o acionamento do gás, tanto através da fonte de soldagem, como por mecanismos externos. Em relação à alimentação de arame, o controle pode ser realizado por um alimentador de arame eletrodo, como no processo MIG/MAG, mas pode ser realizado através de dispositivos que não estão ligados ao circuito elétrico de soldagem.

A forma de controle ou programação de um processo de soldagem com o método de aplicação robotizado pode ser Online, Offline e Manual. A forma de controle Manual é utilizada apenas para robôs do tipo *pick and place* e não é usual em soldagem. A forma Online pode ser através do ensino de uma sequência de movimentos para a tocha, também chamada de *Walk-Through* ou através de um *Teach Pendant*, um dispositivo semelhante a um tablete, que auxilia o operador a mover o robô para as posições desejadas. Essa forma é chamada de *Lead-Through*. A forma de programação Offline é através do uso de softwares de CAD 3D para a simulação da trajetória e o envio das informações para o robô através de um protocolo como o Ethernet. (KAH et al., 2015)

Tendo em mente os conceitos tratados acima, prossegue-se para a explicação dos termos no modo de aplicação de soldagem.

O **método de aplicação manual** se refere ao manuseio, ou seja, o deslocamento da tocha pelo soldador. Nota-se que não necessariamente o soldador estará em contato físico direto com a tocha, visto que é possível utilizar dispositivos de movimentação como auxiliares. Por exemplo, um dispositivo com canaletas para realizar o deslocamento horizontal da tocha.

O **método de aplicação semiautomático** não é um termo adequado. O termo completo e mais correto é **modo de aplicação manual com alimentação automática do arame**, visto que o principal, que é o deslocamento da tocha, ainda é realizado pelo esforço humano, independente se o processo possui alimentação de arame, proteção da poça ou mesmo os parâmetros elétricos acionados por um soldador e mantidos de forma automática. Para um melhor entendimento do termo semiautomático, deve-se entender o termo automático, que se refere ao controle sem interferência humana. Logo, o processo MIG/MAG é um processo que apresenta controle automático da alimentação do arame, todavia, em caso

de soldador presente e deslocamento manual, caracteriza um processo aplicado de forma manual com controle automático de alimentação do arame. Logo, entende-se o processo semiautomático como um processo cujo método de aplicação é manual (deslocamento da tocha), com a participação automática de alguma parte elétrica ou mecânica. Por exemplo, o processo TIG pode ser aplicado de forma manual quando, além do deslocamento da tocha pelo soldador, a alimentação do arame é realizada também pelo soldador. E no caso da alimentação do arame de adição realizada pelo alimentador automático, este permanece manual, porém, com alimentação automática.

O **método de aplicação mecanizado** refere-se ao deslocamento da tocha através de mecanismos simples ou complexos, controlados, que permitam a alteração no processo em tempo real. Logo, a força motriz não é mais humana, cabendo ao operador a operação do mecanismo. O exemplo mais prático deste processo são os carros de soldagem, que portam as tochas e são controlados por um operador em tempo real. Abre-se uma observação: operador, em contraposição ao soldador, não está ligado diretamente ao ato de soldar, mas sim ao controle do processo.

O **método de aplicação automático** trata-se do deslocamento da tocha através de mecanismos simples ou complexos, controlados, que **não** permitem a alteração no processo em tempo real por um operador. Logo, o método de aplicação robotizado se enquadra como um modo de aplicação automático, portanto, não há necessidade de distinção entre esses dois modos. O termo mais correto é: **modo de aplicação automático flexível** para robôs e **modo de aplicação automático fixo** para mecanismos que não permitem reorientação da tocha e são de difícil alteração da sequência de operação, de estrutura física robusta. Portanto, um processo robotizado é o processo cujo método de aplicação é automático flexível.

Conclui-se, portanto, que existem apenas três modos de operação: manual, mecanizado e automático.

Para elucidação dos termos, tem-se a diferenciação dos termos automático, autômato e automatizado: Segundo os dicionários da língua portuguesa, automação e automatização são sinônimos. Automação envolve a substituição do trabalho humano por meio de dispositivos mecânicos ou eletrônicos que controlam seu próprio funcionamento, também chamados de autômatos (PRIBERAM, 2008-2025). Todavia, segundo alguns autores, automação e automatização se diferenciam pela tecnologia empregada. Segundo Rodrigo Monteiro Pessoa, automatização envolve o uso de inteligência artificial relacionada com robótica e mecatrônica. Segundo Fernando Rojas e Gérman Palácio, automatização seria o uso de técnicas diversas de coleta, armazenamento, processamento e transmissão de informações. (MARTINEZ; MALTEZ, 2017)

Portanto, automação trata da operacionalização de atividades e automatização trata-se do uso de tecnologias para tomadas de decisões, voltadas para o planejamento das operações.

Para o presente trabalho, automação, de onde deriva o termo automático, é o termo mais correto para os métodos de aplicação apresentados neste trabalho.

3 METODOLOGIA

Mediante o que foi conceituado anteriormente, entende-se que o processo de soldagem MIG/MAG pode ser aplicado de forma manual, mecanizada ou automática, que engloba máquinas especializadas com um mecanismo de até três graus de liberdade e de estrutura rígida (fixo) ou para robôs de até seis graus de liberdade (automático flexível). O presente trabalho apresenta uma comparação entre o processo de soldagem MIG/MAG com os métodos de aplicação manual com alimentação automática de arame (semiautomático), daqui em diante referenciado apenas como manual e automático flexível (robótico).

Portanto, o objetivo principal é averiguar os prós e contras da substituição do processo MIG/MAG, com o deslocamento manual da tocha, para o processo automático flexível, cujo deslocamento é realizado com o auxílio de um robô. Para tal, utiliza-se como base a análise de diferentes fontes de informação sobre processos manuais e automáticos. Como parâmetros quantitativos, tem-se os custos da operação, mas também é possível a análise da substituição em termos qualitativos, como o nível de satisfação dos clientes, bem-estar de trabalhadores e dos resultados das peças.

O método científico que será utilizado é o método comparativo, que segundo a classificação de métodos conceituada por Almeida (2025 apud PEREIRA et al., 2025, p. 22), apresenta comparações atemporais, ou seja, entre elementos apenas no presente, no passado ou entre elementos no presente e no passado.

As comparações serão realizadas entre estudos de casos e trabalhos acadêmicos como artigos, monografias e dissertações. Um estudo de caso, segundo (PEREIRA et al., 2025), trata-se de descrever e analisar, de forma mais detalhada quanto possível, algum caso que apresente uma particularidade que o torne interessante para a discussão.

Os trabalhos utilizados foram obtidos de sites com teor acadêmico como ResearchGate, Google Scholar, SciELO, Elsevier e de publicações independentes. Ao todo, foram utilizados onze estudos, entre dissertações, monografias e artigos. Ressalta-se que nem todos tratam do tema da comparação em termos de custo de forma quantitativa, todavia, mesmo não tratando de forma explícita, há espaço para debate nas demais publicações, tratando de custos de forma não explícita (a título de exemplo, o retrabalho, que implica em custo monetário) e de outros parâmetros qualitativos.

Para cada trabalho é realizada uma breve contextualização, uma análise do processo de soldagem, são sintetizados os resultados e, por fim, são demonstrados os prós e contras da substituição da soldagem aplicada de forma manual pela soldagem aplicada de forma automática flexível. Isso é avaliado em termos de custos explícitos (quando os autores explicitarem, como o tempo de retorno do investimento, payback) ou custos implícitos, como parâmetros qualitativos (como análise da qualidade do cordão de solda), sociais (melhores condições de operação) ou ambientais (menor desperdício de materiais).

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após uma análise minuciosa dos trabalhos, elaborou-se uma síntese dos principais pontos abordados em cada um, com ênfase no tema central deste estudo.

4.1 Dissertação: Otimização e Simulação do Processo de Fabricação de Chassis de Trem por Soldagem (CAMPANA, 2024)

- Contextualização: A pesquisa consistiu no desenvolvimento de um projeto de automação para duas fases do processo de fabricação do chassis de uma locomotiva, na Espanha, conforme Figura 7.

Figura 7 – Chassis de Trem



Fonte: Campaña (2024, p.25)

O objetivo da fabricante era a produção de cerca de 50 chassis por mês e ao analisar o *TAKT time*, conceituado como o tempo de produção para uma determinada demanda, chegou-se ao tempo de 6,16 horas para cada chassis. Com base no Takt time, foi aferido o tempo de cada montagem realizada manualmente e identificou-se que duas delas, a da base e do teto do chassis, estavam com o tempo de ciclo acima de 6,16 h. Logo, foi proposto pelo autor a automatização dessas duas fases, integrada ao processo das demais montagens.

- Soldagem: O processo utilizado para as duas montagens foi o processo MIG/MAG aplicado de dois modos. Para a aplicação manual não foi detalhado, mas para a robotizada, foram escolhidos dois robôs para realizarem as soldas. Para a base, são realizadas 183 soldas e para o teto, 125.

- Resultados: O trabalho é bem detalhado, principalmente no que se refere aos custos de cada elemento do projeto, que, segundo o autor, na página 98, descreve que o custo com os robôs representa 34,63% do custo de investimento.

Segundo (CAMPANA, 2024), após a escolha dos equipamentos, simulação e programação dos robôs, bancadas e criação das rotinas, obteve-se o seguinte resultado para o Takt time, conforme Tabela 3:

Tabela 3 – Tempo Total de Produção Aplicação Manual x Robotizada (Traduzida)

Componente	Aplicação Manual (horas)	Aplicação Robótica (horas)	% de Melhoria
Teto do Chassi	10,9	1,1358	≈ 89,57%
Base do Chassi	13,8	1,1116	≈ 91,95%

Fonte: Campaña (2024, p.96)

Denota-se que para o teto do chassi (*Roof Frame*), houve uma melhora de 89,57% e para a base do chassi (*Base Frame*), houve uma melhora de 91,95%.

Segundo a análise econômica desenvolvida pelo autor na página 98 de seu trabalho, o investimento inicial, considerando os equipamentos, softwares, infraestrutura, documentação e projetos, é de **462 mil** euros e o custo anual de operação, considerando manutenção, salários, eletricidade e consumíveis, **173,5 mil** euros. O custo para a fabricação do chassis considerando os materiais, o custo por seção, serviços externos, totaliza **12 mil** euros por chassi, que mensalmente, totalizam **600 mil** euros. O custo da base e do teto, em relação ao chassis completo, totalizam **240 mil** euros, que representam 40% do chassis. O lucro de cada chassis é **20 mil** euros, por mês, resulta em um lucro de **1 milhão** de euros. Dessa quantidade, a parcela referente ao teto e a base é de **400 mil** euros.

O autor, com base nos dados anuais de operação elaborou uma projeção para cinco anos de operação, conforme Tabela 4

Tabela 4 – Projeção Financeira em Cinco Anos (Traduzida)

Ano	Ano 1 (€)	Ano 2 (€)	Ano 3 (€)	Ano 4 (€)	Ano 5 (€)
Investimento Inicial	462.080	0	0	0	0
Custos Operacionais	173.500	173.500	173.500	173.500	173.500
Receita por Encomenda de Estrutura	400.000	400.000	400.000	400.000	400.000
Benefício Líquido	-235.580	226.500	226.500	226.500	226.500
Benefício Líquido Acumulado	-235.580	-9.080	217.420	443.920	670.420

Fonte: Campaña (2024, p.101)

É perceptível que dado o investimento inicial (*Initial Investment*), considerando os custos operacionais (*Operational Costs*) e a receita por encomenda do chassis (*Revenue per Frame Order*), obtém-se o benefício líquido (*Net Benefit*) que é constante

a partir do segundo ano. Denota-se que somente ao terceiro ano o investimento se pagará, analisando o benefício líquido acumulativo (*Cumulative Net Benefit*), que é positivo no ano 3.

Alguns outros termos de custo apresentados pelo autor são o retorno do investimento (*Return of Investment -ROI*), o valor presente líquido, (*Net Present Value - NPV*) e a taxa interna de retorno (*Internal Rate of Return -IRR*). O ROI totalizou **45.08%**, o que significa que o investimento se paga relativamente bem em 5 anos, pois quanto maior o ROI, maior o retorno sobre o investimento. O NPV totalizou **397534€** e demonstra que em 5 anos, o valor gerado supera o custo de oportunidade, ou seja, o quanto a empresa deixa de ganhar por escolher essa abordagem, dado que um NPV negativo indica perda de dinheiro. O IRR é o valor da taxa de desconto que faz o valor de NPV igual a 0 e totalizou **34.42%**, maior que a taxa de desconto de 10% considerada, logo, demonstra que o investimento tem um bom potencial.

O prazo de retorno do investimento, também conhecido como ***payback***, é de aproximadamente **2,04 anos**. Como observação, o autor cita que os valores utilizados não são exatamente os valores reais, devido a confidencialidade do projeto, mas são uma visão geral compreensiva do problema.

- Prós: Em termos de custo, a substituição foi promissora, com um retorno do investimento elevado em relativo pouco tempo, menos de três anos. Em termos de tempo, o tempo de produção foi reduzido em mais de 80% para as duas peças analisadas. Em termos sociais, (CAMPANA, 2024) diz que há a geração de novos empregos e o emprego de uma linha de suprimentos, movimentando empresas locais. Em termos ambientais, o autor descreve que, para compensar as emissões de carbono pela célula robótica, é necessário plantar 51 árvores por mês, enquanto que para a aplicação manual, 588 por mês. Isso se deve à redução de cerca de dez horas de soldagem de um processo (manual) para o outro (robotizado).
- Contras: Em termos de custo, é possível que o alto investimento seja um empecilho para a implementação imediata da linha. Em termos sociais, há a geração de novos empregos que exigem mão de obra mais capacitada, mas ao mesmo tempo, um deslocamento dos empregos anteriores, quando o processo era manual.

4.2 Dissertação: Estudo Comparativo da Soldagem Robótica e Manual em um Ambiente de Fabricação de Baixo Volume e Alta Variedade: Estudo de Caso do JR Teste 3 (SRINIVASAMURTHY, 2024)

- Contextualização: Este trabalho consistiu na análise da soldagem manual e robótizada de uma peça cilíndrica de uma carroceria de caminhão, em uma empresa americana, conforme Figura 8.

Figura 8 – Peça JR Teste 3

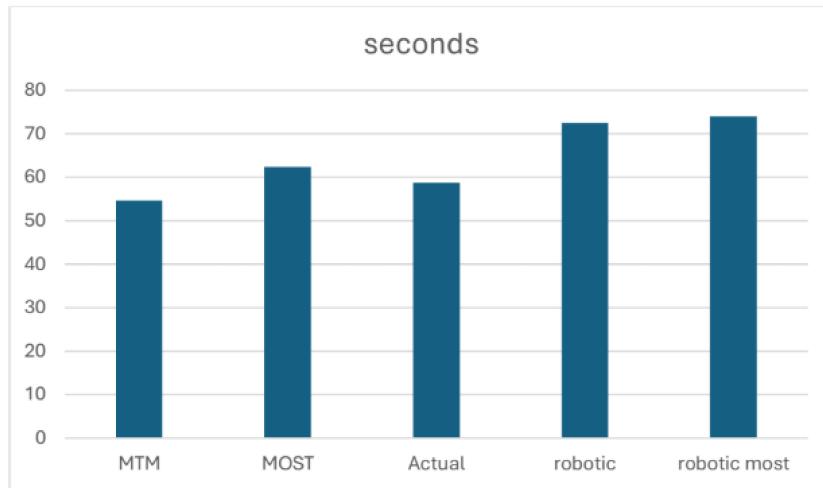


Fonte: Srinivasamurthy (2025, p.48)

O fundamento principal utilizado nesse trabalho foi a análise de tempos e movimentos, *time-motion analysis*. Segundo o autor, (SRINIVASAMURTHY, 2024), a análise de tempos e movimentos é uma estratégia sistemática para analisar os procedimentos de trabalho, identificar ineficiências e aumentar a eficiência em ambientes industriais. É característico dessa pesquisa a influência das ideias tayloristas, onde o tempo é medido aos mínimos detalhes e analisado minuciosamente. As técnicas que foram utilizados no trabalho são a *Methods-Time Measurement* (MTM) e a *Maynard Operation Sequence Technique* (MOST). Essas técnicas consistem basicamente em discretizar movimentos específicos, como sentar, mover um objeto, em unidades conhecidas como TMUs (*Time measurement units*), que correspondem a 0,036 segundos. Ao longo do trabalho, foram utilizadas várias tabelas com os movimentos e seus respectivos tempos. Uma vez definida a metodologia, o autor analisou os movimentos necessários para a realização da soldagem da peça aplicado de forma manual. Em seguida, realizou a análise para o processo de soldagem, aplicado no modo automático flexível.

- Soldagem: O processo utilizado foi o MIG/MAG e empregou-se um robô colaborativo para realizar as soldas aplicadas de forma automática.
- Resultados: Os dados de custo não foram muito detalhados como em outras publicações. O autor estabeleceu que os custos de fixação, quando necessários, totalizam 400 dólares por peça e o custo de programação do robô, 100 dólares por hora. O custo de soldagem é de 60 dólares por hora. Esses valores serão utilizados para o cálculo do custo das peças, considerando as análises de tempo, conforme Figura 9

Figura 9 – Análise dos Tempos dos Movimentos (Em Segundos) - Peça Cilíndrica



Fonte: Srinivasamurthy (2025, p.61)

Denota-se que o tempo dos movimentos dos robôs, real (*robotic*) e o teórico calculado (*robotic most*), foram superiores aos valores dos tempos obtidos de forma manual, real (*Actual*) e os calculados teoricamente (MTM e MOST). O autor também apresenta uma análise gráfica dos custos, onde realiza que independente da otimização de 5% e 10% do processo aplicado roboticamente, não há uma quantidade de peças onde os processos igualam seus custos, com o método aplicado manualmente sendo mais econômico. Os dados utilizados estão no anexo do trabalho analisado, mas não são justificados os valores ali encontrados, apenas o valor de 100 dólares por hora para a programação do robô, citado anteriormente, é perceptível na tabela construída pelo autor.

O autor ainda analisa a quantidade de peças fabricadas de forma manual e automática flexível. Um soldador consegue realizar 199 peças por dia e o robô, 318, considerando um tempo de trabalho de 6,5 horas para o soldador e de 8 horas para o robô. Ele justifica que o soldador só realiza solda 50% do tempo e que o robô realiza em 80% do tempo. Logo, segundo ele, por mais que o uso de robôs seja mais caro inicialmente, é mais eficiente em termos de tempo de arco aberto e eficiência e que se prova mais eficiente em processos à longo prazo, com uma demanda maior e com as otimizações de 5% e 10%. Todavia, ele não apresentou o custo do investimento do robô.

- Prós: Segundo o autor, os robôs conseguem operar por longos períodos de tempo, mantendo soldas consistentes e com boa qualidade, não sendo afetados por fatores como fadiga e falta de concentração. Também afirma que os robôs, em se tratando de alta produção de peças, se provam mais eficientes.
- Contras: O autor deixa claro que o custo inicial para a aplicação automática flexível

é mais cara que o custo para a aplicação manual, mas não apresenta o custo do investimento inicial.

4.3 Dissertação: Estudo Comparativo da Soldagem Robótica e Manual em um Ambiente de Fabricação de Baixo Volume e Alta Variedade: Estudo de Caso do Anel de Elevação (POTHAMSETTI, 2024)

- Contextualização: O estudo em questão é semelhante ao estudo anterior, utilizando o mesmo critério de análise do tempo, MTM e MOST. A peça a ser soldada é um anel de elevação, de formato em D, em seu invólucro, para operações que exijam içamento ou travamento seguro, conforme Figura 10.

Figura 10 – Anel de Elevação



Fonte: Pothamsetti (2024, p.49)

Nessa metodologia, o autor analisa os movimentos de um soldador e discretiza em movimentos tabelados, assim como também analisa os movimentos para o processo aplicado roboticamente. Foram analisadas cinco amostras para esse processo.

- Soldagem: O processo utilizado foi o MIG/MAG e empregou-se um robô colaborativo para realizar as soldas aplicadas de forma automática. (POTHAMSETTI, 2024) diz que foram necessárias fixações iniciais; depois, foi realizada a programação do robô e prosseguiu-se para a soldagem.
- Resultados: Diferentemente do trabalho anterior, para esse caso, a análise MTM e MOST para o processo aplicado de forma manual implicou em um tempo maior que o processo aplicado de forma automática flexível. Foram observados valores discrepantes entre o calculado e o real, para as cinco amostras, conforme Figura 11.

Figura 11 – Análise dos Tempos dos Movimentos (Em Segundos) - Anel de Elevação



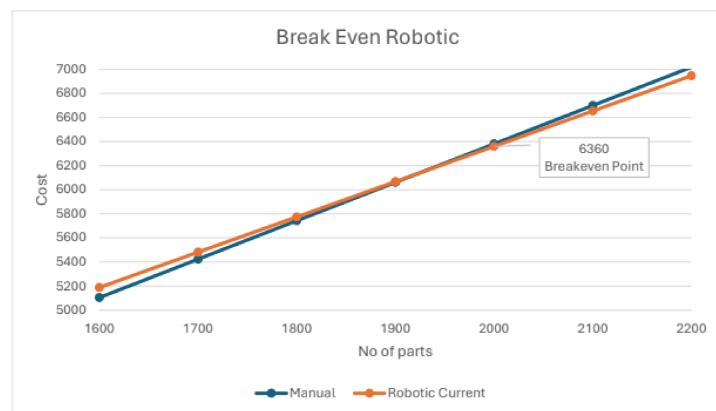
Fonte: Pothamsetti (2024, p.61)

Segundo o autor, a razão da diferença entre os movimentos calculados, MTM e MOST, Manual e Robótico e o real (Actual Manual e Actual Robotic) se dá porque os movimentos humanos são mais complexos e precisos para serem tabelados nas técnicas de análise dos movimentos por tempo. Já para o robô, diz que não há muitos movimentos humanos para serem considerados.

Ainda explica que para o processo aplicado de modo robotizado, os valores de posicionamento correspondem a apenas 11% do tempo total do processo, enquanto que para o processo aplicado manualmente, esse tempo corresponde a 34% do tempo total do processo.

Em uma análise de custos, o autor estabelece os mesmos critérios de custo que o trabalho anterior, 400 dólares para a fixação e 100 dólares por hora para o robô, além de 60 dólares por hora para o soldador. O gráfico de custos (em dólares) considerando o número de peças fabricadas é traçado na Figura 12

Figura 12 – Gráfico de Custos - Anel de Elevação



Fonte: Pothamsetti (2024, p.68)

Segundo (POTHAMSETTI, 2024), para 1930 peças o processo aplicado como robotizado se torna mais econômico que o processo manual, com o robô operando a mesma quantidade de horas por dia que o soldador e produzindo a mesma quantidade de peças.

- Prós: Este trabalho sintetiza alguns pontos positivos ao uso do processo de modo robotizado, como o uso de um soldador menos experiente para auxiliar o robô nas fixações e controle. Também cita que o uso do robô é mais eficiente em termos de tempo, conforme demonstrado com as análises dos movimentos.
- Contras: Pela análise de quebra do gráfico, o autor diz que o processo aplicado de forma manual é mais econômico e que o processo automático flexível é melhor a longo prazo e para volumes de produção maiores.

4.4 Dissertação: Estudo Comparativo da Soldagem Robótica e Manual em um Ambiente de Fabricação de Baixo Volume e Alta Variedade: Estudo de Caso do JR Teste 2 (MYSORE, 2024)

- Contextualização: Semelhante aos dois trabalhos anteriores, a metodologia é a mesma. Nesse trabalho, a peça em questão é um componente de montagem para içamento, conforme Figura 13.

Figura 13 – Peça Jr Teste 2



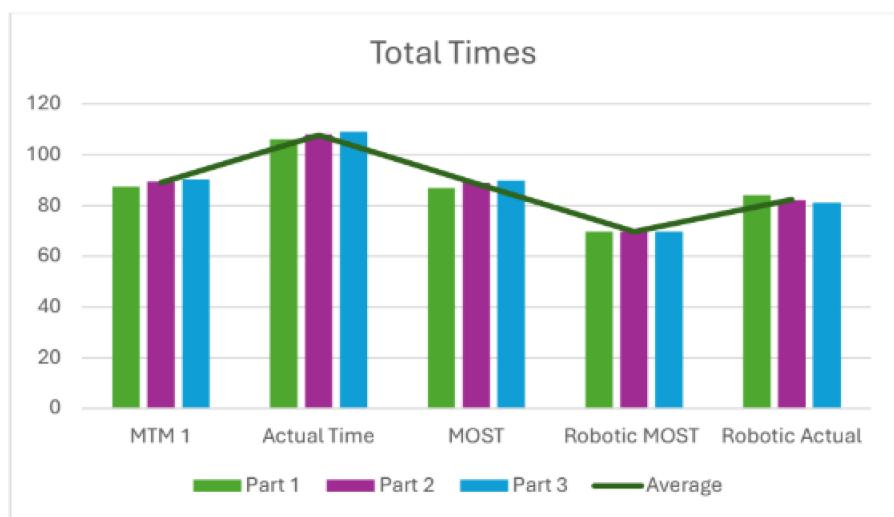
Fonte: Mysore (2024, p.56)

Discretizaram-se os movimentos do soldador, analisou-se em uma tabela de tempo e chegou-se aos resultados da metodologia MTM e MOST. Depois, analisaram-se os movimentos do robô somente para o MOST, devido à metodologia MTM ser mais específica para movimentos humanos. O procedimento utilizou-se de câmeras

e cronômetro para marcar o tempo de cada movimento. O experimento foi realizado para três amostras.

- Soldagem: O processo utilizado foi o MIG/MAG e empregou-se um robô colaborativo para realizar as soldas aplicadas de forma automática.
- Resultados: Segundo (MYSORE, 2024), de acordo com o preço de 60 dólares por hora para soldagem com o robô e dado um tempo médio de 83,33 segundos, o custo por peça do robô é de 1,37 dólares e o custo de programação do robô de 100 dólares a hora. Os resultados para os tempos, em segundos, das três amostras pode ser visto na Figura 14.

Figura 14 – Análise dos Tempos (Em Segundos) dos Movimentos - Montagem para içamento



Fonte: Mysore (2024, p.67)

É possível analisar que os tempos reais (*Actual Time*) diferem dos tempos calculados, MTM e MOST, para o processo aplicado de forma manual e de forma automática flexível. Também é notável que para a aplicação manual, o tempo para finalização de uma peça é maior do que o tempo para finalização do processo aplicado de forma robótica.

Segundo o autor, mesmo para um custo de trabalho igual para o robô e para o soldador, tem-se que devido aos tempos diferentes, o robô apresentará um custo menor. Segundo a análise de tempo e a um valor de mão de obra de 60 dólares por hora, o custo de soldagem para o processo aplicado de forma manual é de 1,79 dólares, em relação aos 1,37 para o processo com o robô.

Para uma análise gráfica, o autor com base nos custos por peça para os dois métodos de aplicação, obteve que para uma quantidade de 240 peças produzidas, o valor monetário para os dois processos eram iguais.

- Prós: Segundo o autor, é possível realizar a otimização do processo de modo automático flexível em até 10%, possibilitando um ponto de inflexão onde o robô se torna mais viável em um pouco mais de um dia de produção. Também analisa que para o presente trabalho e para as duas partes apresentadas anteriormente, os tempos obtidos para o processo aplicado manualmente foram bons, mas que esses resultados foram conseguidos no momento de melhor condição física do trabalhador (pela manhã do expediente do soldador).
- Contras: O autor não pronunciou nenhum ponto contrário ao tema do presente trabalho, todavia, é perceptível que para uma produção abaixo de 240 peças, segundo essa pesquisa, a aplicação manual é mais econômica. Ressalta-se uma possível discussão dos resultados desse trabalho, dado que o custo maior para o processo com o robô se justifica não por seu maior custo de aquisição, mas pelo fato do custo da programação ser de 100 dólares a hora. Logo, somados esse custo com o custo de 1,37 dólares, 101,37 dólares é muito superior a 1,79, o que significa que para uma programação simples, esse custo deverá cair consideravelmente, mas não desconsiderará o custo inicial para aquisição do robô.

4.5 Dissertação: Análise de um Sistema de Soldagem Robótica e Conceitos Possíveis de Melhoria para uma Pequena e Média Empresa (SME) Norueguesa (KONIG, 2019)

- Contextualização: A presente pesquisa consiste no caso industrial de uma empresa relativamente pequena, com 40 funcionários, que produz veículos e equipamentos para manutenção de estradas, tanto para o verão quanto para o inverno, na Noruega, conforme Figura 15.

Figura 15 – Equipamento para Manutenção de Estrada

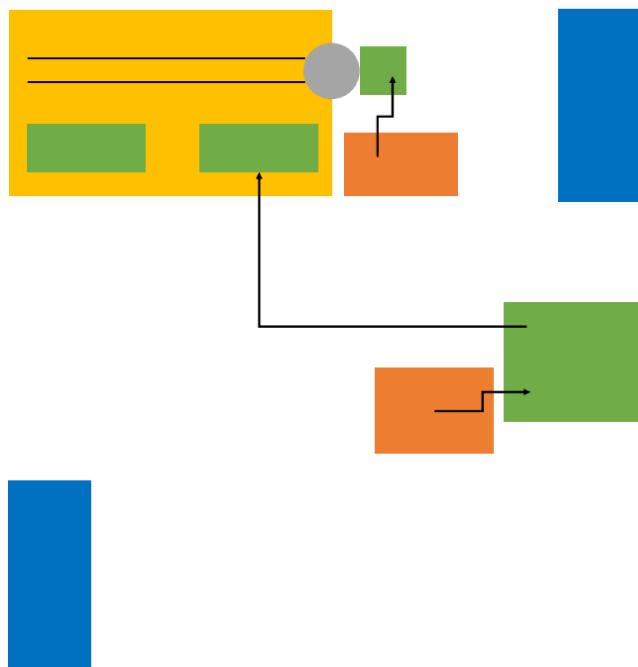


Fonte: König (2019, p.13)

A empresa possui duas células de manufatura com robôs, sendo que a maior é utilizada para a soldagem de peças grandes como chassis e opera em sua capacidade quase máxima. Enquanto o potencial da menor não é utilizado, a empresa opta por realizar soldas de forma manual de alguns componentes menores. Segundo (KONIG, 2019), uma das justificativas para essa situação é que o tempo de preparação da bancada é muito superior ao tempo de produção efetiva. O trabalho propõe como solução inicial a troca da célula robótica por algum outro modelo que possa suprir a necessidade da empresa e, das três opções encontradas, a que melhor se enquadrou para a situação estudada foi uma célula híbrida.

- Soldagem: O autor não detalha o processo de soldagem utilizado, parâmetros ou equipamentos, exceto o modelo do robô. Ele afirma que para a soldagem das peças, antes são necessárias soldas de fixação realizadas por um soldador.
- Resultados: O autor realizou uma análise dos problemas encontrados que tornavam a célula uma parte não integrada completamente no processo. Ele encontrou que, devido ao layout da célula, quando um processo de soldagem com o robô era realizado, não era possível utilizar as bancadas adjacentes para realizar soldas de fixação, devido à célula não permitir a presença de pessoas enquanto estiver em funcionamento. A célula pode ser vista na Figura 16.

Figura 16 – Layout da Célula Robótica



Fonte: König (2019, p.27)

Os retângulos em verde são as bancadas para soldas de fixação e as áreas em laranja

os locais para posicionar os materiais de base. Em amarelo está a bancada com trilhos do robô e em azul a armazenagem das peças.

Outro problema encontrado foi o uso de dispositivos de fixação não catalogados, o que dificultava o uso e disponibilidade para soldagem das peças. Segundo (KONIG, 2019), a quantidade de dispositivos supera 200, e são necessários para o correto posicionamento e soldagem, tanto para processos aplicados manualmente quanto para o processo aplicado de forma robotizada.

Das soluções oferecidas, a primeira opção envolveria a utilização de um robô para soldagem, um robô para posicionamento das peças e uma transportadora de paletes. A segunda consistiria na substituição da célula atual por uma célula com dois robôs, um para operações de transporte das peças direto das bancadas de fixação e outro para soldagem. A terceira opção e a de critério de escolha do autor, foi a utilização de um sistema híbrido, que permita o uso do robô para soldagem enquanto há a permanência de soldadores realizando as soldas de fixação nas bancadas.

Um ponto interessante abordado pelo autor é, que para essa ocasião, seriam necessários dispositivos para extração de fumos e uma iluminação melhor para o soldador. Outro ponto também considerado, foi que para essa opção, a programação do robô é facilitada devido ao uso da metodologia *lead-through*, mas sem a especificidade do uso do *teach pendant* e com o custo inferior a uma programação do tipo *offline*, que para a aplicação atual, de uma pequena indústria, não é viável.

Em termos de custo, conforme o autor, a opção mais custo-benefício é a terceira em relação às duas anteriores. Também frisou que para o caso em que a solução encontrada não seja satisfatória para a empresa, esse sistema pode ser revendido com mais facilidade, devido ao seu uso mais universal do que as primeiras soluções.

- Prós: No estudo em questão, percebe-se que não foi considerado a substituição da célula por uma mão de obra exclusivamente humana. Isso se dá, segundo o autor, pelo fato de que o valor da mão de obra no país é elevado. Logo, o uso de robôs para essa situação foi considerado melhor, em termos sociais e em termos de aumento de produtividade. Outro ponto a favor do uso dos robôs de forma híbrida em relação à aplicação manual, é a flexibilidade da automação. Segundo (KONIG, 2019), a empresa fabrica 40 produtos diferentes e com o uso da programação facilitada, é possível automatizar o processo de soldagem de várias peças com o auxílio da expertise dos soldadores que a empresa dispõem, sem que haja necessidade de ensiná-los extensivamente a programar.
- Contras: O autor cita que é possível que o sistema híbrido não resolva a situação para casos futuros e que para essa situação deverá ser vendido. O autor não frisa mais nenhum ponto negativo que possa ter correlação com a comparação do processo

aplicado roboticamente e aplicado manualmente, mas é perceptível, pela interpretação do contexto de localização geográfica, que a solução apresentada é melhor para países como a Noruega, onde a mão de obra é mais cara.

4.6 Monografia: Otimização do Processo de Soldagem de Estruturas de Assentos Veiculares (DUMONT, 2016)

- Contextualização: A pesquisa consiste no estudo da substituição do método de aplicação manual do processo MIG/MAG pelo modo automático flexível. O estudo em questão é realizado em uma empresa que realiza a soldagem de assentos veiculares no Brasil, conforme Figura 17.

Figura 17 – Assento Dianteiro



Fonte: Dumont (2016, p.27)

O processo inicialmente era realizado de modo manual com o auxílio de dispositivos para soldagem em várias posições. Todavia, a problemática envolve a qualidade das soldas, o que foi alvo de críticas dos clientes, resultando em auditorias de inspeção na empresa. Segundo (DUMONT, 2016), a empresa solicitou um estudo de *payback*, ou seja, o tempo necessário para que haja o retorno do investimento, onde o lucro acumulado (lembrando que lucro é a receita total da empresa menos os custos) é igual ao valor do investimento inicial. O autor realizou o estudo dos custos com mão de obra, consumíveis, da energia elétrica e do retrabalho.

- Soldagem: O processo de soldagem utilizado é o MIG/MAG, aplicado de forma manual e automático flexível, com a montagem de duas células de soldagem. O autor descreve detalhadamente as etapas do processo aplicado manualmente, onde as alterações foram realizadas na linha 3, na etapa de fechamento da estrutura do assento, que é a sétima etapa, na operação de número 70, conforme Figura 18.

Figura 18 – Soldador e Montador na Aplicação Manual



Fonte: Dumont (2016, p.30)

Os parâmetros para o modo de aplicação manual são comuns a todas as soldas realizadas, sendo a tensão entre 27 a 37 V, a corrente entre 160 a 260 A, a velocidade de alimentação do arame entre 20 a 30 m/min e a vazão de gás entre 16 a 25 l/min. Para o modo de aplicação robotizado, a depender das peças e regiões, são utilizadas faixas de tensão entre 18 e 28 V, faixa de corrente de 158 a 231 A, a velocidade de alimentação do arame em uma faixa menor que o processo aplicado manualmente, com a faixa entre 6,3 a 11,2 m/min e vazão de gás entre 11 a 15 l/min.

- Resultados: Os principais problemas levantados pelo autor no processo de soldagem realizado pela empresa no modo manual de aplicação são apresentados: instabilidade do arco elétrico, devido à oscilação da DBCP; alta velocidade de soldagem; variação no ângulo de trabalho; instabilidade do arco gerando excesso de respingos; uso de gás de proteção com percentual alto de CO_2 , aproximadamente de 25%, dificultando a regulagem de transferência metálica por spray; excesso de fragmentos de arame gerados durante uma abertura de arco dificultada; condições de soldagem iguais para todas as juntas e todas as posições; consumo excessivo de arame de solda, gás de proteção e bicos de contato; envio de estruturas sem solda para o cliente.

Foram implementadas duas células de soldagem, com dois robôs cada, duas fontes de soldagem e um dispositivo giratório. Após a implementação, o autor analisou os resultados dos principais problemas apresentados anteriormente e concluiu que todos foram devidamente abordados e resolvidos. Todavia, alguns deles não se tratam de problemas envolvendo o modo de aplicação, mas sim, dos parâmetros de soldagem, como o uso de gás inapropriado e respingos excessivos.

Os cálculos do *payback* evidenciam o potencial da substituição do processo, conforme a Figura 5.

Tabela 5 – Payback do Processo

PAY BACK					
INVESTIMENTOS	R\$	Descrição	R\$ (Anual)		
Infra Estrutura de Layout	-	Mão de Obra (Soldador)	R\$ 206.579,98		
Modificação de Trilogiq	-	Mão de Obra (Montador)	R\$ 156.540,62		
Investimentos em Robôs/Dispositivos	R\$ 1.040.000,00	Participação de Lucros	R\$ 5.500,00		
		Abono salarial	R\$ 1.300,00		
TOTAL	R\$ 1.040.000,00				
INDICADORES	ATUAL	PROPOSTO	MELHORIA	REDUÇÃO ANUAL	OBS.
Redução de pessoal - Soldador	50	42	4	R\$ 206.579,98	-
Redução de pessoal - Montador			4	R\$ 156.540,62	-
Participação nos lucros			8	R\$ 44.000,00	
Abono salarial			8	R\$ 10.400,00	
redução do custo de arame de solda	R\$ 1.035,12	R\$ 921,98	R\$ 113,14	R\$ 1.357,68	
Redução do custo de Gás (L/ano)	R\$ 1.455,11	R\$ 689,77	R\$ 765,33	R\$ 9.183,96	
Energia eletrica (KW)	20kw/h	12kw/h	- 8kw/h	R\$ 36.860,31	
Retrabalho (hs/ano)	2186,81	626	1561	R\$ 18.730,68	-
Redução de Bicos de contato	R\$ 287,64	R\$ 42,70	R\$ 244,94	R\$ 2.939,28	-
Custo termino (10HC) - Tempo hora		73800	(73.800,00)	(73.800,00)	-
			TOTAL	R\$ 486.593	
Investimentos	Redução Anual	Pay Back (anual)			
R\$ 1.040.000,00	R\$ 486.592,51	2,1			
2015	R\$ 486.592,51				
2016	R\$ 486.592,51				
2017	R\$ 486.592,51				
2018	R\$ 486.592,51				
2019	R\$ 486.592,51				
2020	R\$ 486.592,51				
2021	R\$ 486.592,51				

Fonte: Dumont (2016, p.26)

Segundo os resultados do *payback* encontrados pelo autor, em 2,1 anos o investimento inicial de um 1,04 milhões de reais seriam compensados pela redução anual de 486,592 mil reais. O autor realizou em seu trabalho os cálculos detalhados das reduções de consumíveis (arame, gás), da energia elétrica e retrabalho, além do custo em termos de tempo para finalizar uma peça (custo término).

- Prós: Na análise de melhorias, o autor pontua alguns fatos a favor do processo de modo robotizado. Após a substituição da soldagem aplicada manualmente, avaliou-se uma melhora no controle do arco em regiões onde a ergonomia e o posicionamento complicado afetavam o desempenho do soldador. Também foi apresentado ponto de melhora na qualidade do produto final, todavia, este também pode ser obtido pela soldagem de forma manual, mas o robô implica em melhor repetibilidade. Outro fato importante analisado foi o envio de estruturas todas devidamente soldadas para o cliente, sem que houvesse falta de soldas. Também é ponto favorável ao uso do processo automático flexível a análise do excesso de fragmentos de arame, que foi resolvido uma vez que essa problemática só era encontrada no processo aplicado manualmente, devido à não interrupção do arco pelo soldador. Em termos

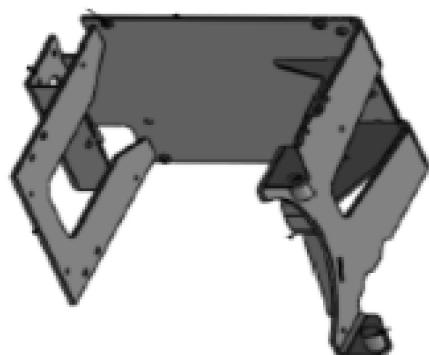
de custo, é ponto positivo o *payback* relativamente baixo, dado a magnitude do investimento inicial. A figura resume também alguns pontos positivos como o menor custo de retrabalho, garantia essa de uma melhor repetibilidade do processo e gastos energéticos e com consumíveis, positivos em termos de custo e de fatores ambientais.

- **Contras:** O autor não frisou pontos desfavoráveis à aplicação da soldagem MIG/MAG robótica. Contudo, são pontos consideráveis o investimento inicial, que está muito acima do valor disponível para uma pequena empresa. Também é válido analisar que a produção para esse presente trabalho é em série, portanto, para que haja retorno do investimento, deve haver melhoria na produção em cadeia, o que torna o investimento de um robô dessa magnitude inviável para aplicações menos exigentes. Todavia, isso não invalida totalmente o uso de robôs, pois há ampla variedade de modelos. Outro fator que pode ser considerado como desfavorável é o aspecto social, que para essa aplicação, houve a substituição completa do soldador, mantendo-se apenas um operador, não sendo citada uma possível realocação do trabalhador.

4.7 Monografia: Implantação de Processo de Soldagem Robotizado em um Conjunto de Peças (WIDZ, 2018)

- **Contextualização:** A pesquisa analisada trata sobre a soldagem de um suporte de capô para uma máquina agrícola realizada por uma empresa de metalurgia, no Brasil, conforme Figura 19.

Figura 19 – Suporte do Capô



Fonte: Widz (2018, p.53)

Segundo o autor, são enfrentados algumas questões dignas de melhorias:

No processo atual existem alguns problemas na produção do mesmo como: a baixa produtividade com alta demanda, dificuldade no atendimento das dimensões exigidas pelo cliente, variação dos corredores de solda, variação da transferência de calor para as peças

durante a realização do processo de soldagem, que origina empenamentos, falta de cordões de solda, cordões com defeitos, oscilações de produtividade, e necessidade de verificação dimensional do conjunto após a soldagem por conta da não confiabilidade no processo, e ainda tem-se a necessidade de encaminhar o conjunto para o setor de acabamento, com a finalidade de retirar os respingos originados pela solda. (WIDZ, 2018, p. 11).

O autor também frisa que há um rodízio de soldadores, o que acarreta em uma interferência na fabricação dos conjuntos devido a uma diferença de experiência entre eles. Como metodologia, (WIDZ, 2018) inciou uma coleta de dados onde analisou o tempo de produção de cada peça de modo manual de operação, com base nos relatórios da empresa e analisou o dispositivo de fixação utilizado para o processo de soldagem aplicado de forma manual. Após, foi confeccionado um novo dispositivo e realizada a programação do processo de soldagem. Por fim, o autor avaliou o tempo para fabricação das peças de modo automático flexível de operação.

- Soldagem: Segundo o autor, o processo utilizado para soldagem do conjunto é o MIG/MAG e foi realizado em uma célula de soldagem. Na discussão dos resultados o autor detalha os tipos de soldas e os pontos de empenamento, bem como as cotas que são mais difíceis de se obter.
- Resultados: Da coleta de dados, o autor encontrou os seguintes resultados para o processo aplicado de forma manual e de forma automática flexível, conforme Tabelas 6 e 7 respectivamente:

Tabela 6 – Tempo de Produção para Aplicação Manual

TOTAL DE PEÇAS PRODUZIDAS	527	peças
TEMPO TOTAL	11616	minutos
TEMPO MÉDIO DE PRODUÇÃO POR PEÇA	22,04	PEÇAS / MINUTOS

Fonte: Widz (2018, p.33)

Tabela 7 – Tempo de Produção para Aplicação Robotizada

TOTAL DE PEÇAS PRODUZIDAS	532	peças
TEMPO TOTAL	3268,2	minutos
TEMPO DE PRODUÇÃO POR PEÇA	6,14	PEÇAS / MINUTOS

Fonte: Widz (2018, p.33)

É perceptível que após a implementação do robô, houve uma melhora significativa do tempo de produção por peça. Uma observação, o autor inverteu a unidade do tempo de produção por peça, que deveria ser de minutos por peça. Segundo o autor, a melhora obtida foi de 72%, e deve-se ressaltar que o tempo analisado considera o início da ordem de produção, o processo de montagem das peças do conjunto no dispositivo de fixação, a execução da soldagem pela célula robotizada e a retirada do conjunto do dispositivo até o fechamento da ordem de produção. Ele também cita que paradas por parte do operador para necessidades particulares e o deslocamento para o início e fechamento da ordem, ainda influenciam o tempo de produção.

Subentende-se que os demais problemas apontados na contextualização foram resolvidos, como o atendimento das dimensões exigidas pelo cliente, cordões de solda com defeitos ou mesmo falta deles, visto que o autor não os cita novamente. Questões como respingos não são tratadas como um problema do método de aplicação manual pelo fato de que está mais correlacionado com os parâmetros de soldagem e pelos equipamentos de soldagem.

- Prós: Segundo o autor, como pontos positivos obtiveram-se cordões de solda mais uniformes, com controle do calor gerado pelo processo, também obtiveram-se uma melhora do tempo de produção com a diminuição do tempo ocioso causado pelo processo aplicado manualmente. Embora (WIDZ, 2018) não citasse custos explicitamente, os custos nesse trabalho podem ser avaliados em termos de tempo, onde a quantidade de peças produzidas é muito maior, logo, aumentando a produção tem-se o aumento do lucro. Também podem ser entendidos que há custos associados ao tempo de parada pessoal reduzidos, pelo fato de que não há mais a necessidade de um soldador.
- Contras: Um ponto em teoria positivo citado pelo autor é a capacidade de um robô de operar 24 horas por dia, mas também cita que é necessário um operador para posicionar as peças corretamente no dispositivo. Logo, não necessariamente o uso de um robô implica em independência da mão de obra e é um fator que deve ser considerado para análise de custos também, visto que, dadas as leis trabalhistas, para operar em 24 horas de produção, serão necessários três ou quatro operários (um para cada turno de 8 horas ou turno de 6 horas respectivamente). O autor não citou o custo com o investimento inicial, tampouco com o maquinário necessário para fabricar o dispositivo de fixação, que são fatores importantes em termos de custo e aumentam a complexidade da substituição do processo.

4.8 Artigo: Comparação dos Custos e Eficiência da Soldagem MAG Manual e Robotizada em Termos de Qualidade e Fatores Sociais (RESTECKA; WOLNIAK, 2018)

- Contextualização: O presente trabalho apresenta uma abordagem detalhada dos custos de soldagem relacionados tanto para a soldagem aplicada manualmente quanto para a robotizada, para o contexto da Polônia. O estudo para o método automático flexível foi realizado em uma empresa não identificada e o processo manual no Instituto Spawalnictwa pois, segundo (RESTECKA; WOLNIAK, 2018), a empresa só executa o processo de modo robotizado. A metodologia utilizada envolve a análise dos custos de soldagem e da qualidade, com base em algumas informações, equacionamentos e testes (o procedimento é o mesmo para o método manual ou automático flexível).

Primeiramente os autores assumem uma jornada de trabalho de três turnos, com cargas horárias de 8 horas, em um total de 250 dias e ele menciona a quantidade de peças soldadas por turno. Em sequência, eles realizam os cálculos dos tempos de arco aberto e do tempo total de operação. Adiante, eles realizam o cálculo da quantidade de material depositado para realizar o cálculo do custo da quantidade de arame eletrodo utilizado. Depois, eles realizam o cálculo do custo do gás de proteção, o custo da mão de obra (salário do operador para aplicação robotizada e soldador para aplicação manual). Por fim, eles calculam o custo da energia elétrica e citam o custo dos equipamentos (para as duas formas de aplicação).

Segundo (RESTECKA; WOLNIAK, 2018), os custos foram agrupados nos chamados custos diretos, definidos como a soma dos custos com arame, gás de proteção, salários (custo do trabalho) e custo com energia, que somados ao custo de investimento, tem-se os custos totais.

Após o cálculo dos custos, os autores realizam o cálculo da receita total e definem o lucro total em um ano de funcionamento, dado pela receita total menos os custos totais. Também foi calculado o fator de operação apenas para o processo automático flexível.

Além da análise em termos de custo, os pesquisadores também analisaram a qualidade das soldas através de inspeção visual e análise metalográficas do tipo macroscópicas.

- Soldagem: Ambos os processos, de modo manual ou robotizado de aplicação, requereram duas soldas de filete em uma junta em T. O material a ser soldado foi uma chapa estampada do aço S355MC de 2,5 mm de espessura, o arame eletrodo foi o ISO 14341-A-G4Si1 (na norma AWS 5.18, ER70S-6) da fabricante Böhler de 550 kg e o gás de proteção o ISO 14175-M20-ArC-8 (92% Ar e 8% CO₂). Segundo os autores, o processo aplicado de forma robótica consistia na montagem das peças

em posicionadores pelo operador da estação de soldagem, soldavam-se as peças e, enquanto o operador de uma estação analisava as peças visualmente e preparava a estação, o robô se movia para outra estação para realizar as soldas.

- Resultados: O fator de operação calculado para a aplicação automática flexível foi de 66%, o que significa que mais da metade do tempo total de operação da soldagem realizada foi efetivamente realizando deposição de material (tempo de arco aberto).

Uma vez calculados os custos para os dois métodos de aplicação, eles são comparados para uma mesma quantidade de peças, conforme pode ser visto na Tabela 8, tomando o processo manual como referência anual de produção. A unidade monetária é o Zloti polaco, PLN, sendo importante ressaltar que os valores são relativos ao ano da pesquisa, 2018.

Tabela 8 – Análise Comparativa dos Custos para uma Mesma Quantidade de Peças (Traduzida)

Parâmetro	Aplicação Manual	Aplicação Robótica
Tipo de solda	Junta em T, solda de filete	Junta em T, solda de filete
Tipo de produção	Produção em lote, 3 turnos	Produção em lote, 3 turnos
Número de peças	382 500	382 500
Preço por peça	8,30 PLN	8,30 PLN
Nº de peças x preço	3 174 750 PLN	3 174 750 PLN
Custos de investimento	35 000 PLN	420 000 PLN
Consumo de insumos - arame	4 016,25 PLN	4 016,25 PLN
Consumo de insumos - gás	1 962,225 PLN	1 962,225 PLN
Custo com energia elétrica	30 600 PLN	61 200 PLN
Custo de mão de obra	216 000 PLN	344 736 PLN
Custos diretos totais	287 578,475 PLN	831 914,475 PLN
Custo por peça (ano 1)	0,75 PLN	2,17 PLN
Custo por peça (ano 2)	0,66 PLN	1,08 PLN
Lucro bruto (ano 1)	2 887 171,525 PLN	2 342 835,525 PLN
Lucro bruto (ano 2)	2 922 171,525 PLN	2 762 835,525 PLN

Fonte: Restecka; Wolniak (2018, p.6)

Também são comparados no modo definido pelos autores como de maior eficiência, que leva em consideração a produção anual de peças máxima para cada método de aplicação, onde para a aplicação robótica, é maior, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Análise Comparativa dos Custos para Maior Quantidade Anual de Peças (Traduzida)

Parâmetro	Aplicação Manual	Aplicação Robótica
Tipo de solda	Junta em T, solda de filete	Junta em T, solda de filete
Tipo de produção	Produção em lote, 3 turnos	Produção em lote, 3 turnos
Número de peças	382 500	532 000
Preço por peça	8,30 PLN	8,30 PLN
Custos de investimento	35 000 PLN	420 000 PLN
Consumo de insumos - arame	4 016,25 PLN	5 586 PLN
Consumo de insumos - gás	1 962,225 PLN	2 729,16 PLN
Custo com energia elétrica	30 600 PLN	85 120 PLN
Custo de mão de obra	216 000 PLN	478 800 PLN
Custos diretos totais	287 578,475 PLN	992 235,16 PLN
Lucro bruto (ano 1)	2 887 171,525 PLN	3 423 364,84 PLN
Lucro bruto (ano 2)	5 809 343,05 PLN	7 266 729,68 PLN
Tempo de retorno do investimento	1 ano	1 ano
Lucro superior em relação à solda manual (ano 1)	-	Sim

Fonte: Restecka; Wolniak (2018, p.7)

É perceptível que para a mesma quantidade de peças, que segundo o autor, foram de 512 por turno para o processo aplicado manualmente, o processo aplicado roboticamente apresenta um lucro bruto inferior ao manual tanto para o ano 1 quanto para o ano 2. Isso se justifica, segundo (RESTECKA; WOLNIAK, 2018), pelo custo com mão de obra (salários) inferior para os soldadores, que para a região da pesquisa foi utilizado um valor médio de 30 PLN por hora, enquanto que os operadores da empresa analisada recebiam uma média de 66 PLN por hora. Todavia, o autor cita que o método automático flexível atinge a mesma quantidade de peças produzida pelo método manual anual em 180 dias, o que significa que para a aplicação robotizada, o lucro devido a uma maior produção de peças supera os custos de mão de obra. O *payback*, (Tempo de Retorno do Investimento) conforme Tabela 9 para ambos os métodos de aplicação é de **um ano**, mas para a aplicação robótica, é **inferior** ao tempo da aplicação manual.

Em termos de qualidade, que também são impactantes no custo (como custo de re-trabalho), (RESTECKA; WOLNIAK, 2018) não explicita nenhum valor monetário. Mas as análises metalográficas resultaram em imperfeições para as soldas realizadas por aplicação manual, como convexidade excessiva, borda imprópria, falta de penetração do cordão e assimetria excessiva.

- Prós: É ponto positivo a favor da substituição da aplicação manual pela robotizada a maior produção de peças, ainda mais se tratando de soldas relativamente simples, não exigindo uma melhor ergonomia como no estudo anterior, o que impactaria

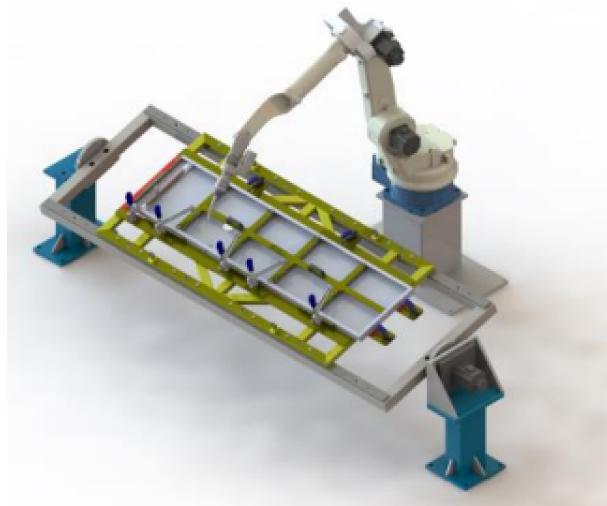
ainda mais a favor do uso dos robôs. Também é ponto favorável a qualidade das soldas, pois em termos de custo, retrabalho e indenizações devido a falhas causadas pela falta de qualidade são fatores que não podem ser ignorados.

- **Contras:** Um ponto considerado contrário é dado pela análise da energia utilizada no processo. Para esse estudo, a aplicação manual obteve uma quantidade menor de custos para uma mesma quantidade de peças, dado o valor da mão de obra muito inferior para o soldador em relação ao operador, da ordem de duas vezes menor, é cogitável a substituição do investimento em um robô por outro soldador. Isso se justificaria pois duplicaria a quantidade de soldas, com o salário, 60 PLN para os soldadores e 66,5 PLN para o operador, muito próximos. Esse argumento, contudo, exige uma análise mais detalhada dos impactos da qualidade nos lucros, o que pode invalidá-lo completamente.

4.9 Artigo: Dispositivo Padrão de Fixação para Soldagem Robótica – Produção de Mesa de Ar para Máquinas de Trabalhar Madeira (SCHLICKMANN; ALBERTON; RIBEIRO, 2019)

- **Contextualização:** Essa pesquisa tem como tema a implementação de uma melhoria na fabricação de uma peça soldada, em uma indústria brasileira que fabrica equipamentos para o ramo moveleiro, conforme Figura 20.

Figura 20 – Mesa e o Robô de Solda Simulados



Fonte: Schlickmann; Alberton; Ribeiro; (2019, p.8)

A melhoria em questão é a substituição da soldagem aplicada manualmente pela soldagem aplicada roboticamente, pois segundo os autores, (SCHLICKMANN; ALBERTON; RIBEIRO, 2019), as etapas anteriores como corte a laser e dobra já estavam otimizadas. Um dos principais problemas apontados pelos autores é o manuseio da peça, devido ao seu tamanho considerável e a complexidade das soldas.

Como metodologia foi realizada uma coleta de dados, o desenvolvimento de um projeto em 3D e a construção do dispositivo de fixação que consiste na maior parte do trabalho em questão.

- Soldagem: O processo de soldagem das mesas não foi detalhado.
- Resultados: Como resultados, os autores descrevem que houve uma melhora do tempo de produção e consequentemente, dos custos com a soldagem. Do processo de soldagem aplicado manualmente para o aplicado roboticamente, houve uma melhora de tempo de 82,9% e, em relação aos custos, que os autores não detalharam, houve um decréscimo de 75,7%. Em relação ao processo de fabricação das mesas como um todo, os resultados de melhoria em termos de tempo podem ser analisados na Tabela 10.

Tabela 10 – Tempo de Produção Final

Processo	Diferença (Min. : seg.)	Diferença (Min. : seg.)	Diferença (%)
Tempo de soldagem manual com porcas sextavadas	144:36	VALOR BASE	VALOR BASE
Tempo com soldagem robótica e rebites sextavados	77:42	66:44	46,00

Fonte: Schlickmann; Alberton; Ribeiro (2019, p.16)

É perceptível que a melhora foi significativa em termos de tempo e em termos de custo, o processo obteve os seguintes resultados conforme Tabela 11.

Tabela 11 – Custos de Produção Final

Processo	Custo (R\$)	Diferença (R\$)	Diferença (%)
Custo com porca sextavada e soldagem manual	259,69	VALOR BASE	VALOR BASE
Custo com rebite sextavado e soldagem robótica	226,62	33,06	12,73

Fonte: Schlickmann; Alberton; Ribeiro (2019, p.16)

Em termos de custo, houve uma diferença de 33,06 reais, para um custo de produção do dispositivo, segundo (SCHLICKMANN; ALBERTON; RIBEIRO, 2019), de 2894 reais. Para descobrir quantas mesas seriam necessárias fabricar para se obter o valor investido, chegou-se no valor de 88 mesas. Segundo os autores, são produzidos nove equipamentos por mês, com três mesas cada, totalizando 27 mesas por mês. O **payback** do investimento realizado, dado pela quantidade de mesas necessárias para cobrir o custo de investimento do dispositivo de fixação dividido pela quantidade de mesas produzidas por mês, é de aproximadamente **quatro meses**.

- Prós: É favorável à substituição do processo aplicado de forma manual, a melhoria no tempo de produção e consequente redução dos custos de soldagem. Mas é possível

a discussão do investimento inicial do robô, que não foi abordada pelos autores, e que a empresa dispunha previamente. Outro ponto positivo é relativo ao manuseio da peça, que, devido à suas dimensões relativamente grandes, dificultava o trabalho do soldador.

- **Contras:** Os autores não citam pontos negativos à substituição da soldagem aplicada manualmente, mas conforme citado nos prós, o investimento do robô, se fosse levado em consideração para análise do *payback*, poderia elevar o tempo de forma a não ser mais viável para uma produção relativamente pequena (27 peças) com um custo relativamente baixo (226,62 reais).

4.10 Artigo: Análise Comparativa do Custo do Ciclo de Vida da Substituição por Robô: Um Caso de Produção de Soldagem Automotiva na China (ZHAO; WU; LIU, 2021)

- **Contextualização:** O trabalho consiste na análise dos custos do ciclo de vida (*Life Cycle Cost - LCC*) para a substituição da soldagem tradicional, ou seja, aplicada manualmente pela aplicada de forma automática flexível em uma indústria automotiva chinesa. Os autores pontuam que, além do investimento inicial, o custo durante o ciclo de vida do robô também é igualmente importante. Para realizar a comparação, (ZHAO; WU; LIU, 2021) fazem uma extensa análise da literatura para a estrutura de custos de ciclo de vida e classificam os custos associados ao uso de robôs e aos associados ao uso da soldagem tradicional, conforme mostrado na Tabela 12].

Os autores definem o custo total da produção robótica (CR) e o custo total da produção tradicional (CT) como a soma de todos os custos apresentados na Tabela 12 respectivos a cada modo de aplicação. Levando em conta a produção, eles definem o Custo Atual para cada aplicação (*Actual Cost - ACR e ACT*), que é a divisão dos custos de produção pela quantidade de produtos produzidos. A fim de verificar se um processo é superior ao outro, eles também definem o coeficiente de substituição (*Substitution Coefficient - SCRT*), que é a divisão do custo atual tradicional (ACT) pelo custo atual robótico (ACR).

Tabela 12 – Estrutura de Custos de Ciclo de Vida (LCC) para Dois Modos de Fabricação (Adaptada e Traduzida)

Produção com Robô Industrial (CR)		Produção Tradicional (CT)	
Custo de Investimento (CRI)	Preço do equipamento	Custo de Gerenciamento (CTM)	Despesa com recrutamento
	Custo de transação		Despesa com treinamento
	Juros de empréstimo		Despesa com proteção trabalhista
	Tributos menos subsídios		Despesa de escritório
Custo Operacional (CRO)	Taxa de pós-venda	Custo de Compensação (CTC)	
	Remuneração do operador		Salário base
	Despesa com treinamento		Bônus por desempenho
	Gasto com ritmo de produção		Hora extra
	Custo de acessórios		Subsídio de trabalho
Custo de Manutenção (CRM)	Consumo de energia	Custo de Bem Estar (CTW)	
	Taxa de serviço		Encargos com seguridade social
	Custo de substituição de peças		Fundo de habitação
	Despesa com consumíveis		Fundos sindicais
Custo de Descarte (CRD)	Taxa de inspeção anual	Custo Operacional (CTO)	Despesas de bem-estar diário
			Depreciação de equipamentos
			Manutenção de equipamentos
Custo Intangível (COR)	Despesas com demolição menos valor residual	Custo Intangível (COT)	Consumo de materiais
			Consumo de energia
			Gasto com ritmo de produção
			Amortização de ferramentas
Perda por ociosidade da produção		Perda por ociosidade da produção	
Perda de eficiência do produto		Perda de eficiência do produto	
Perda por defeitos no produto		Perda por defeitos no produto	

Fonte: Zhao; Wu; Liu (2021, pag.7)

Segundo (ZHAO; WU; LIU, 2021), todas as despesas consideradas durante todo o ciclo de vida devem se relacionar com o valor monetário vigente antes de serem calculadas, e para tal utilizou-se o valor presente líquido, NPV, mas eles não detalharam qual foi a taxa de desconto considerada para o caso analisado. Uma análise importante realizada pelos autores, que não foi abordada pelos estudos anteriores, foram os custos devido ao tempo ocioso e perda de produtividade, que, junto ao custo de qualidade, foram definidos nos chamados custos intangíveis (COR para aplicação robótica e COT para manual). Esses custos intangíveis são constituídos da taxa de perda por ociosidade (r_I), taxa de perda por eficiência (r_E), taxa de produto não conforme (r_U) e taxa de valor agregado (r_V).

Após a coleta dos dados da empresa analisada, foi realizada uma análise comparativa da substituição da soldagem aplicada manualmente pela robotizada e, após, os autores realizaram uma simulação de mais casos, alterando a flutuação da escala de produção, o aumento dos custos de mão de obra e a quantidade de robôs utilizados na produção com robôs industriais e de trabalhadores da linha de frente na produção tradicional. Com a simulação, os autores estenderam o cenário da pesquisa utilizando um software de simulação e fizeram análises gráficas e comparativas.

- Soldagem: O processo analisado é referente a um processo fabril que apresenta os dois tipos de métodos de aplicação da soldagem, primeiramente robótico para as

partes externas do veículo e manual para as partes internas. Todavia, a soldagem realizada para esse estudo de caso não é MIG/MAG, mas sim, soldagem por resistência elétrica. Logo, deve-se considerar que o custo operacional (CRO e CTO) deve levar em conta o arame eletrodo, os bicos de contato e o gás de proteção em uma aplicação que utilize esse tipo de soldagem. São utilizados para a linha de produção automática 15 conjuntos de robôs industriais, operados por cinco engenheiros e responsáveis pela soldagem de 2454 pontos. Enquanto que para a linha manual são empregados 50 soldadores divididos em cinco times com disponibilidade de 20 máquinas de solda por ponto, responsáveis pela soldagem de 1418 pontos. Segundo os autores, as atribuições dos robôs e dos soldadores, bem como a qualidade exigida das soldas, são praticamente as mesmas. O custo de cada conjunto de robô é de 600 mil CNY (Yuan Chinês) e de cada máquina de solda a ponto por 27 mil CNY. O tempo de uso desses dois equipamentos foi de 14 anos, do período de 2006 a 2019.

- Resultados: Os dados coletados e calculados foram sintetizados na Tabela 13.

Tabela 13 – Análise Comparativa da Produção Robotizada e Tradicional (Traduzida)

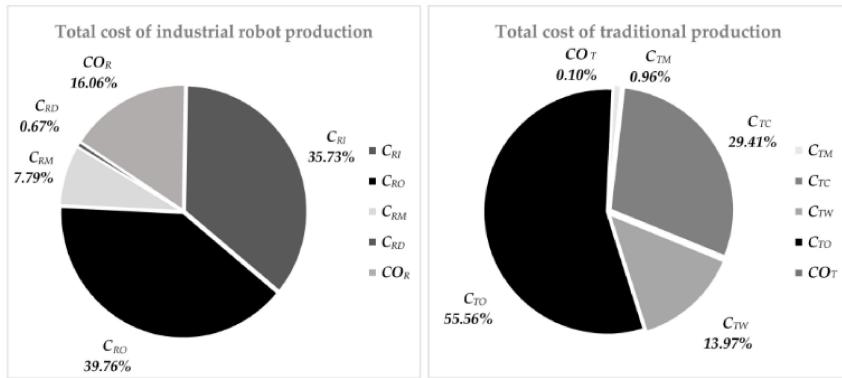
Categoria	Produção com Robô Industrial	Valor	Produção Tradicional	Valor	Unidade
Produção Total	Carros	665.248	Carros	665.248	Veículo
	Soldas/veículo	2.454	Soldas/veículo	1.418	Peça
	QR	1.632.518.592	QT	943.321.664	Peça
	CRI	14.595.221,08	CTM	700.062,84	CNY
	CRO	16.242.726,13	CTC	21.392.950,98	CNY
	CRM	3.180.830,59	CTW	10.161.651,25	CNY
	CRD	272.648,91	CTO	40.418.716,83	CNY
	CAR	34.291.426,72	CAT	72.673.381,90	CNY
Custo Total	rI	0,47	rI	0	Taxa
	rE	0,04	rE	0,028	Taxa
	rU	0,00	rU	0,008	Taxa
	rV	0,37	rV	0,029	Taxa
	COR	6.561.502,17	COT	75.249,26	CNY
	CR	40.852.928,89	CT	72.748.631,16	CNY
Eficiência de Custo	ACRI	0,89	ACTM	0,07	Centavos/Peça
	ACRO	0,99	ACTC	2,27	Centavos/Peça
	ACRM	0,20	ACTW	1,08	Centavos/Peça
	ACRD	0,02	ACTO	4,29	Centavos/Peça
	ACAR	2,10	ACAT	7,7	Centavos/Peça
	ACOR	0,39	ACOT	0,02	Centavos/Peça
	ACR	2,49	ACT	7,72	Centavos/Peça

Fonte: Zhao; Wu; Liu (2021, p.11)

Dos termos que constam na tabela, os únicos que não foram apresentados pelos autores são CAR, CAT, ACAR e ACAT, mas são em essência a soma dos termos anteriores a eles. É perceptível que, para uma mesma quantidade de veículos produzidos e para uma quantidade superior de soldas realizadas de forma automática, o custo total é inferior para a aplicação robotizada em relação à manual ($CR < CT$).

A porcentagem dos custos individuais em relação aos custos totais pode ser vista na Figura 21.

Figura 21 – Comparaçao dos Custos Totais



Fonte: Zhao; Wu; Liu (2021, p.10)

Para a produção robotizada (à esquerda), tem-se que os maiores custos são operacionais (CRO), com uma porcentagem de 39,76% e custos de investimento (CRI), com uma participação de 35,73%. Já para a produção tradicional, os maiores custos também são operacionais (CTO), representando 55,56% do total e o segundo maior, custos com compensação (CTC), com uma parcela de 29,41%. Um detalhe a ser ressaltado é que os custos intangíveis (COR) são uma parcela considerável da aplicação robótica, com 16,06%, enquanto que para a aplicação manual representam 0,1% do custo.

Segundo os autores, a aplicação robótica gera altos custos fixos e baixos custos variáveis em comparação ao modo manual. Além disso, a produção com robô industrial possui uma grande proporção de custos intangíveis (COR), o que indica que a flexibilidade relativamente baixa leva a perdas potenciais significativas.

Os autores também analisaram todas as taxas que compõem o COR. Em se tratando da taxa de valor agregado (rV), os robôs superam em 13 vezes o trabalho tradicional, significando uma maior produção. Relativo à taxa de ociosidade (rI), a aplicação robotizada apresenta um valor maior, que, segundo os autores, justifica-se devido ao nível de automação e manuseio manual das máquinas para soldagem, que é mais fácil. Quanto ao custo de qualidade (rU), é oito vezes maior para o processo de modo manual, significando uma perda potencial de nível de qualidade grande. Uma razão, segundo (ZHAO; WU; LIU, 2021), para esses valores é a diferença de qualidade entre os turnos de trabalho, considerada pior para os turnos da noite. Por fim, sobre a taxa de eficiência (rE), os robôs apresentam um valor maior devido à razão entre o tempo de falha e o tempo programado para funcionamento da máquina na produção manual ser menor do que na produção com robôs industriais, o que implica em maior disponibilidade.

Segundo os pesquisadores, em termos da eficiência do custo, o ACR é menor que o ACT, (2,49 contra 7,72), ou seja, o custo total (CR e CT) das duas formas de

aplicação dividido pelas quantidades de soldas realizadas, destacando a significativa competitividade da produção com robôs industriais. O coeficiente de substituição (SCRT) resultante foi de 3,1, o que significa que o custo com a linha de montagem tradicional, considerando a quantidade de soldas realizadas, que é inferior à quantidade realizada pelo processo de modo robótico, é cerca de 3 vezes maior para o processo de soldagem aplicado manualmente.

Outro ponto que os autores frisaram foram os custos relativos à mão de obra, que para o processo aplicado manualmente, foram os custos atuais de compensação (ACTC), de 2,27 centavos por peça, e os custos atuais de bem-estar (ACTW), de 1,08 centavos por peça. Segundo ele, esses custos são muito superiores ao valor de 0,89 centavos por peça do custo atual de investimento inicial (ACRI) e isso mostra que o investimento em robôs industriais é diluído ao longo do seu ciclo de vida, apresentando uma forte vantagem de custo em relação ao uso da força.

Analizando o custo de operação atual e o custo de manutenção atual para o processo tradicional (ACTO e ACTM), tem-se que são muito superiores aos mesmos custos para a produção com robôs (ACRO e ACRM). Os pesquisadores justificam que os robôs apresentam um custo de uso inferior em todo o ciclo de vida em relação aos métodos manuais de soldagem.

Em se tratando da análise dinâmica dos custos, segundo os pesquisadores, os custos atuais de manutenção (ACTM) tendem a aumentar ao final do ciclo de vida, com o desgaste dos equipamentos.

Os autores também evidenciam que uma das motivações principais para o uso dos robôs é a crescente valorização do trabalho dos soldadores, enquanto os custos para aquisição de robôs estão se tornando mais competitivos. O efeito desse processo, segundo os autores, é mais proeminente em países desenvolvidos do que em relação a países em desenvolvimento, com um salário inferior para os trabalhadores.

Além disso, para a substituição do processo aplicado manualmente pelo aplicado roboticamente, é necessário dispendar muitos recursos, como o capital inicial, treinamentos dos operadores e é necessária uma integração total dos robôs na linha de produção. Segundo o autor, há casos onde o custo de implementação dos robôs é igual ao preço de investimento do robô em si. Portanto, em comparação com as empresas que mantêm a manufatura tradicional, as empresas que optam pela substituição por robôs devem ter uma escala maior, um capital maior e uma estratégia melhor desenvolvida para gerenciar esses recursos.

Concluindo as discussões, segundo os autores, os riscos associados aos robôs são essencialmente a baixa flexibilidade, alto custo de investimento, tempo de ociosidade, obsolescência programada e a confiabilidade dos robôs. Essa baixa flexibilidade está relacionada ao fato de que o lucro proveniente dos robôs vem da diminuição dos

custos com mão de obra, de um determinado ativo fixo. Portanto, em caso de um ambiente de trabalho volátil, os robôs têm uma menor adaptabilidade em relação à força de trabalho manual. Para o alto custo de investimento, ele não consegue vencer a baixa produção e a depreciação dos ativos fixos no início do ciclo de vida, o que resulta em uma eficiência de custo menor. Quanto à obsolescência, como os robôs são projetados para tarefas específicas, eles correm riscos de rapidamente ficarem obsoletos. Em relação à ociosidade, o processo aplicado roboticamente corre mais riscos, seja por causa de uma mudança no mercado ou por uma decisão gerencial errada. Por fim, em se tratando de confiabilidade, os robôs, como equipamentos complexos, podem sofrer falhas devido a problemas como falha de componentes, problemas no software e erros operacionais. Consequentemente, uma falha em uma linha robotizada pode comprometer toda a produção de uma fábrica, seja por causa do robô ou de seu operador. Logo, confiabilidade é um fator mais importante para o processo aplicado automaticamente.

- Prós: De todos os pontos apresentados anteriormente, em síntese, os principais a favor da substituição da soldagem aplicada roboticamente pela manualmente são: maior produtividade, como pode ser observado pela maior quantidade de soldas em um menor custo, cerca de três vezes menor para o caso apresentado; maior qualidade final, sendo oito vezes maior que a aplicação manual e menos influenciável por fatores humanos (como cansaço); melhor eficiência, por falharem menos em relação à quantidade de tempo produzido; custo de investimento diluído completamente ao longo do ciclo de vida e em queda com a competitividade do mercado, enquanto que para a produção tradicional a mão de obra têm valorizado; menores custos variáveis (como custos de bem-estar - CTC) e custos de gerenciamento (CTM); menor custo de uso em todo o ciclo de vida;
- Contras: Os principais fatores contrários à substituição da soldagem aplicada manualmente pela robótica são: maior custo de investimento, que, segundo os autores, são custos fixos elevados, que podem não ser vencidos com uma baixa produção; maior custo de manutenção à medida que os robôs vão deprecando, principalmente nos anos finais de uso; maior complexidade de investimento, exigindo um capital elevado e uma melhor organização interna; maior risco de ociosidade devido a mudanças no mercado; maior risco de obsolescência; maior risco de interrupção da linha de montagem devido à complexidade dos equipamentos.

4.11 Artigo: Automação do Processo de Soldagem Manual Semiautomático GMAW Vi- sando Melhoria da Qualidade do Produto (SOARES; NASCIMENTO; TEIXEIRA, 2016)

- Contextualização: A pesquisa apresenta um estudo de caso sucinto que foi realizado em uma empresa de motocicletas do polo industrial de Manaus, no Brasil. Segundo (SOARES; NASCIMENTO; TEIXEIRA, 2016), o processo de soldagem aplicado de forma manual apresentou alguns defeitos, dos quais 60% são correlacionados com o processo de soldagem, que foram categorizados pelo autor.

Referente ao deslocamento do cordão de solda corresponde a uma parcela de 8% e verificou-se que houve desatenção e influência de fadiga na condução da tocha. Também foi observado que houve dificuldade na localização da junta a ser soldada e erro de posicionamento das peças no dispositivo de fixação. Portanto, todas as falhas com origem no trabalho manual.

Relativos a defeitos de mordedura, de 12% de participação, os parâmetros de soldagem, como corrente e tensão, estavam irregulares. O motivo principal era que, para realizar as soldas de forma mais rápida, os soldadores aumentavam os valores dos parâmetros. Como segundo motivo, a fadiga e a desatenção eram responsáveis por fazer com que o soldador variasse a velocidade de soldagem e o distanciamento da peça.

Em relação a furos e à porosidade na solda, 20% de defeitos cada, advindos do mal posicionamento no dispositivo de fixação, parâmetros de soldagem incorretos e falha na proteção gasosa. As falhas de proteção são advindas do distanciamento excessivo para realizar as soldas por parte do soldador e de correntes de ar, que os autores não detalharam mais. Foi observado que o dispositivo de fixação era pneumático, mas não apresentava nenhum sensor de posição, por isso, era possível a fixação errada das peças. Como solução para a problemática como um todo, foram utilizados dois robôs para realizar a soldagem e uma mesa giratória, com dois dispositivos de fixação em cada lado. A mesa e os dispositivos apresentam sensores de posição para evitar o posicionamento errado. Enquanto os robôs realizam o processo de soldagem, o operador retira as peças soldadas, posiciona as novas e assim o ciclo se repete.

- Soldagem: O processo de soldagem aplicado manualmente é o MIG/MAG e a peça em questão a ser soldada é o tanque de combustível, conforme Figura 22.

Figura 22 – Cordões de Solda no Tanque

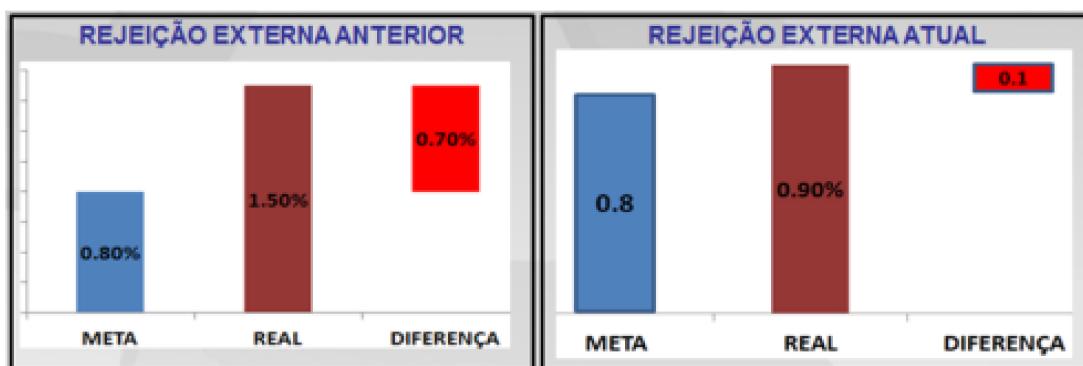


Fonte: Soares; Nascimento; Teixeira (2016, p.2)

A configuração do processo conta com arame de 1,0 mm, corrente entre 110 e 160 A, tensão entre 12 e 17 V e gás de proteção 92% de Argônio (*Ar*) e 8% de dióxido de carbono (*CO₂*). Para o processo aplicado roboticamente, os autores citam o uso do arame BME-BE17Os, mas não citam o diâmetro. Para os parâmetros de soldagem, são estabelecidas a faixa de corrente de 130 a 170 A e tensão de 13 a 18 V. O gás de proteção permanece o mesmo.

- Resultados: A relação do percentual de defeitos anteriores à substituição e os atuais pode ser vista na Figura 23.

Figura 23 – Comparação do Percentual de Defeitos



Fonte: Soares; Nascimento; Teixeira (2016, p.5)

A porcentagem de rejeição anterior foi avaliada três meses antes da substituição e a rejeição atual, três meses após a substituição.

Segundo (SOARES; NASCIMENTO; TEIXEIRA, 2016), o tempo de processo aplicado roboticamente é de 32 segundos, mas o autor não explicitou o tempo de processo aplicado manualmente. O investimento inicial foi de **250 mil reais** e o retorno do investimento, *payback*, de **2,5 anos**. Foram reduzidos dois funcionários do processo, e o projeto foi concluído em quatro meses.

- Prós: Os pontos que podem ser relevados do estudo em questão a favor da substituição são: menor ocorrência de defeitos para o modo de aplicação robótico, o que

resulta em um gasto menor com recuperação e descarte de peças, como citado pelos autores; o tempo mínimo de produção de peças do processo é atingido com apenas um operador. Considerando um possível ponto a favor, é o menor risco de falha da solda, portanto, um possível menor custo com indenizações, mas não suplementado por dados, apenas hipotético.

- **Contras:** O principal ponto negativo em relação à substituição em termos de custo é o alto investimento. O *payback* do investimento é considerado curto pelos autores, mas esse é um parâmetro que depende das dimensões e disponibilidade de recursos das empresas, portanto não pode ser generalizado. Em termos sociais, a redução de dois funcionários pode ser considerada negativa, mas só implica em termos de custo em se tratando da rescisão.

4.12 Síntese dos Prós e Contras

Retomando o objetivo do presente trabalho, a avaliação dos prós e contras dar-se-á em termos de custo da operação. Esses custos, conforme conceituados no Cap.1, são observados em termos de tempo, em termos físicos e em termos humanos. Quando não explicitados, serão considerados custos implícitos, pois não são observados imediatamente, mas apresentam correlação monetária.

É importante ressaltar que o significado de um pró e contra pode ser relativo, visto que é necessário considerar o contexto do problema analisado, como o país, a moeda, a valorização da mão de obra, as tecnologias empregadas, o tipo de produção, o tamanho das empresas, entre outros.

Os países abrangidos pelas pesquisas foram:

- Américas: Brasil (estudo 4.6, 4.7, 4.9, 4.11) e Estados Unidos (estudo 4.2, 4.3, 4.4)
- Europa: Espanha (estudo 4.1), Noruega (estudo 4.5) e Polônia (estudo 4.8)
- Ásia: China (estudo 4.10)

Os resultados encontrados para os prós e contras atrelados aos estudos analisados podem ser vistos na Tabela 14.

Tabela 14 – Síntese dos Prós e Contras dos Estudos Analisados

Estudo	Prós	Contras	Termos de Custo (Físicos, Tempo, Sociais)
4.1	Retorno de investimento rápido; redução do tempo de produção; geração de empregos; menores taxas de emissão de carbono	Alto custo de investimento inicial; rescisão de trabalhadores para a aplicação manual	Payback = 2,04 anos; ROI = 45,08%; NPV = 397534 euros; IRR = 34,42%; investimento Inicial: 462 mil euros; redução do tempo de produção: >80%; redução das emissões de carbono = 91,33%
4.2	Operação por longos períodos de tempo com qualidade de trabalho; maior produção de peças	Alto custo de investimento inicial, não citado valores;	Tempo de soldagem (Robô) = 6 horas em 80% do tempo; tempo de soldagem (Soldador) = 6,5 horas em 50% do tempo; n° de peças produzidas = 199/dia (soldador) e 318/dia (Robô)
4.3	Treinamento do soldador para se tornar o operador; maior eficiência em termos de tempo	Mais econômico para um maior volume de produção	Quantidade de peças a serem produzidas roboticamente para o processo se tornar mais econômico que manualmente: 1930
4.4	Menor tempo de produção de peças; não apresenta variações na produção devido à fadiga e cansaço	Mais econômico para um maior volume de produção	Quantidade de peças a serem produzidas roboticamente para o processo se tornar mais econômico que manualmente: 240
4.5	Custo com os robôs inferior ao custo da mão de obra no país (Noruega); programação facilitada, permitindo flexibilidade sem exigir treinamento extensivo; aplicação híbrida (manual e robótica)	Não se aplica a países com mão de obra relativamente barata	O autor somente cita que houve melhora no tempo de produção, mas não apresenta valores
4.6	Rápido retorno de investimento; melhor controle do arco, reduzindo defeitos causados pelo soldador; menores gastos com retrabalho; menores gastos com materiais de consumo (arames, gás de proteção e bicos de contato); menores gastos com energia elétrica	Alto custo de investimento inicial; aplicável apenas em produção em cadeia	Payback = 2,1 anos; investimento inicial: 1,04 milhões de reais; redução anual de custos: 486,592 mil reais; custos com retrabalho: 18,73 mil reais por ano
4.7	Melhor qualidade dos cordões de solda; menor tempo de produção de peças;	Necessidade de um operador por turno	Melhoria do tempo de produção de peças: 22,04 minutos para 6,14 minutos
4.8	Maior produção de peças; melhor qualidade dos cordões de solda; rápido retorno do investimento	Maior gasto de energia que a aplicação manual; maior custo para a mesma quantidade de peças produzidas manualmente ou roboticamente	Payback: 1 ano para ambas aplicações, com aplicação robótica atingindo mais rápido que a manual; investimento inicial: 420 mil PLN
4.9	Melhoria no tempo de produção; melhor manuseio da peça de trabalho	Tempo de payback muito elevado caso considerasse o custo de investimento inicial do robô	Payback: 4 meses; melhoria no tempo de soldagem 82,9%; melhoria no tempo final de produção: 46%
4.10	Maior produção de soldas por quantidade de peças a um menor custo; melhor qualidade final do produto; melhor eficiência do processo; diluição do custo de investimento em todo ciclo de vida do robô; menores custos variáveis; menor custo de uso em relação ao ciclo de vida	Maior custo de investimento; maior custo de manutenção ao final do ciclo de vida; maior complexidade do investimento; maior risco de ociosidade; maior risco de obsolescência; maior risco de interrupção do processo fabril	Investimento Inicial: Aproximadamente 15 milhões de CNY (Automático) contra 700 mil CNY (Manual); custo ao final de 15 anos (Automático): Aproximadamente 41 milhões de CNY; custo ao final de 15 anos (Manual): Aproximadamente 73 milhões de CNY
4.11	Menor ocorrência de defeitos; menor gasto com recuperação e descarte de peças; tempo de produção de peças mínimo atingido com menos efetivo de trabalhadores; menor risco de falha da peça soldada; rápido retorno do investimento	Alto valor de investimento; rescisão de trabalhadores	Payback: 2,5 anos; investimento inicial: 250 mil reais;

Fonte: O autor

Discutindo brevemente os resultados encontrados, depreende-se que há vantagens a favor da substituição do processo MIG/MAG aplicado manualmente pelo processo aplicado

automaticamente, das quais a mais citada, foi o menor tempo de produção, o que resultou em uma maior quantidade de peças produzidas em um mesmo intervalo de tempo. Isso aumentou o lucro das empresas analisadas, além dos ganhos em termos qualitativos, visto que a repetibilidade dos robôs é muito alta, ou seja, a capacidade de realizar as operações com pouca variação.

Não obstante, referente à aplicação manual, os argumentos mais encontrados contrários ao uso desse modo foram a qualidade das soldas, afetada pela fadiga e cansaço dos soldadores, e o tempo de fabricação mais elevado que o dos métodos automáticos. Outro argumento que não foi apresentado nos estudos de caso, mas advém do primeiro uso do robô na indústria (*Unimate*) é referente à preocupação com os trabalhadores, em caso de aplicações que apresentam risco à saúde.

No entanto, deve-se considerar que os estudos apresentaram casos de médias e grandes empresas que trabalham com linhas de produção em cadeia e com um grau de estruturação mais elevado, enquanto que para pequenas empresas, que trabalham com maior flexibilidade de serviços, ainda há obstáculos, devido ao alto custo de investimento e à complexidade de aguardar o retorno do investimento. Logo, essa é a maior desvantagem em relação à substituição do método manual de aplicação pelo automático flexível.

Em termos gerais, para as médias e grandes empresas e indústrias, que trabalham com um alto volume de produção e com exceção de locais onde a mão de obra é extremamente barata, é um bom investimento a aquisição e implementação de robôs na linha de manufatura.

Dos estudos, o que apresentou os termos de custo mais completos foi o estudo 4.10, todavia, não aplicado ao processo MIG/MAG. Portanto, a discussão poderia apresentar argumentos mais precisos caso houvesse um estudo aplicado ao processo MIG/MAG com uma abordagem de todo o ciclo de vida de um método de aplicação automático flexível.

Dos casos apresentados no Brasil, todos são referentes à linhas de produção e três (4.6;4.7 e 4.11) são referentes à indústria automobilística (dois de veículos de uso comum e um de uso agrícola).

5 CONCLUSÃO

Nessa monografia foram avaliados os prós e contras da substituição da soldagem aplicada manualmente pela soldagem aplicada roboticamente em termos de custo da operação, através da análise de diversos documentos acadêmicos, com enfoque nos estudos de caso apresentados.

Da metodologia aplicada e com base nos resultados discutidos, foi possível a avaliação em diversos contextos do que torna um determinado argumento favorável à substituição, bem como do que o torna contrário em termos de custo. Os principais termos de custo encontrados nas pesquisas foram o investimento inicial e o tempo de retorno do investimento, *payback*.

Do estudo como um todo, pode-se concluir que é viável e lucrativa a substituição dos métodos de aplicação manual pelo robótico em algumas situações e não é possível ou justificada em outras. São, portanto, os pontos mais importantes encontrados:

- O contexto de onde se deseja realizar a substituição, se é um país cuja mão de obra é relativamente barata; se é uma empresa de pequena, média ou grandes proporções; se a aplicação apresenta riscos à saúde e à vida do soldador;
- O maior contra à substituição é o custo de investimento inicial, que é elevado e a aquisição apenas do(s) robô(os) corresponde a uma parcela muito grande do investimento;
- O maior pró a favor da substituição é o aumento na produção e na qualidade dos produtos;
- O tempo de *payback*, quando considerado o custo do robô, é em média de 2 anos;

A maior limitação do estudo é referente aos dados dos casos analisados, visto que são de difícil obtenção, muitos, inclusive, de alta confidencialidade das empresas. Dos estudos avaliados no Brasil, não foi obtido nenhum dado referente ao ciclo de vida completo de um robô em um processo de soldagem MIG/MAG. Portanto, sugestões futuras para complementação do estudo envolvem a aquisição de dados contínuos para a realidade brasileira; uma avaliação detalhada em termos de custo como NPV, ROI e IRR e principalmente, de fatores não detalhados nos estudos, como rescisões, indenizações e dos custos com uma mão de obra mais qualificada que assegura o funcionamento dos sistemas de fabricação flexíveis.

Referências

- ALMEIDA, M. B. *Noções básicas sobre Metodologia de pesquisa científica*. 2025. Disponível em: <<http://mba.eci.ufmg.br/downloads/metodologia.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- ASDS. *Materials and Material Processes Series: Arc welding*. WASHINGTON, D.C. 2030L.: U.S. Government Printing Office, 1968.
- AWS. *AWS A3.0M/A3.0:2010 Standard Welding Terms and Definitions*: Including terms for adhesive bonding, brazing, soldering, thermal cutting, and thermal spraying. 12. ed. 550 N.W. LeJeune Road, Miami, FL 33126: American Welding Society, 2010.
- BRITO, J. de D.; PARANHOS, R. *Como Determinar os Custos da Soldagem*. 1. ed. Rio de Janeiro: Ronaldo Paranhos, 2005.
- CAMPANA, J. C. *Optimisation and simulation of the manufacturing process of train frames by welding*: Report of the project. Dissertação (Mestrado) — Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, 2024.
- DUMONT, C. U. *Otimização do processo de soldagem de assentos veiculares*. Monografia (TCC) — UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS, 2016.
- ENCYCLOPAEDIA, B. *electric arc*. 2025. Disponível em: <<https://www.britannica.com/science/electric-arc>>. Acesso em: 05 abr. 2025.
- FARIA, E. *Dicionário Latino - Português*. 3. ed. Rio de Janeiro: C.N.M.E, 1962.
- FELIZARDO, I.; BRACARENSE, A. Q. Método de aplicação da soldagem: Manual, mecanizado ou automatizado. *XXXII Consolida*, 2006.
- IFR. *Robot History*. Lyoner Strasse 18 60528 Frankfurt/Main, Germany: [s.n.], 2025. Disponível em: <<https://ifr.org/robot-history>>. Acesso em: 03 abr. 2025.
- KAH, P. et al. Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, v. 10, n. 13, 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1186/s40712-015-0042-y>>.
- KONIG, L. *Analysis of a robot welding system and possible concepts for improvement for a Norwegian SME*. Dissertação (Mestrado) — Department of Manufacturing and Civil Engineering: Norwegian University of Science and Technology, 2019.
- MARTINEZ, L.; MALTEZ, M. *O Direito Fundamental à Proteção em Face da Automação*. 2017. Disponível em: <<https://www.jusbrasil.com.br/doutrina/revista-de-direito-do-trabalho-10-2017/1188258504>>. Acesso em: 07 abr. 2025.
- MILLER. *The History of Welding*. 2025. Disponível em: <<https://www.millerwelds.com/resources/article-library/the-history-of-welding>>. Acesso em: 03 abr. 2025.
- MODENESI, P. J.; MARQUES, P. V.; SANTOS, D. B. *Introdução à Metalurgia da Soldagem*. Belo Horizonte: [s.n.], 2012.

MYSOR, P. P. *Comparative Study of Robotic and Manual Welding in A Low Volume-High Mix Manufacturing Environment: Case study of jr test 2*. Dissertação (Mestrado) — Minnesota State University, Mankato, 2024.

PEREIRA, A. S. et al. *Metodologia da pesquisa científica [recurso eletrônico]*. Rio Grande do Sul: [s.n.], 2025. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/15824/Lic_Computacao_Metodologia-Pesquisa-Cientifica.pdf?sequence=1>. Acesso em: 10 abr. 2025.

POTHAMSETTI, S. S. *Comparative Study of Robotic and Manual Welding in A Low Volume-High Mix Manufacturing Environment: Case study of lift ring*. Dissertação (Mestrado) — Minnesota State University, Mankato, 2024.

PRIBERAM. *Robô*. 2008–2025. Disponível em: <<https://dicionario.priberam.org/rob%C3%B3>>. Acesso em: 03 abr. 2025.

RESTECKA, M.; WOLNIAK, R. Comparison of manual and robotic mag welding-related costs and efficiency in terms of quality and social factors. *Materials Science and Welding Technologies*, v. 62, n. 2, 2018. Disponível em: <[10.17729/ebis.2018.2/2](https://doi.org/10.17729/ebis.2018.2/2)>.

SCHLICKMANN, H.; ALBERTON, D.; RIBEIRO, L. C. F. *Dispositivo Padrão De Fixação Para Soldagem Robótica – Produção Mesa De Ar Para Máquinas De Trabalhar Madeira*. 2019. Disponível em: <https://www.fucap.edu.br/dashboard/biblioteca_repositorio/e22f957a36bc275bc2c1601f1a26a63c.pdf>.

SCIENCE; MUSEUM, I. *Programming patterns: The story of the jacquard loom*. 2019. Disponível em: <<https://www.scienceandindustrymuseum.org.uk/objects-and-stories/jacquard-loom>>. Acesso em: 02 abr. 2025.

SCOTTI, A.; PONOMAREV, V. *Soldagem MIG/MAG: melhor entendimento, melhor desempenho*. 2. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

SOARES, J. C. F.; NASCIMENTO, A. J. de L.; TEIXEIRA, F. G. M. *Automação do processo de soldagem manual semiautomático GMAW visando melhoria da qualidade do produto*. 2016. Disponível em: <<https://www.confea.org.br/midias/uploads-imce/contecc2016/mecanica/automa%C3%A3o%20do%20processo%20de%20soldagem%20manual%20sema%C3%A1tico%20gmaw%20visando%20melhoria%20da%20qualidade%20do%20produto.pdf>>.

SRINIVASAMURTHY, M. *Comparative Study of Robotic and Manual Welding in A Low Volume-High Mix Manufacturing Environment: Case study of jr test 3*. Dissertação (Mestrado) — Minnesota State University, Mankato, 2024.

STANFORD. *Robotics: A Brief History*. s.d. Disponível em: <<https://cs.stanford.edu/people/eroberts/courses/soco/projects/1998-99/robotics/history.html>>. Acesso em: 02 abr. 2025.

WIDZ, J. A. *Implantação de Processo de Soldagem Robotizado em um Conjunto de Peças*. Monografia (TCC) — FACULDADE HORIZONTINA, 2018.

YVINEC, K. *Uma Investigação sobre a Prioridade da Invenção do Processo de Soldagem a Arco Elétrico*. Monografia (TCC) — Universidade Federal de Uberlândia, 2021.

ZHAO, X.; WU, C.; LIU, D. Comparative analysis of the life-cycle cost of robot substitution: A case of automobile welding production in china. *Symmetry*, v. 13, n. 2, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/sym13020226>>.