

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS – *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

João Victor Pereira Ferreira

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA
CÉLULA DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
(WAAM)**

Betim

2026

JOÃO VICTOR PEREIRA FERREIRA

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA
CÉLULA DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO
(WAAM)**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

F383d Ferreira, João Victor Pereira

Desenvolvimento de um sistema de automação para célula de manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM) / João Victor Pereira Ferreira. – 2026.

69 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos

1. Manufatura aditiva. 2. Soldagem. 3. Processos de fabricação. 4. Engenharia de Controle e Automação. I. Ferreira, João Victor Pereira. II. Título.

CDU: 658.62

João Victor Pereira Ferreira

DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE AUTOMAÇÃO PARA CÉLULA DE MANUFATURA ADITIVA POR DEPOSIÇÃO A ARCO (WAAM)

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais Campus Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação.

Aprovado em: 02/07/2026 pela banca examinadora:



Documento assinado digitalmente
GUSTAVO LOBATO CAMPOS
Data: 03/07/2026 08:26:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gustavo Lobato Campos (Orientador) – IFMG *Campus* Betim



Documento assinado digitalmente
ARTHUR HERMANO REZENDE ROSA
Data: 03/07/2026 14:38:45-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Arthur Hermano Rezende Rosa – IFMG *Campus* Betim



Documento assinado digitalmente
WEMERSON FELIPE DA SILVA
Data: 03/07/2026 15:04:11-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Eng. Wemerson Felipe da Silva

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde, pela força nos momentos difíceis e por sempre me guiar ao longo dessa caminhada. Aos meus familiares, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio, compreensão e amor incondicional. Em especial, agradeço aos meus pais e aos meus avós, que foram fundamentais em toda a minha trajetória acadêmica. Seu incentivo constante aos estudos, seus conselhos e sua confiança foram essenciais para que eu chegasse até aqui. Por fim, expresso minha sincera gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste sonho, seja com palavras de encorajamento, apoio prático, ensinamentos ou simplesmente acreditando em mim. Agradeço especialmente a todos os professores que fizeram parte da minha formação, por compartilharem seus conhecimentos com dedicação ao longo da jornada acadêmica. Em particular, sou grato ao meu orientador, pelo suporte técnico, pelas orientações valiosas e pela confiança durante o desenvolvimento deste trabalho.

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de automação aplicado a uma célula de *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM), técnica de manufatura aditiva baseada em processos de soldagem por arco elétrico. A proposta visa o monitoramento em tempo real de variáveis críticas da operação, como corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame (WFS) e vazão de gás, com o objetivo de ampliar o controle sobre a execução. O sistema desenvolvido integra sensores industriais e uma interface de supervisão dedicada à coleta e análise dos dados operacionais, buscando aumentar a robustez operacional e a repetibilidade na fabricação de peças metálicas. Os testes realizados demonstraram ganhos relevantes na estabilidade da execução, validando o potencial da automação como ferramenta para elevar a qualidade e o desempenho técnico da célula WAAM. Como também, o projeto apresenta viabilidade prática e econômica, especialmente para setores industriais que demandam soluções flexíveis e customizáveis.

Palavras-chave: WAAM, automação, repetibilidade, controle de processo, monitoramento, soldagem.

ABSTRACT

This work presents the development of an automation system applied to a *Wire Arc Additive Manufacturing* (WAAM) cell, a metal additive manufacturing technique based on arc welding processes. The proposed system enables real-time monitoring of key process parameters such as current, voltage, wire feed speed (WFS) and shielding gas flow rate, to thus obtain greater control over the process. It integrates industrial sensors and a dedicated supervisory interface for data collection and analysis, aiming to improve accuracy and repeatability in the production of metallic parts. The experimental results showed notable improvements in process stability, validating automation as a strategic tool to enhance the quality and performance of the WAAM cell. The system also stands out for its practical and economic viability, particularly in industrial sectors that require flexible and customizable manufacturing solutions.

Keywords: WAAM, automation, accuracy, repeatability, process control, monitoring, welding.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Demonstração do funcionamento do WAAM	14
Figura 2 - Sistema de automação para célula WAAM.....	16
Figura 3 - Representação da manufatura aditiva metálica	18
Figura 4 - Modelo CAD	19
Figura 5 - Malha triangular da superfície do modelo.....	19
Figura 6 - <i>Slicer</i> em camadas do modelo CAD	20
Figura 7 - Estrutura para realizar solda na metodologia GMAW	20
Figura 8 - Gráfico: Corrente X WFS	22
Figura 9 - Demonstração da tensão de arco no processo.	22
Figura 10 - Configurações de manipuladores robóticos.....	24
Figura 11 - Robô articulado de 6 eixos com graus de liberdade.....	25
Figura 12 - <i>Frames</i> de referências para movimentação dos robôs.....	26
Figura 13 - <i>Teach Pendant</i> fabricante <i>Yaskawa</i>	27
Figura 14 - Estrutura geral de um CLP	29
Figura 15 - Aplicação do CLP como gerenciador de controle.....	31
Figura 16 - Interface <i>Software MasterTool</i> IEC XE.....	32
Figura 17 - Entradas e saídas denominadas no CLP	33
Figura 18 - Linha temporal de evolução da IHM.....	35
Figura 19 - Integração da IHM na rede industrial.....	37
Figura 20 - Fluxo de processos para WAAM com sistemas de automação.....	38
Figura 21 - Sólido a ser fatiado.	41
Figura 22 - Estratégia Perfil	41
Figura 23 - Ambiente CAM.....	42
Figura 24 - Pontos para calibração utilizando o <i>Robot Calib</i>	43
Figura 25 - Cadastro do TCP da tocha de solda.....	44
Figura 26 - Cadastro do <i>user frame</i> com origem no centro da mesa	45
Figura 27 - Exemplo de código de programação manual	46
Figura 28 - Configuração para troca de dados do robô pela rede	47
Figura 29 - Organização de dados por endereço de cada dispositivo.	47
Figura 30 - Árvore do projeto do CLP.....	48
Figura 31 - Exemplo de método de declaração de variáveis utilizado no projeto do CLP	49
Figura 32 - Configuração da rede pelo CLP	50

Figura 33 - Lógica para monitoramento de insumos do processo WAAM	51
Figura 34 - Lógica para monitoramento de temperatura.....	52
Figura 35 - Lógica para aquisição dos valores de tensão e fonte.....	52
Figura 36 - Lógica para gravação de parâmetros em arquivos tipo CSV.....	53
Figura 37 - Lógica de alarmes e notificações do sistema	54
Figura 38 - Tela <i>home</i> da IHM da célula	55
Figura 39 - Tela de visualização dos parâmetros do processo.	55
Figura 40 - Parte de um arquivo CSV salvo durante processo.	58
Figura 41 - Trajetória desenvolvida pelo <i>PowerMill</i> para o <i>Porta Bricks</i>	59
Figura 42 - Comparação de deposições	60
Figura 43 - Trecho do gráfico referente à análise da tensão elétrica em função do tempo de arco aberto.	61
Figura 44 - Trecho do gráfico referente à análise da corrente elétrica em função do tempo de arco aberto.....	62
Figura 45 - Home IHM para visualização geral do processo.....	65
Figura 46 - Monitoramento dos parâmetros específicos durante deposição.	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação do processo antes e depois da automação.....	57
Tabela 2 - Comparação dimensional das peças manufaturadas	60
Tabela 3 - Estatística descritiva dos parâmetros monitorados durante a deposição WAAM....	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> (Manufatura Assistida por Computador)
CLP	Controlador Lógico Programável
CSV	<i>Comma-Separated Values</i> (Valores Separados por Vírgula)
DBCP	Distância do Bico de Contato à Peça
DIN	<i>Digital Input</i> (Entrada Digital)
DOUT	<i>Digital Output</i> (Saída Digital)
FBD	<i>Function Block Diagram</i> (Diagrama de Blocos Funcionais)
GMAW	<i>Gas Metal Arc Welding</i> (Soldagem por Arco com Gás e Eletrodo Metálico)
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i> (Comissão Eletrotécnica Internacional)
IHM	Interface Homem-Máquina
LD	<i>Ladder Diagram</i> (Diagrama de Escada)
MA	Manufatura Aditiva
MADA	Manufatura Aditiva por Deposição a Arco
MIG/MAG	<i>Metal Inert Gas / Metal Active Gas</i> (Gás Inerte Metálico / Gás Ativo Metálico)
PGS	<i>Precision Gas System</i> (Sistema de Gás de Precisão)
SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i> (Supervisão e Aquisição de Dados)
SFC	<i>Sequential Function Chart</i> (Gráfico de Funções Sequenciais)
ST	<i>Structured Text</i> (Texto Estruturado)
STL	<i>Stereolithography</i> (Estereolitografia)
TCP	<i>Tool Center Point</i> (Ponto Central da Ferramenta)
WAAM	<i>Wire Arc Additive Manufacturing</i> (Manufatura Aditiva por Arco com Arame)
WFS	<i>Wire Feed Speed</i> (Velocidade de Alimentação de Arame)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos	17
1.2.1 <i>Objetivo geral</i>	17
1.2.2 <i>Objetivos específicos</i>	17
1.3 Organização do texto	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1 Manufatura aditiva	18
2.2 Manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM)	20
2.2.1 <i>Variáveis do processo GMAW aplicados no WAAM</i>	21
2.3 Robótica industrial	23
2.3.1 <i>Classificação de robôs industriais</i>	24
2.3.2 <i>Frames de referência no espaço de trabalho</i>	26
2.3.3 <i>Programação de robôs</i>	27
2.4 Controladores Lógicos Programáveis (CLP)	28
2.4.1 <i>Estrutura e funcionamento</i>	29
2.4.2 <i>Linguagens de programação e aplicações dos CLPs na indústria</i>	30
2.4.3 <i>Aplicações industriais dos CLPs</i>	30
2.4.4 <i>Comunicação industrial e Softwares de desenvolvimento</i>	32
2.4.5 <i>Etapas de desenvolvimento de projetos com CLP</i>	33
2.5 Interface Homem-Máquina (IHM)	34
2.5.1 <i>Funcionamento: Lógica, Programação e Arquitetura das IHMs</i>	36
2.5.2 <i>Integração com CLP: Possibilidades, Relevância e Benefícios</i>	36
3 METODOLOGIA	38
3.1 Programação do robô	40
3.1.1 <i>Fatiamento e geração de trajetórias com PowerMill</i>	40
3.1.2 <i>Configuração de TCP e frames de referência</i>	44
3.1.3 <i>Programação manual de trajetórias</i>	45
3.1.4 <i>Integração do robô com CLP via rede Ethernet/IP</i>	46
3.2 Programação e estruturação do CLP	48

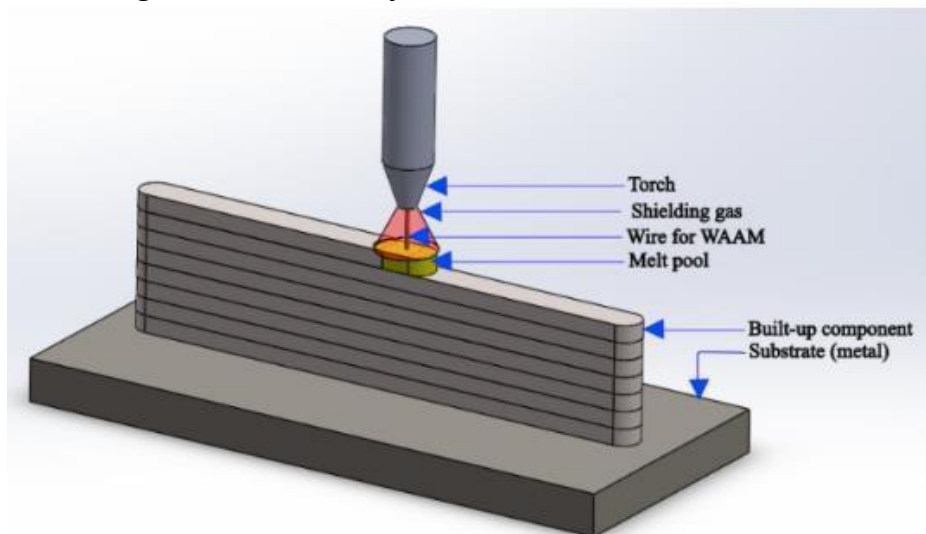
3.2.1 Comunicação com dispositivos industriais.....	49
3.2.2 Lógica de funcionamento.....	50
3.3 Desenvolvimento da interface Homem-Máquina (IHM).....	54
3.3.1 Organização e layout da interface.....	54
3.3.2 Comunicação com o CLP e mapeamento de dados.....	56
3.4 Desafios de integração e implementação.....	56
4 RESULTADOS	57
4.1 Validação do sistema de automação	57
4.1.1 Monitoramento e aquisição de dados.....	58
4.2 Análise da trajetória: programação manual versus geração por <i>software</i>	58
4.3 Análise de parâmetros: tensão e corrente elétrica.	61
4.3.1 Avaliação da estabilidade operacional do processo WAAM.....	63
4.4 Eficiência operacional.....	64
4.5 Interface Homem-Máquina.....	64
5 CONCLUSÃO	66
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

A manufatura aditiva (MA) representa uma ruptura significativa em relação aos processos tradicionais de fabricação, como a fundição. Fundamentada na construção de peças por meio da adição de material camada por camada, a MA permite a criação de peças, sob demanda, com maior eficiência no uso de materiais (GIBSON; ROSEN; STUCKER, 2015). Dentre as várias tecnologias que abrange a manufatura aditiva, a técnica de deposição por arco elétrico (Manufatura aditiva por deposição a arco - MADA) do inglês (*Wire Arc Additive Manufacturing* - WAAM), que utiliza um arame metálico como material de adição, tem se destacado. Trata-se de uma técnica que combina os princípios de soldagem por arco elétrico com os fundamentos da impressão 3D metálica (DING *et al.*, 2015).

O WAAM, apresentado na Figura 1, utiliza arames metálicos como matéria-prima e baseia-se, no caso em questão, na técnica GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) ou MIG/ MAG. Essa abordagem oferece vantagens por possibilitar a produção de componentes metálicos com menor custo de matéria-prima, redução do desperdício e otimização do tempo de produção. Além disso, permite a fabricação de peças customizáveis, inclusive com diferentes tipos de materiais compatíveis. Essas características torna o WAAM um caminho atrativo para setores como o aeroespacial, naval, automobilístico e óleo e gás (ZAHID *et al.*, 2021).

Figura 1 - Demonstração do funcionamento do WAAM.



Fonte: SHAH, Abid *et al.* (2023).

Como já dito anteriormente, um dos aspectos mais relevantes do WAAM é exatamente a possibilidade de customizar uma peça com diferentes tipos de ligas metálicas, de acordo com propriedades e aplicações específicas (TOMAR; SHIVA; NATH, 2022). Todavia, apesar do potencial promissor, o processo WAAM ainda enfrenta desafios relacionados à fidelidade dimensional, ao controle da deposição e à repetibilidade dos resultados. Esses aspectos estão diretamente associados à variabilidade das condições de operação, dentre os principais citam-se: velocidade de alimentação do arame (WFS), tensão e corrente do arco elétrico e vazão de gás.

Como contribuição, este trabalho propõe e valida uma arquitetura integrada de automação para células WAAM, baseada na comunicação entre CLP, robô industrial e IHM, associada ao monitoramento e à aquisição de dados operacionais. Além da implementação do sistema, demonstra-se como a estabilidade dos parâmetros monitorados e a estratégia automatizada adotada impactam diretamente o desempenho geométrico do processo. Logo, parte-se da hipótese de que a integração entre automação e monitoramento pode reduzir variabilidade operacional e melhorar repetibilidade dimensional em processos WAAM. (MICHEL *et al.*, 2019).

Nas seções seguintes são apresentados a justificativa e os objetivos do trabalho, esclarecendo a motivação para o desenvolvimento de um sistema de automação aplicado a células de manufatura aditiva por deposição a arco.

1.1 Justificativa

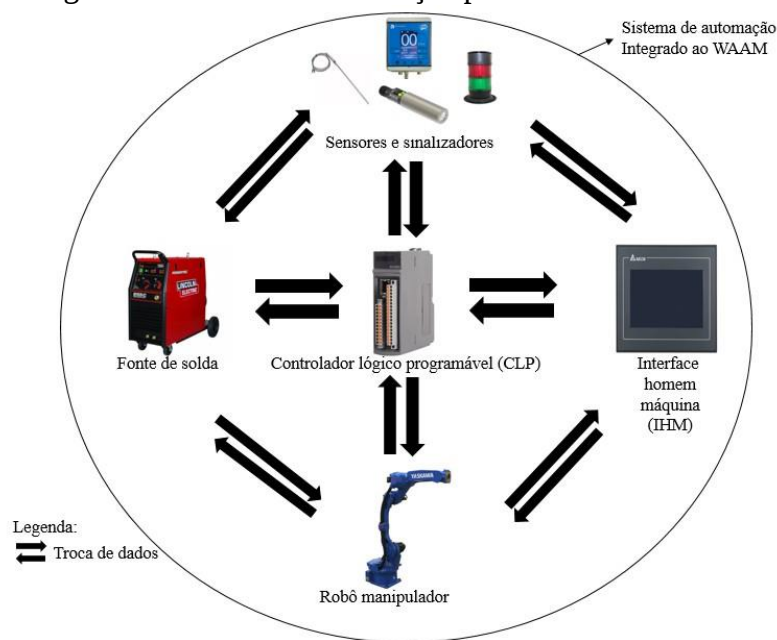
Embora o processo WAAM possa ser executado com base no processo GMAW ou simplesmente MIG/MAG, sua aplicação no âmbito da manufatura aditiva exige avanços significativos em automação para garantir maior eficiência, qualidade, rastreabilidade e confiabilidade (LU *et al.*, 2024). Ressalta-se que esses métodos desenvolvidos não são requisitos absolutos para o WAAM, porém ampliam seu potencial proporcionando maior controle e previsibilidade das variáveis.

Obras recentes, como *Additive Manufacturing: Design, Process and Applications* de Stavropoulos (2023), apresentam conceitos fundamentais relacionados à Indústria 4.0 e à manufatura descentralizada, que estão diretamente ligados à automação. O autor destaca a importância da integração de células e linhas de produção automatizadas, evidenciando como a manufatura aditiva, incluindo a WAAM, pode ser incorporada eficientemente em sistemas produtivos complexos. Essa integração viabiliza maior flexibilidade, rastreabilidade e otimização do processo produtivo, elementos essenciais para atender às demandas industriais

contemporâneas.

O desenvolvimento de um sistema de automação acessível, flexível e eficiente para o WAAM, conforme representado na Figura 2, permite melhorar o controle operacional, aumentar a qualidade das peças e reduzir custos operacionais. Essas características tornam a tecnologia mais viável para o setor industrial, especialmente para o segmento automotivo presente em Betim (MG), que demanda soluções capazes de acelerar a produção e fabricar componentes complexos com propriedades mecânicas adequadas. Josten *et al.* (2020) demonstraram a aplicação do WAAM para o reforço de componentes de carrocerias automotivas, que utiliza de robôs industriais para controlar com precisão o movimento do arco elétrico durante a deposição de material. A automação, nesse contexto, contribuiu para elevar o grau de maturidade tecnológica das células de manufatura, como também facilita sua incorporação em cadeias produtivas com altos níveis de exigência.

Figura 2 - Sistema de automação para célula WAAM



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A proposta deste trabalho justifica-se, portanto, pela necessidade de desenvolver um sistema de automação que complemente e potencialize as tecnologias originalmente desenvolvidas para soldagem, atualmente aplicadas no WAAM. Ao proporcionar maior domínio sobre a manufatura, a automação contribui para elevar o grau de maturidade tecnológica da célula de manufatura, viabilizando aplicações mais exigentes e integradas às cadeias produtivas (CHUNYANG *et al.*, 2019). Além disso, busca-se democratizar o uso da

automação, já que o sistema desenvolvido apresenta uma relação custo-benefício em comparação com outras soluções semelhantes disponíveis no mercado.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O presente trabalho tem como foco o desenvolvimento de um sistema de automação voltado para uma célula de manufatura aditiva por deposição a arco, que permita o monitoramento e a coleta de dados em tempo real de parâmetros do sistema a fim de garantir maior rastreabilidade, precisão e qualidade das peças produzidas.

1.2.2 Objetivos específicos

- Estudar os principais parâmetros que influenciam o WAAM, como velocidade de alimentação do arame (WFS), tensão e corrente do arco elétrico e vazão de gás;
- Projetar e implementar um sistema de automação capaz de monitorar e gravar em tempo real as variáveis críticas do processo para depois realizar análise desses dados;
- Integrar supervisor e controlador ao ambiente de manufatura aditiva;
- Comparar os resultados obtidos com o sistema automatizado com os de operações manuais ou semiautomáticas, identificando os principais benefícios.

1.3 Organização do texto

No Capítulo 2 deste trabalho é apresentada uma breve revisão bibliográfica, abordando algumas definições relacionadas aos princípios teóricos da manufatura aditiva, com ênfase na técnica WAAM, uso de robô industrial, CLP (Controlador Lógico Programável), IHM (Interface Homem-Máquina) e sensores pertinentes para o desenvolvimento do sistema de automação. O Capítulo 3 evidencia a metodologia utilizada e a sequência de atividades para elaboração do trabalho, descrevendo a arquitetura do sistema proposto e os critérios de testes e validações. No Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos durante os testes experimentais com o sistema automatizado, discutindo os impactos na repetibilidade, precisão, qualidade e análise dos dados monitorados das peças produzidas. E por fim no Capítulo 5 os principais pontos de conclusão do trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Manufatura aditiva

A manufatura aditiva (MA), também conhecida como impressão 3D, consiste em um conjunto de processos de fabricação que criam peças tridimensionais por meio da adição sequencial de material, camada por camada, como exemplificado na Figura 3. Diferente dos métodos tradicionais de fabricação subtrativa, nos quais o material é removido para obter a forma final, a MA constrói a geometria desejada diretamente a partir de modelos digitais, o que permite maior flexibilidade, menor desperdício de material e viabilizando a produção de geometrias complexas que seriam difíceis de fabricar por métodos convencionais (GIBSON *et al.*, 2015).

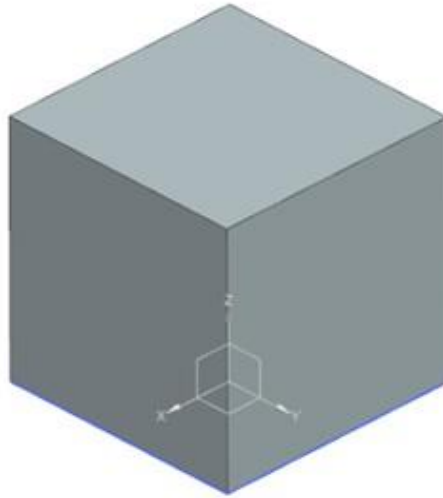
Figura 3 - Representação da manufatura aditiva metálica.



Fonte: Imagem gerada por Inteligência artificial (Gemini, 2025).

A operação normalmente inicia com a criação de um modelo digital em um *software* CAD (*Computer Aided Design*), assim como é possível visualizar na Figura 4. Esse modelo pode ser desenvolvido do zero ou obtido por meio de digitalização 3D. Para viabilizar a impressão, o modelo digital é convertido para um formato de arquivo específico que possa ser interpretado pela “impressora” 3D.

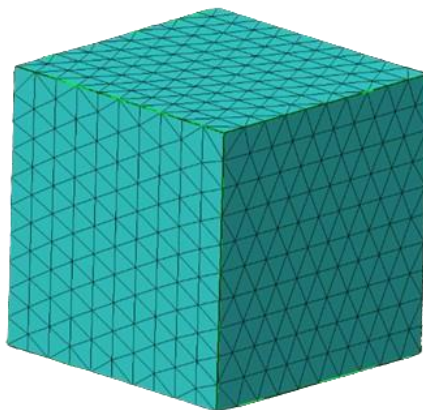
Figura 4 - Modelo CAD.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

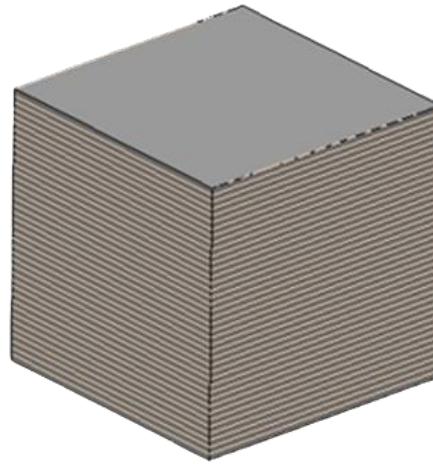
Um dos formatos de arquivo mais comuns nesse contexto é o STL (*Standard Triangle Language*). O arquivo STL descreve a superfície do modelo em uma malha de triângulos, de acordo com a Figura 5, em que cada triângulo é definido por três vértices e um vetor normal que indica sua orientação. Essa representação simplificada viabiliza a compatibilidade entre diferentes *hardwares* e *softwares*, facilitando a preparação do modelo para fabricação (TURNER *et al.*, 2024).

Figura 5 - Malha triangular da superfície do modelo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após a geração do arquivo STL, um *software* de fatiamento, conhecido como *slicer*, demonstrado na Figura 6, converte a malha tridimensional em instruções (código de programação que determinada máquina compreende) de deposição camada por camada. Essas instruções são então executadas pelo *hardware*, resultando na peça final.

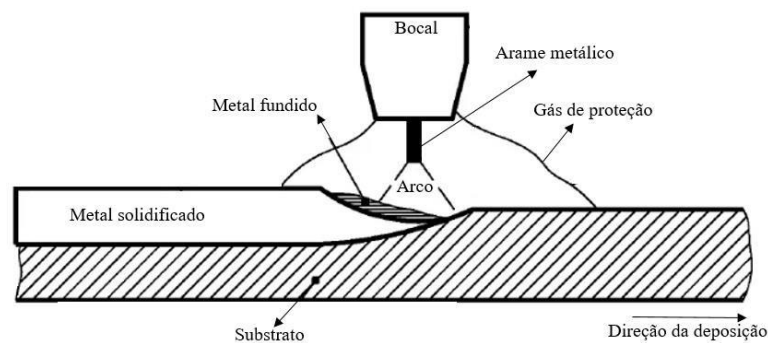
Figura 6 - *Slicer* em camadas do modelo CAD.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.2 Manufatura aditiva por deposição a arco (WAAM)

É válido dizer que a MA possui várias vertentes, sendo uma delas, a técnica WAAM que utiliza dos processos de soldagem por arco elétrico para a deposição controlada de material metálico em camadas sucessivas. Um dos modos de soldagem mais utilizados é o GMAW, demonstrado na Figura 7, ou MIG MAG, devido à sua alta taxa de deposição e facilidade de integração a sistemas automatizados (WU *et al.*, 2018). No GMAW, um eletrodo consumível em forma de arame é continuamente alimentado pela tocha de soldagem, estabelecendo um arco elétrico entre o arame e a base de trabalho (substrato) que gera a poça de fusão. Essa poça é protegida por um gás, e a solidificação subsequente do material resulta em cordões de solda depositados camada por camada.

Figura 7 - Estrutura para realizar solda na metodologia GMAW.



Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

Um dos trabalhos mais relevantes para a compreensão do cenário atual do WAAM é o de Shah *et al.* (2023), intitulado *A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process*. Trata-se de uma revisão aprofundada que compila os avanços tecnológicos, os desafios operacionais e as perspectivas futuras da manufatura aditiva por deposição a arco, destacando aspectos fundamentais como os modos de transferência de metal, os tipos de materiais aplicáveis, o controle de parâmetros críticos e a crescente integração com sistemas automatizados. O estudo fornece uma visão clara sobre a importância da estabilidade da deposição e do controle em tempo real para garantir a precisão dimensional e qualidade das peças produzidas, pontos que estão diretamente relacionados à proposta deste trabalho. A partir desse panorama, reforça-se a importância do desenvolvimento de soluções de automação voltadas à estabilização do WAAM e ao monitoramento contínuo de suas variáveis críticas.

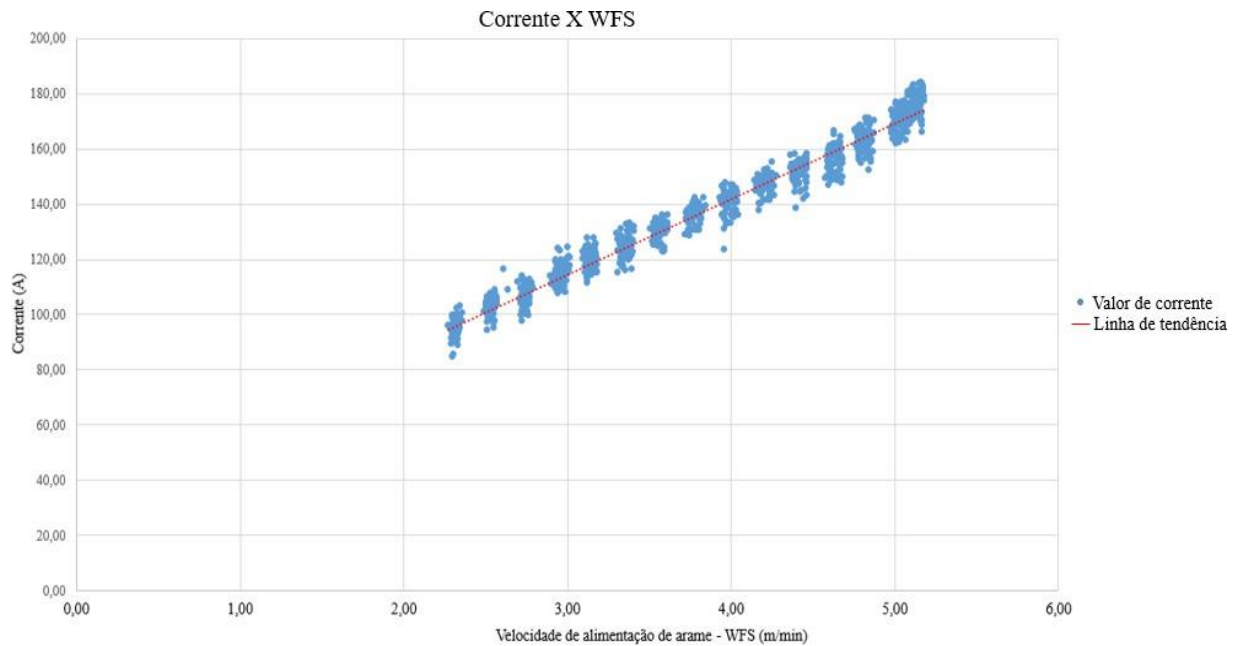
Dentre os diversos fatores que influenciam a qualidade das peças fabricadas por essa técnica, destaca-se o modo de transferência de metal, com ênfase no modo por curto-circuito controlado (*Controlled Short-Circuit Transfer Mode*), amplamente utilizado por proporcionar maior estabilidade no arco e menor aporte térmico. Essa condição favorece a redução de distorções e melhora o acabamento superficial das camadas depositadas (SHAH *et al.*, 2023). Nesse contexto, a repetição precisa dos ciclos de fusão e reconexão do arco contribui para uma deposição mais uniforme e estável, sendo especialmente importante em aplicações que exigem alta precisão dimensional. Tais características, no entanto, dependem diretamente do controle rigoroso das variáveis do sistema produtivo, as quais serão detalhadas a seguir.

2.2.1 Variáveis do processo GMAW aplicados no WAAM

O controle das variáveis do modo GMAW é fundamental para garantir a qualidade geométrica e metalúrgica das peças fabricadas por WAAM. As principais variáveis incluem:

- Velocidade de alimentação do arame (WFS - *Wire Feed Speed*): é um parâmetro crítico, pois controla indiretamente a corrente de soldagem e, consequentemente, a energia do ciclo WAAM. Conforme evidenciado na Figura 8, o aumento do WFS resulta em um crescimento aproximadamente linear da corrente, indicando um maior aporte energético ao processo. Esse comportamento pode promover o aumento da largura e da altura do cordão de solda devido à maior quantidade de material depositado. Entretanto, valores excessivos de WFS podem comprometer a estabilidade do arco e a precisão dimensional da peça (VAGHASIA *et al.*, 2025).

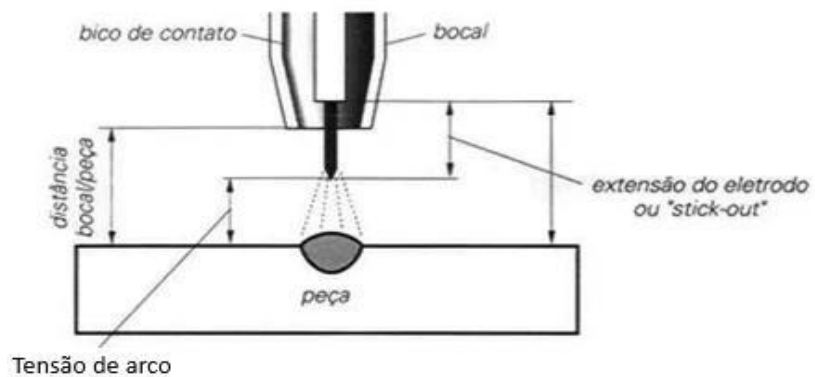
Figura 8 - Gráfico: Corrente X WFS.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- Tensão de arco: visualizável na Figura 9, é uma variável essencial no WAAM pois está diretamente relacionada ao comprimento do arco elétrico. Essa variável influencia a estabilidade da deposição e, em conjunto com outros parâmetros, afeta as características geométricas do cordão de solda e a qualidade da peça. Logo, controle adequado da tensão é fundamental para garantir uniformidade e precisão dimensional no procedimento (JIN *et al.*, 2020).

Figura 9 - Demonstração da tensão de arco no processo.



Fonte: Adaptado de infosolda (2025).

- Corrente: a corrente de soldagem é uma das variáveis mais importantes no processo WAAM, uma vez que exerce efeito diretamente na taxa de deposição e no calor introduzido (*Heat input*) na peça. Correntes mais elevadas geralmente resultam em maior fusão do arame e maior volume depositado, todavia podem causar maior distorção térmica e alterações na microestrutura do material. O controle adequado da corrente é essencial para manter a qualidade geométrica e metalúrgica das camadas depositadas (JIN *et al.*, 2020).
- Vazão de gás de proteção: a vazão de gás de proteção é um parâmetro crítico no processo WAAM, impacta a estabilidade do arco elétrico, a proteção da poça de fusão contra contaminações atmosféricas e, conseqüentemente, a qualidade do cordão depositado. Conforme Rodrigues *et al.* (2019), no artigo *Current Status and Perspectives on Wire and Arc Additive Manufacturing*, o gás de proteção é um dos parâmetros mais influentes, pois afeta a geometria do cordão, a estabilidade do processo, o modo de transferência e a aparência do cordão. Essa afirmação evidencia a relevância do controle adequado desse parâmetro para assegurar a estabilidade do processo.

2.3 Robótica industrial

A robótica industrial é um campo multidisciplinar que integra conhecimentos de mecânica, eletrônica, automação e ciência da computação com o objetivo de desenvolver sistemas autônomos voltados à realização de tarefas repetitivas, perigosas ou de alta precisão no ambiente fabril. Desde sua introdução nas linhas de produção na década de 1960, os robôs industriais têm desempenhado um papel fundamental na modernização e no aumento da eficiência dos processos produtivos (NIKU, 2020).

A evolução dos sistemas robóticos acompanha os avanços tecnológicos das últimas décadas, o que permite a incorporação de sensores, sistemas de visão, inteligência artificial e integração com redes industriais, o que amplia significativamente as aplicações e a flexibilidade desses dispositivos. Com isso, os robôs industriais deixaram de ser apenas atuadores programados para movimentos repetitivos, passando a ser componentes inteligentes capazes de tomar decisões em tempo real com base em dados do ambiente.

Neste contexto, compreender os fundamentos da robótica industrial, suas classificações, arquiteturas, sistemas de controle e aplicações, é essencial para o desenvolvimento de soluções inovadoras e para a integração eficiente desses sistemas nos processos produtivos modernos,

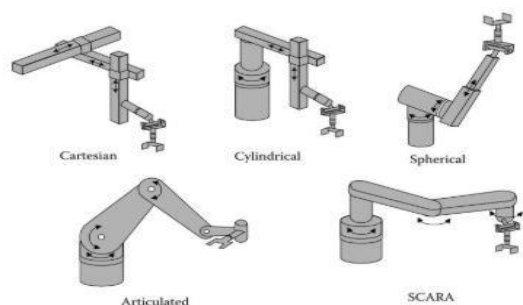
especialmente em cenários que demandam automação com significativa precisão, como a manufatura aditiva.

2.3.1 Classificação de robôs industriais

Segundo Niku (2020), os robôs podem ser agrupados em diferentes categorias conforme o grau de complexidade, autonomia e método de operação, conforme Figura 10. Essa diversidade de classificações, que pode variar entre países e instituições, influencia diretamente na forma como o uso da robótica é contabilizado nas indústrias. De maneira geral, os principais tipos de robôs industriais incluem:

- **Robôs de operação sequencial fixa:** são sistemas que seguem uma sequência pré-estabelecida de ações, projetada para tarefas específicas e repetitivas. A lógica de operação desses robôs é rígida, e alterações no processo requerem modificações consideráveis na programação ou no hardware.
- **Robôs de repetição manual (*playback*):** utilizam um método de aprendizado por demonstração, em que o operador guia fisicamente o robô durante uma tarefa. Os movimentos realizados são gravados e posteriormente repetidos de forma automática pelo sistema, mantendo fidelidade à ação original, mas sem capacidade de adaptação.
- **Robôs com capacidade adaptativa (inteligentes):** incorporam sensores, algoritmos e tecnologias que permitem a interpretação do ambiente e a tomada de decisões em tempo real. São capazes de ajustar seu comportamento conforme mudanças nas condições externas, sendo ideais para cenários com variabilidade e maior grau de incerteza.

Figura 10 - Configurações de manipuladores robóticos.



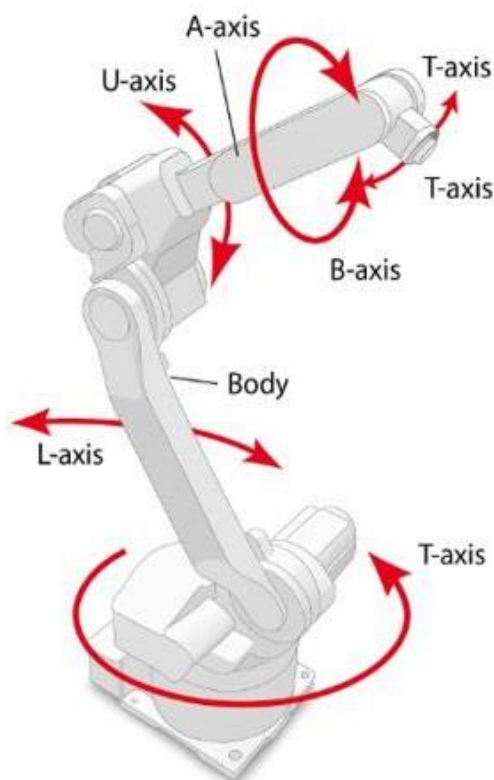
Fonte: NIKU, 2020.

Dentre essas configurações apresentadas na Figura 10, o robô articulado destaca-se como o mais amplamente utilizado na indústria (NIKU, 2020). Essa popularidade deve-se

principalmente à sua versatilidade e flexibilidade, pois o braço articulado, geralmente composto por seis eixos rotativos, é capaz de simular com maior fidelidade os movimentos de um braço humano. Isso permite que ele atue em tarefas que demandam alto grau de liberdade, como soldagem, montagem, manuseio de peças e, mais recentemente, em processos WAAM.

O robô articulado é amplamente adotado devido à sua capacidade de deposição em trajetórias complexas e superfícies não planas, algo essencial em geometrias livres ou aplicações fora do plano tradicional. Adicionalmente, sua estrutura compacta e mobilidade em múltiplos eixos, como demonstra a Figura 11, permitem otimizar o acesso à peça durante a deposição, reduzir a necessidade de reposicionamento da base e facilitar o controle da tocha de soldagem em diferentes orientações. Essa versatilidade está associada aos princípios da robótica discutidos por Craig (2005), segundo os quais robôs manipuladores articulados, por apresentarem múltiplos graus de liberdade, possuem elevada destreza para o posicionamento e a orientação do efetuator final ao longo de trajetórias complexas.

Figura 11 - Robô articulado de 6 eixos com graus de liberdade.



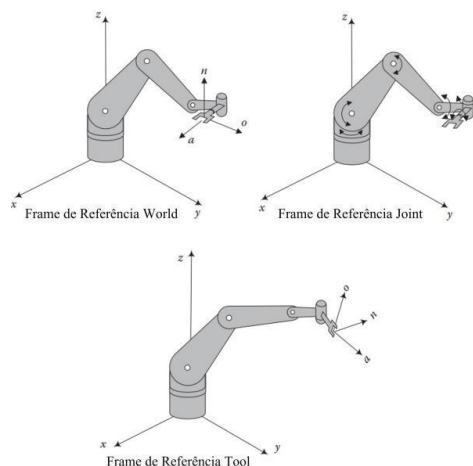
- Eixo 1 (S):** Rotação da base (movimento horizontal do braço).
- Eixo 2 (L):** Movimento do ombro (alcança frente e trás).
- Eixo 3 (U):** Movimento do cotovelo (alcança para cima e baixo).
- Eixo 4 (R):** Rotação do braço em torno do próprio eixo.
- Eixo 5 (B):** Inclinação vertical da ferramenta (punho).
- Eixo 6 (T):** Rotação da ferramenta em seu próprio eixo.

Fonte: Imagem gerada por Inteligência artificial (Chat GPT, 2025).

2.3.2 Frames de referência no espaço de trabalho

Na robótica industrial, o uso de referenciais ou sistemas de coordenadas é fundamental para descrever com precisão os movimentos do robô e sua interação com o ambiente. Esses sistemas constituem a base para expressar posições e orientações no espaço tridimensional, sendo indispensáveis para o controle de trajetória, cálculos cinemáticos e planejamento de movimentos. Conforme apresentado por Niku (2020), os três principais referenciais utilizados são: o referencial do mundo (*World Reference Frame*), o referencial das juntas (*Joint Reference Frame*) e o referencial da ferramenta (*Tool Reference Frame*), conforme Figura 12.

Figura 12 - *Frames* de referências para movimentação dos robôs.



Fonte: NIKU, 2020.

O *World Reference Frame* é um sistema fixo e global, normalmente estabelecido geralmente na base do robô ou em uma posição fixa do espaço de trabalho. Ele funciona como uma origem absoluta a partir da qual as demais posições podem ser definidas. Esse referencial é particularmente útil para descrever a localização de objetos no ambiente, delimitar zonas de trabalho e definir trajetórias em coordenadas cartesianas. Como permanece fixo no espaço, os deslocamentos do robô podem ser descritos como uma variação relativa a esse sistema global.

O *Joint Reference Frame* corresponde a sistemas locais de coordenadas associados individualmente a cada articulação do robô. Esses referenciais se movimentam de forma dependente do elo anterior, compondo a cadeia cinemática do manipulador. Dessa forma, cada posição ou orientação do robô pode ser descrita a partir de transformações sucessivas entre os elos, frequentemente representadas por parâmetros geométricos, como os de *Denavit-Hartenberg*. Essa modelagem é essencial para cálculos de cinemática direta e cinemática

inversa.

Já o *Tool Reference Frame* é um sistema de coordenadas localizado na extremidade do braço robótico, geralmente acoplado ao flange ou à interface onde se fixa o efetor final. Esse referencial move-se em conjunto com a ferramenta e é utilizado para determinar a orientação e o posicionamento desejado da extremidade em relação ao objeto ou à tarefa. Ele é de extrema importância em aplicações nas quais a orientação da ferramenta é tão relevante quanto sua posição.

2.3.3 Programação de robôs

A programação de robôs industriais é uma etapa fundamental para sua operação eficiente em ambientes de manufatura automatizada. Ao longo das últimas décadas, diversos métodos têm sido desenvolvidos com o objetivo de aumentar a flexibilidade, reduzir o tempo de configuração e facilitar a adaptação dos sistemas robóticos a diferentes tarefas e cenários produtivos.

Segundo Pan *et al.* (2012), os métodos de programação de robôs evoluíram significativamente, passando de interfaces baseadas em código numérico rígido para abordagens mais interativas e intuitivas. Os autores classificam os métodos em duas categorias principais: programação *online* e programação *offline*. A programação *online* é realizada diretamente no robô, geralmente por meio de dispositivos de ensino (*teach pendants*), como demonstrado na Figura 13, permitindo que o operador grave posições em tempo real e desenvolva toda a lógica necessária para a aplicação.

Figura 13 - *Teach Pendant* fabricante Yaskawa.



Fonte: Adaptado de Yaskawa, 2025.

Em contraste, a programação *offline* permite a criação, simulação e verificação de trajetórias e comandos em ambiente virtual antes da implementação no robô real. Essa metodologia reduz significativamente o tempo de inatividade e possibilita a detecção prévia de colisões, a otimização de trajetórias e a integração com sistemas CAD/ CAM, como o *software PowerMill*, amplamente utilizado no fatiamento e na geração de trajetórias para processos WAAM. Segundo Pan *et al.* (2012), a programação *offline* vem se tornando cada vez mais relevante em aplicações que exigem alta precisão, múltiplas tarefas ou integração com sistemas automatizados.

Complementando essa análise, Heimann e Guhl (2020) realizaram uma revisão sistemática sobre métodos de programação de robôs industriais, destacando tendências emergentes como a programação por demonstração (*Programming by Demonstration – PbD*) e o uso de interfaces naturais, incluindo realidade aumentada, controle por gestos e comandos por voz. Essas abordagens buscam tornar a interação humano-robô mais acessível, especialmente em ambientes nos quais a reprogramação frequente é necessária ou em situações em que o operador não possui conhecimento técnico avançado.

Os autores também enfatizam o crescimento da programação orientada a tarefas, na qual se descreve o que deve ser executado, em vez de especificar diretamente como o robô deve se movimentar, delegando ao sistema a geração automática dos movimentos necessários. Essa tendência está alinhada aos avanços em inteligência artificial e aprendizado de máquina, promovendo maior autonomia e capacidade de adaptação dos sistemas robóticos.

Portanto, os métodos de programação vêm se tornando progressivamente mais sofisticados e orientados à usabilidade, refletindo demandas da Indústria 4.0 por sistemas mais flexíveis, seguros e integráveis. Assim, a escolha do método mais adequado depende do tipo de aplicação, da complexidade das tarefas, da frequência de reconfiguração e do perfil dos operadores envolvidos.

2.4 Controladores Lógicos Programáveis (CLP)

O CLP é um dispositivo eletrônico utilizado para automação de processos industriais, projetado para substituir sistemas de controle baseados em relés, oferecendo maior confiabilidade, flexibilidade e facilidade de manutenção. Segundo Petruzella (2014), o CLP pode ser definido como um equipamento digital com memória programável, capaz de armazenar e executar instruções específicas de controle lógico, sequencial, temporizado, contagem e operações aritméticas, com a finalidade de controlar máquinas e processos

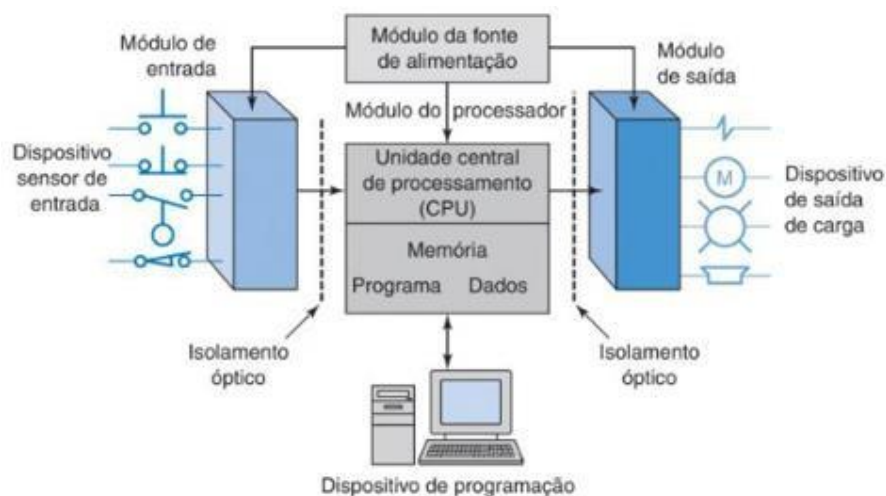
industriais.

A origem dos CLPs remonta à década de 1960, quando a *General Motors* buscava uma alternativa mais eficiente aos complexos sistemas de relés utilizados em linhas de produção. Desde então, os CLPs passaram por uma constante evolução, incorporando recursos avançados como comunicação em rede, programação orientada a objetos e integração com sistemas supervisórios.

2.4.1 Estrutura e funcionamento

A arquitetura de um CLP é composta por alguns blocos principais: a unidade central de processamento (CPU), a memória (RAM, ROM, EEPROM), os módulos de entrada e saída (digitais e analógicos), fonte de alimentação e interfaces de comunicação, conforme Figura 14. A CPU executa as instruções contidas no programa do usuário, interpretando os sinais recebidos dos dispositivos de entrada e enviando comandos aos dispositivos de saída. A memória é responsável por armazenar tanto o programa quanto os dados temporários de operação (PETRUZELLA, 2014).

Figura 14 - Estrutura geral de um CLP.



Fonte: Adaptado de Petruzella, 2014.

Os módulos de entrada captam sinais de sensores e botões, enquanto os módulos de saída enviam sinais para atuadores, como motores, solenoides e relés. A modularidade dos CLPs permite que os sistemas sejam dimensionados de acordo com a complexidade do processo controlado.

O funcionamento de um CLP baseia-se no ciclo de varredura (*scan cycle*), que ocorre de forma contínua e cíclica. Esse ciclo é dividido em quatro etapas: leitura das entradas, execução do programa, diagnóstico e comunicação e atualização das saídas. Segundo Petruzella (2014), essa estrutura garante uma resposta rápida e determinística, ideal para processos que exigem robustez e confiabilidade.

Conforme destaca Da Silva (2021), essa lógica determinística implica que, para um mesmo conjunto de entradas, o CLP sempre fornecerá o mesmo conjunto de saídas. Tal característica é essencial em sistemas industriais que requerem previsibilidade e segurança operacional.

2.4.2 Linguagens de programação e aplicações dos CLPs na indústria

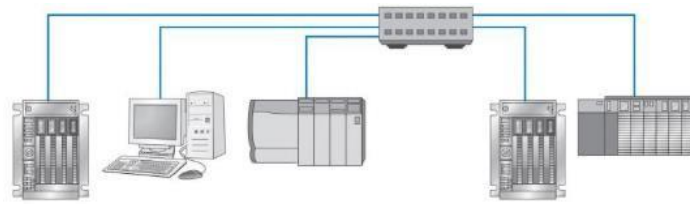
A norma IEC 61131-3 padroniza as linguagens utilizadas para programação de CLPs, tornando o desenvolvimento de sistemas mais acessível e estruturado. Segundo Da Silva (2021), essa norma contempla cinco linguagens principais, sendo que cada linguagem oferece vantagens dependendo da natureza do processo controlado, sendo comum a utilização combinada em projetos mais complexos:

- *Ladder Diagram* (LD): baseada em diagramas de relés, é a linguagem mais popular, especialmente entre profissionais da área elétrica;
- *Function Block Diagram* (FBD): utiliza blocos funcionais interligados, ideal para processos contínuos e funções matemáticas;
- *Structured Text* (ST): linguagem textual semelhante à programação convencional (Pascal, C), recomendada para lógicas complexas;
- *Instruction List* (IL): linguagem textual de baixo nível, atualmente em desuso;
- *Sequential Function Chart* (SFC): baseada em etapas e transições, ideal para processos sequenciais.

2.4.3 Aplicações industriais dos CLPs

Os CLPs desempenham um papel essencial na automação industrial moderna, sendo aplicados em uma vasta gama de processos. Conforme enfatiza Petruzella (2014), os CLPs são particularmente adequados para ambientes industriais que operam sob condições severas e que demandam respostas determinísticas para o controle de processos discretos e contínuos, como demonstra a Figura 15.

Figura 15 - Aplicação do CLP como gerenciador de controle.



Fonte: Adaptado de Petruzella, 2014.

Seu emprego abrange desde linhas de produção com sequências repetitivas de operações, como em sistemas de transporte, envase, empacotamento e montagem, até processos contínuos de controle de variáveis físicas, como temperatura, pressão e vazão, comuns na indústria de transformação e na manufatura.

Além da capacidade de controlar processos complexos com alta confiabilidade, os CLPs modernos têm se consolidado como elementos-chave na transição da indústria tradicional para os paradigmas da Indústria 4.0. Nesta nova era da automação industrial, os CLPs ultrapassam a função de simples executores de lógica de controle, passando a atuar como nós inteligentes dentro de arquiteturas distribuídas e conectadas. Eles tornam-se capazes de processar dados localmente, conceito conhecido como *edge computing*, e de se comunicar em tempo real com sistemas superiores, como supervisórios, plataformas em nuvem, bancos de dados industriais e soluções de monitoramento remoto. Essa integração permite que os dados coletados em tempo real nos processos de produção alimentem algoritmos de manutenção preditiva, rastreabilidade de produtos e tomada de decisão descentralizada (AZEVEDO, 2018).

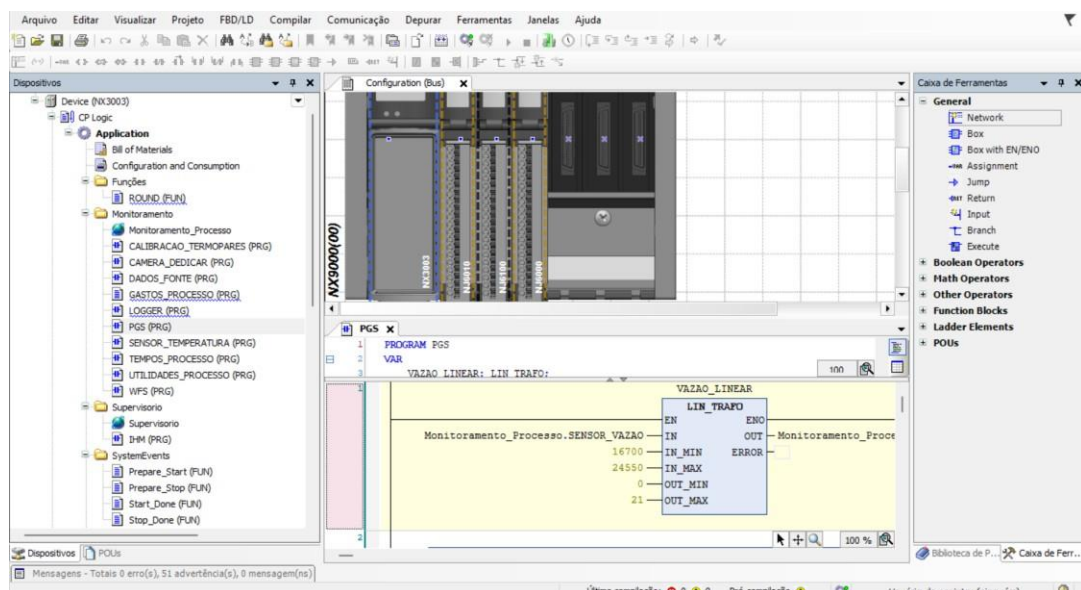
Dessa forma, os CLPs se transformam em elementos estratégicos para a automatização da manufatura, atuando não apenas na automação operacional, mas também como agentes de conectividade e inteligência no chão de fábrica. Tal evolução exige que os dispositivos sejam cada vez mais robustos, versáteis e compatíveis com protocolos de comunicação abertos, o que garante interoperabilidade entre diferentes equipamentos e plataformas. Segundo Azevedo (2018), essa nova perspectiva impõe uma ampliação no escopo de atuação do profissional da automação, que agora precisa dominar não só os fundamentos da lógica de controle, mas também os princípios de redes industriais, cibersegurança e integração de sistemas digitais.

2.4.4 Comunicação industrial e Softwares de desenvolvimento

A comunicação industrial representa um dos pilares fundamentais para o funcionamento eficaz dos sistemas automatizados modernos. Em um ambiente de controle, os CLPs precisam interagir continuamente com sensores, atuadores, interfaces homem-máquina (IHMs) e, muitas vezes, com sistemas supervisórios e servidores remotos. Para viabilizar essa interconectividade, utilizam-se protocolos padronizados de comunicação industrial, como *Modbus RTU*, *Modbus TCP/ IP*, *Profibus*, *CANopen* e *Ethernet/ IP*, que permitem a troca de dados de forma segura e sincronizada entre diferentes dispositivos e camadas do sistema de automação (PETRUZELLA, 2014). A escolha do protocolo e da topologia de rede adequada depende da aplicação, do tempo de resposta exigido e da complexidade do sistema envolvido.

Além da comunicação, o desenvolvimento de sistemas automatizados requer ambientes de *software* que possibilitem ao projetista programar, testar e depurar a lógica de controle com eficiência e confiabilidade. A Figura 16 destaca o ambiente *MasterTool IEC XE*, que segue as diretrizes da norma IEC 61131-3 e oferece suporte às principais linguagens de programação utilizadas em CLPs industriais, como *Ladder Diagram*, *Structured Text* e *Function Block Diagram*. De acordo com Da Silva (2021), a padronização das linguagens contribui para a uniformização da programação e para a curva de aprendizado mais acessível aos profissionais da área, além de favorecer a reutilização e portabilidade de códigos.

Figura 16 - Interface Software *MasterTool IEC XE*.



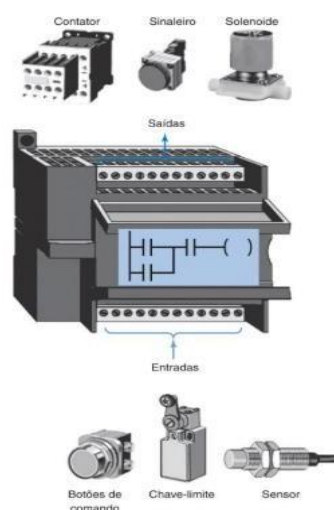
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

O *MasterTool* IEC XE proporciona um conjunto completo de funcionalidades que vão desde a configuração de dispositivos até a simulação *offline* e o monitoramento *online* do sistema. Recursos como a visualização em tempo real do estado das variáveis, forçamento de entradas e saídas, e diagnóstico de falhas permitem reduzir significativamente o tempo de desenvolvimento e de comissionamento, além de aumentar a confiabilidade da solução implementada. Essas ferramentas são especialmente relevantes em aplicações industriais que demandam alta disponibilidade, no qual a detecção precoce de falhas e o comportamento previsível do sistema são essenciais para garantir a segurança operacional e a continuidade produtiva. Assim, o domínio de ambientes como o *MasterTool* representa uma competência fundamental para o profissional que atua com automação e controle industrial, tanto no desenvolvimento de novas soluções quanto na manutenção de sistemas já existentes.

2.4.5 Etapas de desenvolvimento de projetos com CLP

O desenvolvimento de sistemas automatizados baseados em CLPs requer uma abordagem estruturada, composta por etapas bem definidas que garantam o funcionamento seguro e confiável do processo controlado. Esse processo deve iniciar com o levantamento dos requisitos do sistema, que consiste na identificação das variáveis de entrada e saída envolvidas, como sensores, atuadores, botões e sinalizações, apresentado na Figura 17, bem como na definição das condições de operação, tempos de resposta e critérios de segurança.

Figura 17 - Entradas e saídas denominadas no CLP.



Fonte: Adaptado de Petruzella, 2014.

Com essas informações, elabora-se o projeto elétrico do sistema, o qual contempla a organização dos dispositivos no painel de controle, as conexões com os módulos do CLP, e a especificação de elementos como disjuntores, bornes, fontes de alimentação, cabos e proteções. Nessa fase, também são observadas as normas técnicas aplicáveis, especialmente aquelas relacionadas à segurança elétrica e à integridade funcional, como a NR-10 e a NR-12.

A etapa seguinte consiste na programação da lógica de controle utilizando um ambiente de desenvolvimento compatível com a norma IEC 61131-3. Após o desenvolvimento da lógica, o sistema pode ser simulado e testado diretamente no *software*, o que permite a identificação de falhas lógicas antes mesmo da conexão com o *hardware*. Com o CLP conectado, *software* como o *MasterTool* permite a monitoração *online* do processo, o que torna possível o forçamento de variáveis, a visualização do estado das entradas e saídas, e a análise de registros de falha e eventos. Essas ferramentas são fundamentais para a depuração do sistema, reduzindo o tempo de desenvolvimento e contribuindo para a confiabilidade da aplicação.

Por fim, o projeto é submetido ao comissionamento, etapa que envolve a validação do sistema em sua condição real de operação. Nessa fase, verificam-se as conexões físicas, a resposta dos atuadores às condições de entrada e o cumprimento dos critérios de segurança definidos inicialmente. A validação completa ocorre com o processo operando em condições reais, assegurando que o sistema atenda a todos os requisitos funcionais de forma estável e segura. Esse ciclo de desenvolvimento estruturado possibilita a implementação de soluções eficientes em ambientes industriais cada vez mais exigentes em termos de desempenho e confiabilidade.

2.5 Interface Homem-Máquina (IHM)

A crescente complexidade dos sistemas industriais e a busca contínua por eficiência operacional impulsionaram o desenvolvimento de ferramentas que possibilitem uma interação mais eficaz entre o ser humano e os processos automatizados. Nesse cenário, as IHMs emergiram como elementos indispensáveis à automação, representando o elo direto entre o operador e a máquina. Historicamente, conforme Figura 18, a comunicação entre humanos e equipamentos era baseada em sistemas analógicos e painéis de controle físicos compostos por botões, chaves e lâmpadas sinalizadoras. Essa abordagem, embora funcional, era limitada em termos de escalabilidade, ergonomia e clareza informacional. Com o advento da microeletrônica e dos controladores programáveis na década de 1970, surgiu a necessidade de

sistemas de interface que fossem ao mesmo tempo informativos e adaptáveis à crescente quantidade de dados gerados pelas máquinas (ROCHA *et al.*, 2021).

Figura 18 - Linha temporal de evolução da IHM.



Fonte: Imagem gerada por Inteligência artificial (Chat GPT, 2025).

O conceito de IHM se consolidou como uma solução tecnológica orientada a facilitar a supervisão e o controle de processos industriais por meio de representações gráficas. Bastos (2021) destaca que o surgimento das IHMs também acompanha a evolução das normas internacionais de segurança e usabilidade, que passaram a exigir maior confiabilidade na interação entre operadores e sistemas críticos. Com isso, foram incorporadas abordagens de *design* centrado no usuário, fundamentadas na ergonomia cognitiva, visando reduzir a ocorrência de falhas humanas decorrentes de sobrecarga informacional ou má interpretação de sinais visuais. A norma IEC 63303, por exemplo, orienta o desenvolvimento de interfaces de alta performance que priorizem a clareza visual, o agrupamento lógico de informações e a hierarquização de alertas, com o objetivo de melhorar a capacidade de resposta do operador em situações de anormalidade.

2.5.1 Funcionamento: Lógica, Programação e Arquitetura das IHMs

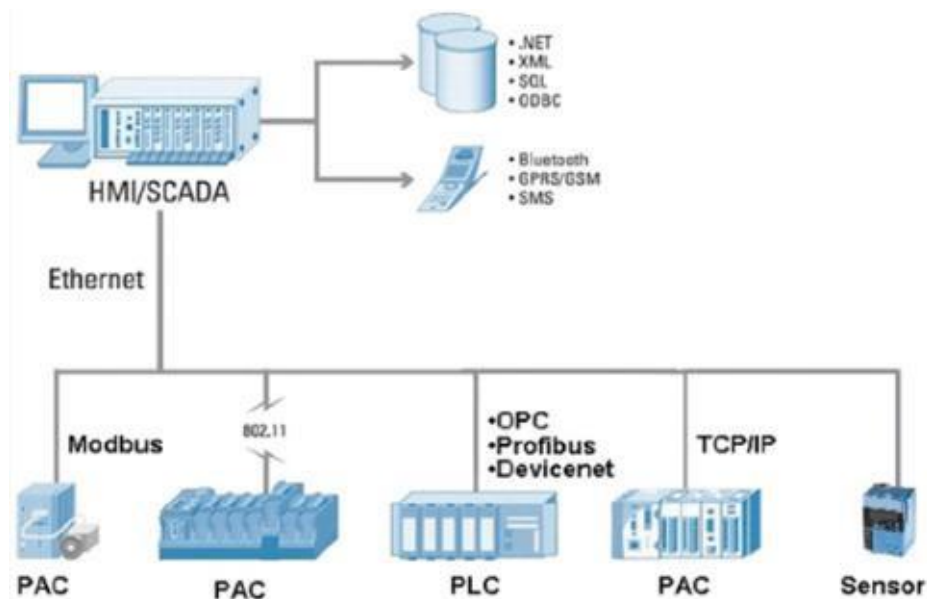
No que se refere ao funcionamento técnico das IHMs, trata-se de dispositivos computacionais equipados com *software* especializado que realiza a comunicação com sistemas de controle, notadamente os CLPs. Esses dispositivos captam, processam e exibem informações operacionais do processo em tempo real por meio de telas gráficas. A programação de uma IHM envolve tanto o desenvolvimento do *layout* visual quanto a configuração lógica que permite a leitura e escrita de variáveis do CLP. A interface pode ser implementada por meio de plataformas que permitem o mapeamento de variáveis e a criação de lógicas de interação baseadas em eventos, aumentando significativamente o controle do processo por parte do operador. Os elementos gráficos típicos incluem sinóticos de processo, botões de acionamento, barras de progresso, campos de entrada de parâmetros e gráficos de tendência, todos esses elementos comunicam-se com variáveis internas do CLP por meio de *tags*.

A lógica de comunicação entre a IHM e o CLP se dá por meio de protocolos industriais padronizados, como *Modbus RTU*, *Profibus*, *Profinet*, *OPC UA*, *Ethernet/IP*, entre outros. Esses protocolos garantem a troca contínua de dados entre os dispositivos e são essenciais para assegurar a interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes. A escolha do protocolo impacta diretamente na velocidade da arquitetura geral do sistema (ROCHA *et al.*, 2021). Um dos diferenciais das IHMs modernas é a possibilidade de operar em redes distribuídas, integrando múltiplos CLPs, sensores e dispositivos periféricos em um único ambiente de supervisão. Tal capacidade amplia significativamente a abrangência da automação e possibilita o desenvolvimento de estratégias de controle descentralizadas e monitoramento remoto.

2.5.2 Integração com CLP: Possibilidades, Relevância e Benefícios

A integração entre IHMs e CLPs, de acordo com a Figura 19, representa, portanto, uma das características mais relevantes para a consolidação de sistemas de automação eficientes. Segundo Bastos (2021), a interface gráfica tem o papel fundamental de traduzir o comportamento de sistemas em representações visuais acessíveis, o que proporciona ao operador não apenas acompanhar variáveis em tempo real, mas também atuar diretamente sobre o processo, seja para alterar *setpoints*, iniciar ciclos automáticos ou acionar modos de emergência. Essa interatividade dinâmica só é possível devido à integração com o CLP, que, por sua vez, executa em tempo real a lógica de controle e responde aos comandos emitidos pela IHM.

Figura 19 - Integração da IHM na rede industrial.



Fonte: Profibus ORG, 2012.

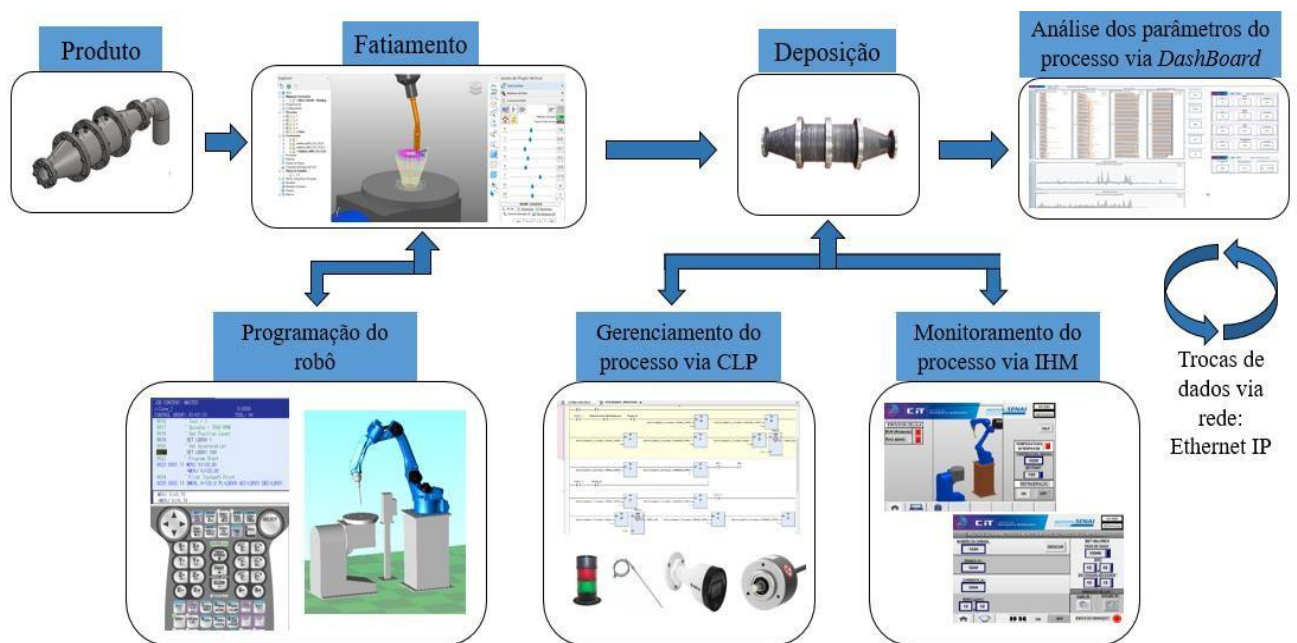
Vale ressaltar que, essa integração é essencial para a implementação de sistemas baseados em supervisão e aquisição de dados (SCADA), na qual a IHM funciona como uma das camadas intermediárias entre os dispositivos de campo e os sistemas de gestão. A coleta contínua de dados realizada pelas IHMs alimenta bancos de dados históricos, que podem ser utilizados em análises estatísticas, manutenção preditiva e otimização de processos por meio de ferramentas de inteligência artificial. Rocha *et al.* (2021) ressaltam que, diante das demandas da indústria 4.0, essa integração ganha novas dimensões, pois permite a conectividade com sistemas em nuvem, *dashboards* analíticos e aplicações móveis, elevando o papel da IHM de simples supervisora para um dispositivo estratégico na arquitetura de controle industrial inteligente.

Em síntese, as IHMs evoluíram de simples painéis de comando para plataformas interativas sofisticadas, orientadas por normas técnicas e integradas a sistemas de controle avançado. Sua programação envolve tanto o domínio de *software* de desenvolvimento quanto a compreensão da lógica do processo industrial. A integração com CLPs, por sua vez, constitui o alicerce para uma comunicação fluida e segura entre o operador e o sistema automatizado.

3 METODOLOGIA

Este trabalho estrutura sua metodologia com base na criação de um sistema automatizado voltado para o controle e monitoramento do processo de deposição WAAM. A construção da solução seguiu um fluxo lógico de desenvolvimento, representado na Figura 20, que organiza as etapas desde o planejamento da peça até a análise dos dados processados, evidenciando as interações entre os dispositivos e a estrutura de comunicação *Ethernet/IP* adotada.

Figura 20 - Fluxo de processos para WAAM com sistemas de automação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base na Figura 20, destacam-se as seguintes etapas:

- **Produto:** o processo tem início com a definição do produto, representado pelo modelo geométrico da peça, desenvolvido em ambiente CAD. Esse modelo constitui a entrada do sistema, contendo todas as informações dimensionais e geométricas necessárias para a fabricação. Nesta etapa não há ainda interação direta com os sistemas de automação, sendo o principal resultado a geração de um arquivo digital que representa fielmente a geometria final desejada, o qual servirá de base para as etapas subsequentes.

- **Fatiamento:** a partir do modelo CAD, realiza-se a etapa de fatiamento, na qual o produto é processado em um software CAM. Nessa fase, o modelo geométrico discretizado em camadas e convertido em trajetórias de deposição, definindo parâmetros como sequência de passes, estratégia de preenchimento e orientação do movimento. A saída do fatiamento consiste no conjunto de dados que alimenta diretamente a programação do robô industrial, traduzindo as trajetórias planejadas em comandos executáveis, o que promove coerência entre a geometria do produto e o movimento da tocha durante a deposição.
- **Deposição:** a etapa de deposição corresponde à execução física do processo WAAM. Nela, o robô industrial é responsável por realizar os movimentos de deposição conforme as trajetórias definidas no fatiamento, enquanto o CLP atua como o elemento central de gerenciamento do processo, executando rotinas de leitura de sensores, tomada de decisão e acionamento de dispositivos auxiliares. Paralelamente, a IHM permite o monitoramento e a supervisão do processo, o que possibilita ao operador acompanhar variáveis como corrente, tensão, velocidade de alimentação do arame e vazão de gás, além de interagir com o sistema para iniciar ciclos ou reagir a condições anômalas. A comunicação entre robô, CLP e IHM é realizada por meio de uma rede *Ethernet/IP*, assegurando a coordenação e a estabilidade operacional durante toda a deposição.
- **DashBoard:** após a conclusão da deposição, os dados operacionais coletados ao longo do processo são encaminhados para uma interface do tipo *dashboard*, que representa a etapa de análise e pós-processamento das informações. Nessa fase, os dados são organizados e visualizados de forma estruturada, que viabiliza análises comparativas, identificação de tendências e avaliação do desempenho do processo. A saída dessa etapa subsidia ajustes finos em parâmetros e estratégias de deposição para execuções futuras, contribuindo para a regularidade, rastreabilidade e melhoria contínua do sistema.

Com base no fluxo apresentado na Figura 20, as subseções seguintes detalham o desenvolvimento dos principais elementos do sistema, mantendo coerência com o fluxograma proposto.

3.1 Programação do robô

A programação do robô industrial *Yaskawa MH12* (controlador *DX200*) teve como objetivo viabilizar a deposição controlada de material metálico em camadas no processo WAAM, o que assegura simultaneamente acurácia geométrica, reprodutibilidade e sincronismo com variáveis externas monitoradas pelo sistema de automação. Para isso, foram adotadas duas abordagens complementares de programação: a geração automática de trajetórias via software CAM (*PowerMill*) e a programação manual utilizando o *teach pendant* do robô.

Todo o desenvolvimento da estrutura lógica do robô também visa à integração com o CLP da célula por meio da rede *Ethernet/IP*. Nessa comunicação, o robô atua como adaptador (*slave*), trocando sinais digitais organizados em blocos de entrada e saída, conforme planejamento definido em planilha de rede.

A combinação entre as trajetórias geradas no *PowerMill*, os ajustes manuais feitos diretamente no robô e a comunicação sincronizada com o CLP resultou em uma programação robusta, adaptável e interativa, fundamentais para atender às exigências técnicas e experimentais do processo WAAM.

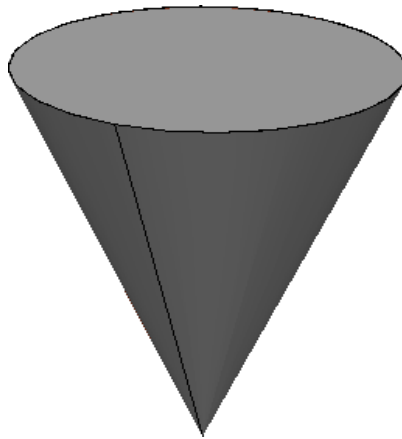
3.1.1 Fatiamento e geração de trajetórias com *PowerMill*

A geração das trajetórias de deposição teve início com o processo de fatiamento (*slicing*) do modelo tridimensional, como a expõe a Figura 21. Para essa etapa, utilizou-se o *Autodesk PowerMill*, um software CAM de alto desempenho amplamente utilizado na indústria para usinagem e manufatura aditiva. O *PowerMill* oferece uma série de estratégias de trajetória que podem ser adaptadas à geometria da peça e à finalidade do componente fabricado.

Entre as principais possibilidades de trajetórias, optou-se pela estratégia:

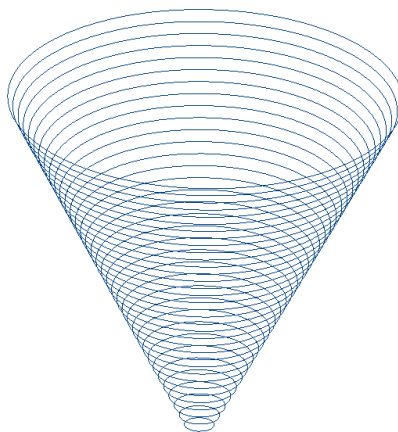
- **Perfil:** consiste em seguir o contorno exato da peça camada por camada, como expõe a Figura 22. Pode ser combinada com as estratégias *Raster* ou *Offset*, oferecendo flexibilidade para reforçar áreas específicas ou otimizar a direção de deposição.

Figura 21 - Sólido a ser fatiado.



Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

Figura 22 - Estratégia Perfil.



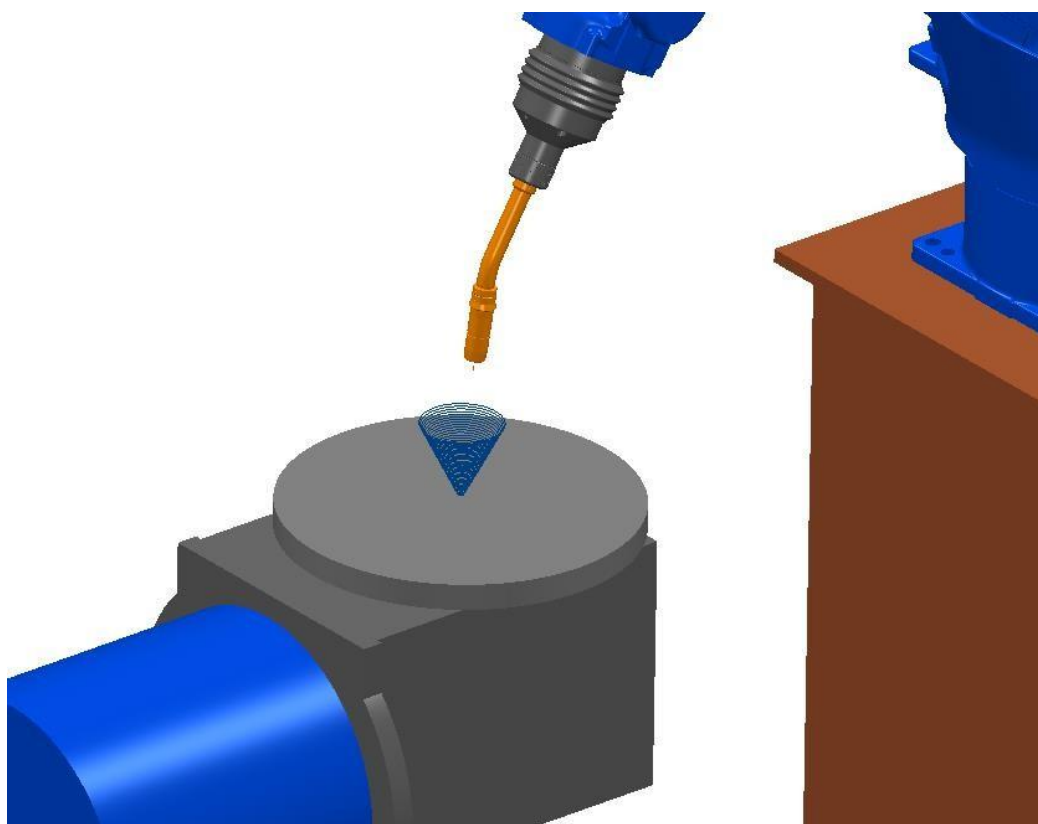
Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

Optou-se pela estratégia de deposição por perfil com o objetivo de favorecer maior consistência dimensional e estabilidade no processo WAAM, uma vez que essa abordagem prioriza a construção do contorno da peça, o que contribui para melhor controle dimensional das paredes e maior uniformidade do cordão depositado. Além do mais, trajetórias contínuas características dessa estratégia favorecem a manutenção de parâmetros mais estáveis de corrente e tensão ao longo da deposição, reduzindo variações indesejadas e contribuindo para

a qualidade final da peça e para a estabilidade do processo.

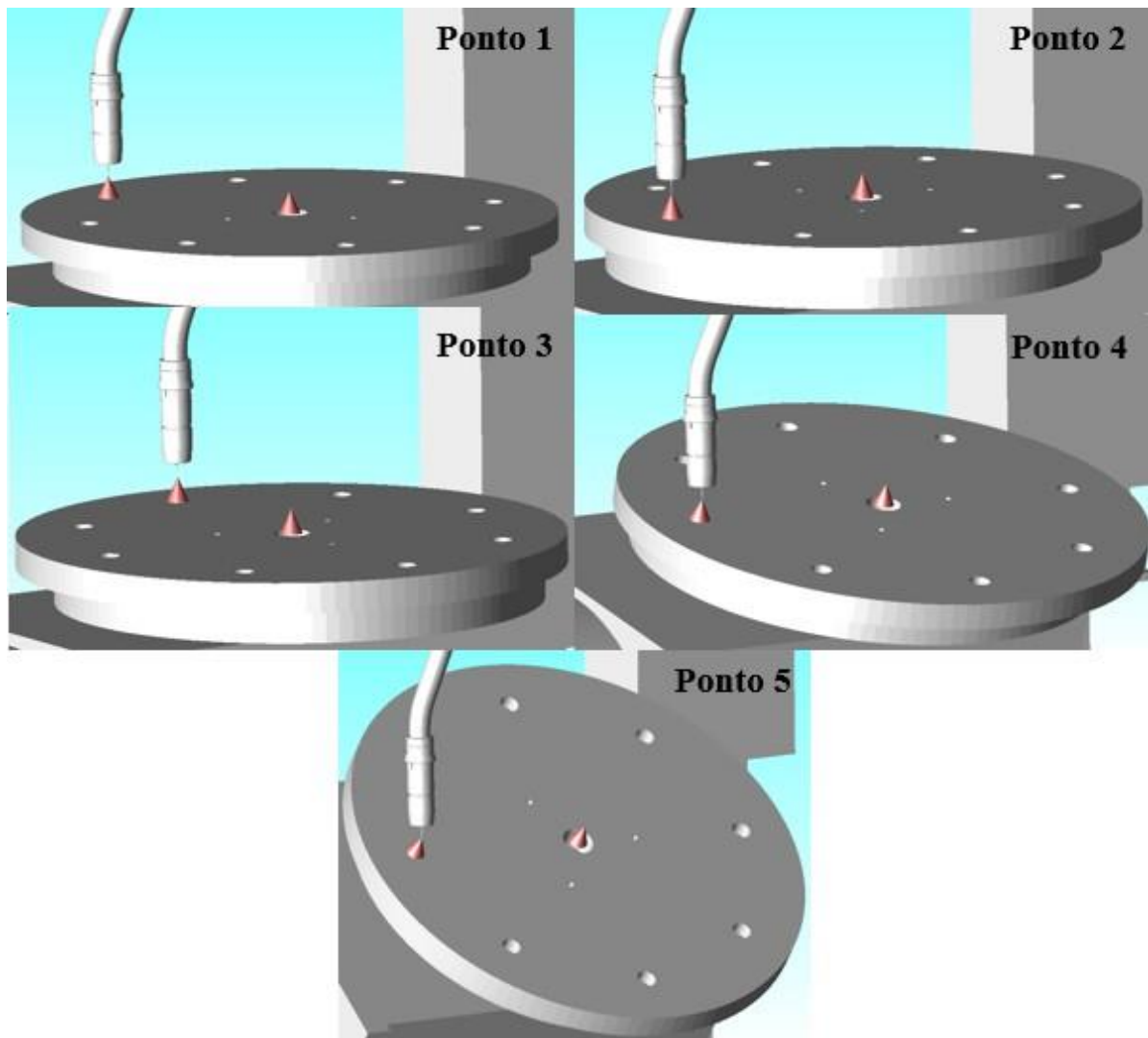
Para favorecer a execução precisa das trajetórias geradas no ambiente CAM, realizou-se a calibração entre o robô e o centro físico da mesa de trabalho. Esse procedimento utilizou a função *Robot Calib*, disponível no controlador *Yaskawa DX200*. Essa calibração estabelece uma referência espacial comum entre o ambiente virtual e a célula real, permitindo que o robô reconheça com exatidão sua posição relativa à mesa de deposição.

Figura 23 - Ambiente CAM.



Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

O processo de calibração consiste na gravação de cinco pontos distintos sobre a mesa, cada um em posições e ângulos variados, conforme a Figura 24. Esses pontos devem ser cuidadosamente posicionados de modo a capturar tanto a orientação quanto a translação entre os sistemas de coordenadas. Durante a execução da função *Robot Calib*, o robô é levado até cada um desses pontos e confirma suas posições. A partir desses dados, o sistema realiza os cálculos necessários para gerar a matriz de transformação que ajusta precisamente o modelo digital às condições físicas da célula.

Figura 24 - Pontos para calibração utilizando o *Robot Calib*.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Esse alinhamento é essencial para que as trajetórias exportadas pelo *PowerMill* sejam interpretadas corretamente pelo robô. Além disso, como o controlador trabalha com valores em pulsos (pulses) para acionar seus servomotores, todas as coordenadas geradas em graus ou milímetros pelo software CAM devem passar por um processo de conversão automática para unidades de pulso durante a carga do programa. Essa conversão garante que os movimentos físicos do robô correspondam fielmente às instruções digitais planejadas, mantendo a previsibilidade do processo.

3.1.2 Configuração de TCP e *frames* de referência

Após a calibração espacial entre o robô e o centro da mesa por meio da função *Robot Calib*, é necessário definir dois elementos fundamentais para a correta interpretação das trajetórias geradas no *PowerMill*: o TCP (*Tool Center Point*) e o *User Frame*.

O TCP representa o ponto exato da extremidade da ferramenta, neste caso, da tocha de solda, que será considerado como referência para os movimentos do robô. A criação do TCP é realizada acessando o menu “*TOOL*” do controlador, no qual são informadas as coordenadas de posição (X, Y, Z) e orientação angular (Rx, Ry, Rz) do ponto ativo em relação à flange do robô. Esses valores devem ser obtidos por medição ou por um processo de calibração por ponto único ou multipontos, garantindo que a simulação CAM e a execução real coincidam precisamente.

A definição correta do TCP é essencial para que o robô execute as trajetórias considerando o deslocamento real da tocha, o que permite o controle da orientação e da distância do cordão de deposição. No exemplo da Figura 25, observa-se que a tocha está cadastrada como “*TOCHA MADA*”, com os deslocamentos reais da ponta física da tocha em relação ao centro do flange do robô.

Figura 25 - Cadastro do TCP da tocha de solda.

TOOL					
TOOL NO. : 11 / 64					
NAME	TOCHA MADA				
X	-44.010	mm	Rx	-180.0000	deg.
Y	0.035	mm	Ry	-23.0000	deg.
Z	366.100	mm	Rz	0.0000	deg.
W	0.000	kg			
Xg	0.000	mm	Ix	0.000	kg.m2
Yg	0.000	mm	Iy	0.000	kg.m2
Zg	0.000	mm	Iz	0.000	kg.m2

Fonte: Elaborado pelo a autor (2025).

Já o *user frame* define o sistema de coordenadas da peça dentro da célula de trabalho. Esse frame é criado no controlador através da função “*USER COORDINATE*”, na qual são registrados três pontos sobre o plano da mesa para determinar a origem e orientação dos eixos

X e Y, de acordo com a Figura 26. Os dados são armazenados em pulsos e posteriormente associados a um número de referência, que será selecionado durante a execução da trajetória.

Figura 26 - Cadastro do *user frame* com origem no centro da mesa.

USER COORDINATE				
USER COORD NO.: 04				
R1 :S	-11400	TOOL: 11	SET POS.	ORG
L	38324		< STATUS >	
U	-48483		ORG	: ●
R	-36412		XX	: ●
B	-38420		XY	: ●
T	61857			

Fonte: Elaborado pelo a autor (2025).

A correta definição do *user frame* permite que o robô interprete as coordenadas absolutas geradas pelo *PowerMill* em relação à peça real na mesa. Dessa forma, evita-se o desalinhamento entre o mundo virtual do CAM e o ambiente físico, o que é fundamental em aplicações WAAM, no qual a precisão posicional entre camadas impacta diretamente a qualidade da peça final.

Em conjunto, o *TCP* e o *user frame*, junto com a calibração são os pilares que garantem que a trajetória criada no *software* CAM seja executada fielmente no robô, com a orientação, distância e posicionamento corretos em todas as camadas do processo aditivo.

3.1.3 Programação manual de trajetórias

Além da geração automática de movimentos a partir do software CAM, também foram realizadas programações manuais diretamente no *teach pendant* do robô, conforme Figura 27. Essa abordagem se mostrou fundamental, principalmente nas fases de experimentação e validação, o que favorece a criação de trajetórias simples, além de facilitar ajustes pontuais no processo. A programação manual possibilita, por exemplo, a deposição de pré-formas básicas compostas por cordões sobrepostos, executados por meio de ciclos repetitivos, que servem para testar parâmetros como velocidade, corrente, avanço e incrementos de camada. Essas estruturas simples são amplamente utilizadas em estudos de caso e investigações teóricas, pois oferecem um ambiente de teste rápido, prático e representativo das condições reais de deposição.

Dessa forma, a programação manual amplia significativamente a flexibilidade do

sistema, funcionando como uma ferramenta complementar e indispensável para validar, adaptar e otimizar as estratégias desenvolvidas no ambiente CAM.

Figura 27 - Exemplo de código de programação manual.

JOB CONTENT: MASTER J:BIBLIOTECA CONTROL GROUP: R1 S:0001 TOOL: 11 0034 *DEFINICAO PAREDE 0035 *STICKOUT 0036 SET D030 I090 * 1000 0037 *COMPRIMENTO 0038 SET D031 I091 * 1000 0039 *LARGURA 0040 SET D034 I096 * 100 0041 SET R003 I096 / 10 0042 *ALTURA 0043 SET R040 I100 0044 SET R041 I101 / 10 0045 SET R042 R040 / R041	JOB CONTENT: MASTER J:BIBLIOTECA CONTROL GROUP: R1 S:0001 TOOL: 11 0049 *SET PONTO INICIAL 0050 *EM X 0051 SET D032 I094 * 1000 0052 *EM Y 0053 SET D033 I095 * 1000 0054 *SET VAR DE POS INICIAL 0055 SETE P075 (1) D032 0056 SETE P075 (2) D033 0057 SETE P075 (3) D030 0058 *===== 0059 *===== 0060 *CICLO DE CAMADAS
JOB CONTENT: MASTER J:BIBLIOTECA CONTROL GROUP: R1 S:0001 TOOL: 11 0059 *===== 0060 *CICLO DE CAMADAS 0061 WHILE(I093<=I092) 0062 *===== 0063 *INCREMENTO CAMADA 0064 SET D040 R041 * 1000 * I093 0065 SETE P083 (3) D040 0066 *===== 0067 *INICIO PAREDE 0068 SFTON P083 0069 0002 11 MOVL P075 V=100.0 PL=0 0070 *	JOB CONTENT: MASTER J:BIBLIOTECA CONTROL GROUP: R1 S:0002 TOOL: 11 0070 *===== 0071 *IMPRESSAO EM X 0072 SET P076 P075 0073 GETE D020 P076 (1) 0074 SET D021 D020 - D031 0075 SETE P076 (1) D021 0076 ARCON ASF#(65) 0077 DOUT OT#(143) ON 0078 0003 11 MOVL P076 V=1053 PL=0 0079 ARCOF AEF#(1) 0080 DOUT OT#(143) OFF 0081 *

Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

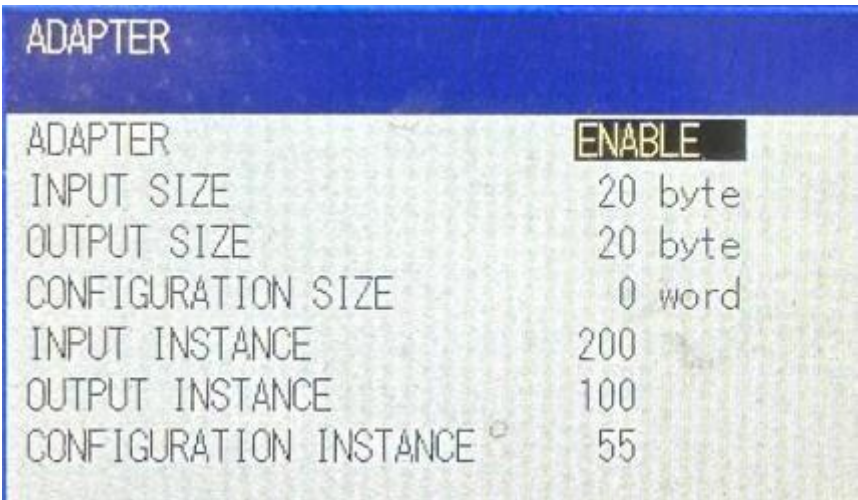
Entre os exemplos práticos dessa abordagem, pode-se destacar uma trajetória linear programada sobre uma chapa metálica, utilizada para calibrar a largura do cordão de solda com diferentes parâmetros de solda. Aplicações como essa reforçam o papel da programação manual como um recurso essencial, tanto na etapa de desenvolvimento quanto no ajuste fino do processo.

3.1.4 Integração do robô com CLP via rede *Ethernet/IP*

A integração entre o robô *Yaskawa* e o CLP da célula ocorre por meio de comunicação *Ethernet/IP*, adotando o robô como Adaptador (*Slave*) no barramento de rede. Essa configuração permite a troca de dados em tempo real entre os dois sistemas, o que sustenta a sincronia necessária para o funcionamento do sistema de automação em geral.

A configuração da rede é feita diretamente no controlador do robô, por meio da tela de ajuste de instâncias do adaptador, como é possível visualizar na Figura 28. Nessa interface, foram definidos os seguintes parâmetros:

Figura 28 - Configuração para troca de dados do robô pela rede.



Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

Esses blocos representam o tamanho e os endereços das áreas de memória que serão utilizadas para troca de dados entre o robô e o CLP. Os valores de entrada (*input*) são enviados do robô para o CLP, enquanto os de saída (*output*) são recebidos do CLP para o robô. Essa divisão é definida na planilha de rede elaborada, que estabelece a correspondência entre bits específicos e suas respectivas funções no processo. A Figura 29 demonstra uma pequena parte dessa planilha a fim de expor a organização de dados da rede.

Figura 29 - Organização de dados por endereço de cada dispositivo.

SAIDAS PLC BYTE	SAIDAS PLC BITS	Comentário	Correnpondente no robô
%QB8	%QX8.0		DIN 137
	%QX8.1	TEMPERATURA_OK	DIN 138
	%QX8.2		DIN 139
	%QX8.3		DIN 140
	%QX8.4		DIN 141
	%QX8.5		DIN 142
	%QX8.6		DIN 143
	%QX8.7		DIN 144
ENTRADAS PLC BYTE	ENTRADAS PLC BITS	Comentário	Correnpondente no robô
%IB32	%IX32.0		DOUT 137
	%IX32.1		DOUT 138
	%IX32.2		DOUT 139
	%IX32.3		DOUT 140
	%IX32.4		DOUT 141
	%IX32.5		DOUT 142
	%IX32.6	ARCON	DOUT 143
	%IX32.7	ARCOFF	DOUT 144

Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

No robô *Yaskawa*, as áreas de entrada e saída são tratadas como universais e mapeadas dentro do programa *ladder* do controlador. Cada entrada ou saída virtual é referenciada por um

número e pode ser associada diretamente a uma DIN (Digital Input) ou DOUT (Digital Output) dentro do sistema de controle do robô.

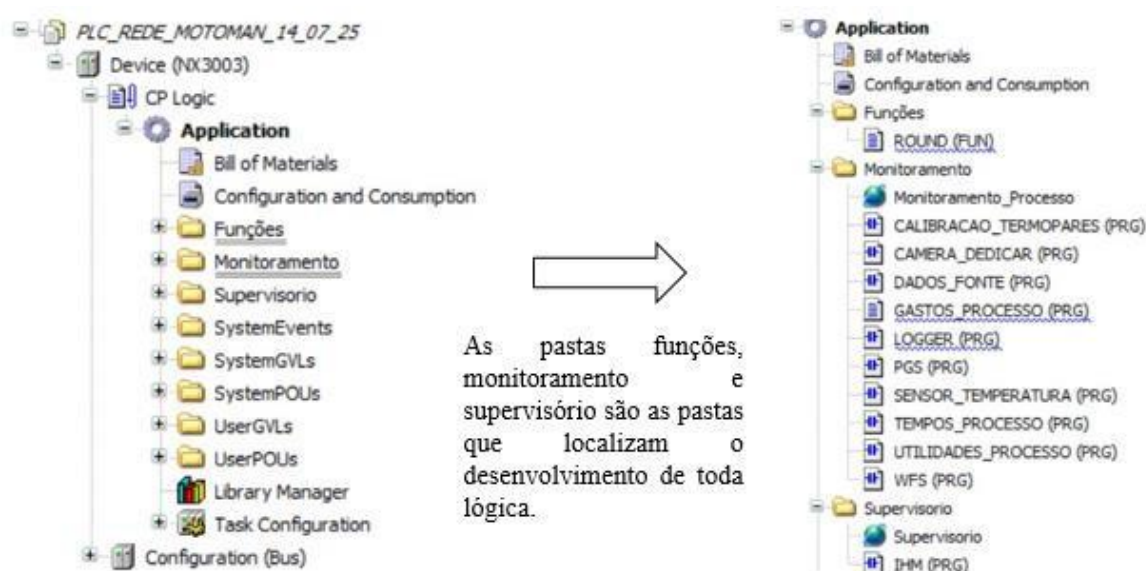
Esse modelo de comunicação cria uma ponte sólida entre os parâmetros externos monitorados por sensores e a programação do robô, essencial em aplicações WAAM nas quais esses parâmetros externos precisam ser monitorados e reagidos em tempo real.

3.2 Programação e estruturação do CLP

A programação do CLP (*Altus NX3003*) realizou-se no ambiente *MasterTool* IEC XE, que oferece suporte a uma programação estruturada e modular. Desde o início, a lógica de controle organizou-se em pastas funcionais, cada uma com responsabilidades bem definidas, o que favoreceu a manutenção, o entendimento e a escalabilidade do projeto.

As rotinas foram distribuídas de modo que funções reutilizáveis, monitoramento do processo e supervisão do sistema ficassem claramente separadas, conforme Figura 30. As funções criadas deram suporte a diversas operações, como o tratamento de sinais analógicos. A parte de monitoramento concentrou-se nas operações específicas do processo WAAM, como a aquisição de dados de sensores, a validação de condições de operação e a seleção de insumos. Já a parte supervisória gerencia as interações com o operador por meio da IHM e as trocas de estado entre os dispositivos envolvidos na célula.

Figura 30 - Árvore do projeto do CLP.



Cada funcionalidade do sistema foi encapsulada em blocos de programa específicos, o que possibilitou uma abordagem orientada a tarefas. Assim, os comportamentos relacionados à leitura de sensores, controle de gravação de dados, validação de parâmetros de processo, cálculos de produção, entre outros, foram implementados de forma independente. Esse modelo facilita o diagnóstico de falhas e o desenvolvimento de futuras atualizações.

Destaca-se ainda que, a organização das variáveis do projeto foi realizada com o mesmo rigor, mantendo-as agrupadas por contexto de uso, como demonstra a Figura 31. Essa separação lógica contribuiu para evitar interferências cruzadas, melhorar a legibilidade do código e simplificar a integração com sistemas externos.

Figura 31 - Exemplo de método de declaração de variáveis utilizado no projeto do CLP.

```
//Variáveis Booleanas
ARCON AT %IX32.6 : BOOL;
ARCOFF AT %IX32.7 : BOOL;
FIM_TRABALHO AT %IX35.1 : BOOL;
DADOS_COLETADOS AT %IX35.2 : BOOL;
RUN AT %IX50.0 : BOOL;
CONTAGEM_CAMADAS AT %IX35.3 : BOOL;
RESET_CAMADAS AT %IX35.4 : BOOL;
INC_WFS AT %IX35.5 : BOOL;
RESET_WFS AT %IX35.6 : BOOL;
TEMPERATURA_OK AT %QX8.1 : BOOL;
HABILITAR_GRAVACAO : BOOL;
TESTE : BOOL;
INICIO_TRABALHO : BOOL;
GRAVACAO_Dedicar : BOOL;

//Variáveis Reais
VAZAO : REAL;
VAZAO_REAL : REAL;
SET_POINT_WFS : REAL;
SET_POINT_VEL_SOLDA : REAL;
COMPRIMENTO_CORDAO : REAL;
VAZAO_DEC2 : REAL;
VAZAO_DEC3 : REAL;
TEMPO_DE_TRABALHO_TEMPO_DE_SOLDAGEM : REAL;
VALOR_WFS : REAL;
SENSOR_TEMP : REAL;
WFS_M : REAL;

//Variáveis Inteiras
TEMPO_TRABALHO_MINUTOS_ : DINT;
TEMPO_ARCO_ABERTO_MINUTOS_ : DINT;
TEMPO_VAZAO_MINUTOS_ : DINT;
TEMPO_DE_TRABALHO_SEGUNDOS : DINT;
TEMPO_ARCO_ABERTO_SEGUNDOS : DINT;
TEMPO_VAZAO_SEGUNDOS : DINT;
CAMADA_DE_SOLDA : INT;
SET_POINT_VAZAO : INT;
VAZAO_INT : INT;
VAZAO_DEC : INT;
LITROS_GAS_GASTO : DINT;
INT_TEMP : INT;
SETPOINT_TEMP : INT;

//Variáveis Arame ER316L
TAXA_DEPOSICAO_POR_SEGUNDOS_ER316L : REAL;
TAXA_DEPOSICAO_POR_MINUTOS_ER316L : REAL;
MASSA_DEPOSITADA_POR_SEGUNDOS_ER316L : REAL;
MASSA_DEPOSITADA_POR_MINUTOS_ER316L : REAL;
AREA_ER316L : REAL := 0.00000113;
DENSIDADE_ER316L : REAL := 7706.45;
ARAME_ER316L_SELECIONADO : BOOL;
```

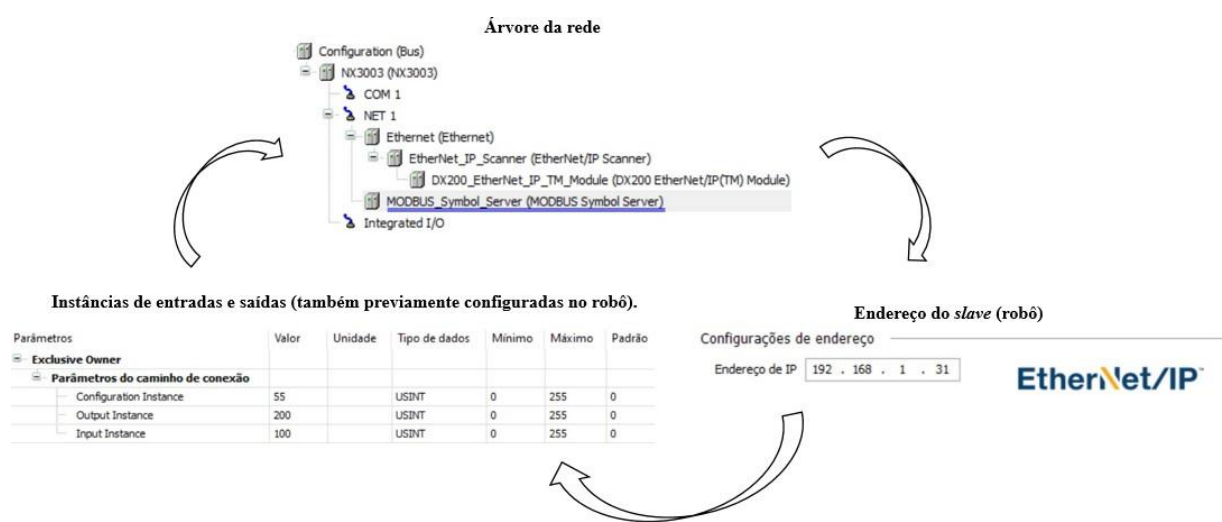
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.2.1 Comunicação com dispositivos industriais

A comunicação entre o CLP e os demais componentes da célula seguiu protocolos bem definidos, sendo o CLP atuando como *master* (*scanner*). Esse tipo de conexão permitiu estabelecer uma troca contínua e sincronizada de informações, essencial para coordenar etapas críticas, como monitoramento de temperatura da deposição, verificação da vazão gás e refrigeração do processo, além registrar o tempo de arco aberto e comportamento da curva de tensão e corrente.

A estrutura da comunicação foi planejada de forma a mapear os dados em regiões específicas da memória do CLP, organizando tanto sinais de entrada quanto de saída. A utilização de instâncias de entrada, saída e configuração permitiu uma conexão eficiente e determinística, respeitando os tempos de varredura do sistema e o que garante o controle preciso de cada evento, como é possível visualizar na Figura 32.

Figura 32 - Configuração da rede pelo CLP



Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

Para a interface com a IHM e o supervisor, o sistema utilizou o protocolo *Modbus* TCP/IP. Essa rede permitiu que tanto comandos de operação quanto dados de monitoramento fossem compartilhados em tempo real com os sistemas de supervisão e controle local. As variáveis foram mapeadas de forma lógica entre endereços destinados a sinais digitais e registros analógicos, facilitando tanto a leitura de status quanto a escrita de parâmetros de operação, como seleção de insumos, controle de gravação e validação de condições do processo.

3.2.2 Lógica de funcionamento

A lógica de controle desenvolvida para o sistema de automação WAAM foi estruturada com programas dedicados a diferentes aspectos críticos do processo, o que promove uma supervisão completa. Parte das rotinas foi projetada com foco na análise de consumo de insumos, o que viabiliza o monitoramento preciso dos materiais utilizados durante a deposição, como o controle da vazão de gás de proteção, essencial para assegurar a qualidade da peça final. Outras tarefas foram implementadas especificamente para acompanhar parâmetros em tempo

real e definir ações para o processo, como a temperatura da peça durante a deposição, assegurando que o processo ocorra dentro das faixas ideais e prevenindo falhas térmicas.

Acrescenta-se que, módulos dedicados à organização e registro dos dados operacionais foram desenvolvidos, gerando arquivos de log (do tipo .CSV) que armazenam o histórico das variáveis do processo, fornecendo rastreabilidade e suporte para análise posterior. O sistema também conta com rotinas voltadas para as utilidades do processo, responsáveis por gerenciar alarmes e notificações ao operador, o que viabiliza respostas rápidas a qualquer anomalia detectada. Toda essa estrutura foi integrada ao supervisor, responsável pela IHM, centralizando a visualização e o controle das variáveis de forma intuitiva e acessível. Na sequência apresentam-se as tarefas essenciais responsáveis por operacionalizar as estratégias de monitoramento, controle e registro das variáveis do processo:

- Monitoramento do consumo de insumos: A Figura 33 demonstra uma parte do desenvolvimento da lógica dedicada ao cálculo da quantidade de gás utilizado e da massa de material depositado ao longo do processo. O sistema realiza medições em tempo real, considerando o tempo em que o arco permanece aberto e os valores de *setpoint* previamente definidos para os parâmetros de vazão e alimentação do arame. Com base nessas informações, são calculados indicadores como o volume de gás consumido por minuto e a quantidade de material depositado. Esses cálculos permitem um monitoramento do desempenho do processo, contribuindo para a otimização do uso de insumos e o que assegura a repetibilidade das condições de fabricação.

Figura 33 - Lógica para monitoramento de insumos do processo WAAM.

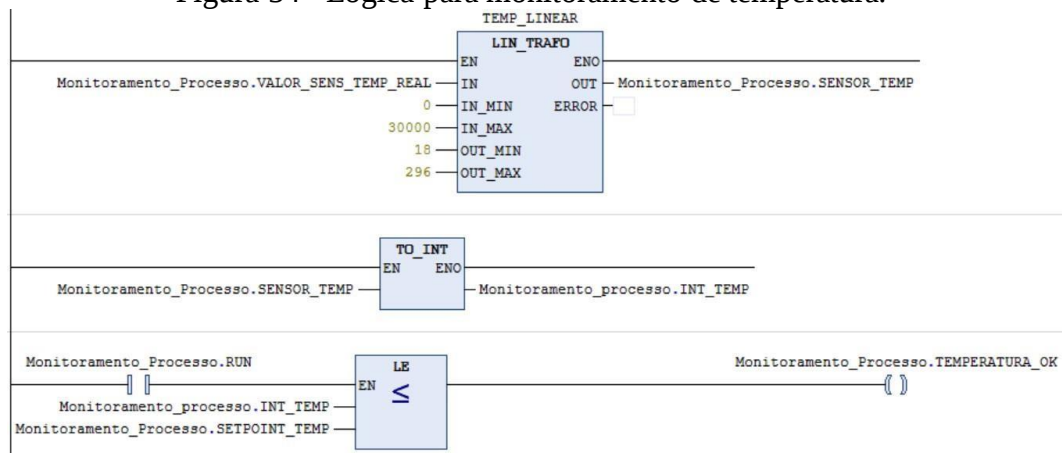
```
//Quantidade de gás gasto por minutos
Monitoramento_Processo . LITROS_GAS_GASTO := Monitoramento_Processo .
TEMPO_ARCO_ABERTO_MINUTOS_ * Monitoramento_Processo . SET_POINT_VAZAO ;

//Comprimento do cordão soldado
Monitoramento_Processo . COMPRIMENTO_CORDAO := Monitoramento_Processo .
SET_POINT_VEL_SOLDA * Monitoramento_Processo . TEMPO_ARCO_ABERTO_MINUTOS_ ;

//Taxa de deposição e massa depositada durante o processo de impressão do
arame 80SG
IF ( Monitoramento_Processo . ARAME_80SG_SELECIONADO OR
Monitoramento_Processo . GRAVACAO_DEDICAR ) THEN
Monitoramento_Processo . MASSA_DEPOSITADA_POR_SEGUNDOS_80SG := ROUND ( (
Monitoramento_Processo . DENSIDADE_80SG * Monitoramento_Processo . AREA_80SG *
( Monitoramento_Processo . SET_POINT_WFS / 60 ) * Monitoramento_Processo .
TEMPO_ARCO_ABERTO_SEGUNDOS ) ) ;
Monitoramento_Processo . MASSA_DEPOSITADA_POR_MINUTOS_80SG := (
Monitoramento_Processo . DENSIDADE_80SG * Monitoramento_Processo . AREA_80SG * (
Monitoramento_Processo . SET_POINT_WFS ) * Monitoramento_Processo .
TEMPO_ARCO_ABERTO_MINUTOS_ ) ;
Monitoramento_Processo . TAXA_DEPOSICAO_POR_MINUTOS_80SG :=
Monitoramento_Processo . MASSA_DEPOSITADA_POR_MINUTOS_80SG /
Monitoramento_Processo . TEMPO_ARCO_ABERTO_MINUTOS_ ;
Monitoramento_Processo . TAXA_DEPOSICAO_POR_SEGUNDOS_80SG := ROUND (
Monitoramento_Processo . MASSA_DEPOSITADA_POR_SEGUNDOS_80SG /
Monitoramento_Processo . TEMPO_ARCO_ABERTO_SEGUNDOS ) ;
END_IF
```

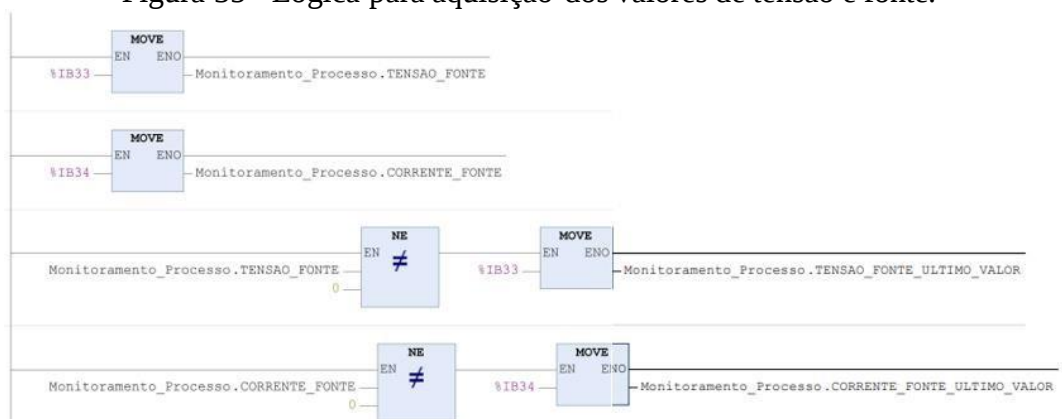
- Controle de parâmetros de solda: O sistema realiza o monitoramento em tempo real dos principais parâmetros que influenciam diretamente na qualidade do processo de manufatura aditiva, como temperatura da peça, vazão de gás de proteção, tensão e corrente da fonte de solda. A temperatura é medida por sensores dedicados, com sinais linearizados e constantemente comparados aos *setpoints*, garantindo que a deposição ocorra dentro das faixas térmicas ideais, conforme Figura 34. A vazão de gás é supervisionada por um sistema de medição de alta precisão (PGS – *Precision Gas System*), assegurando um fluxo constante e adequado ao processo. Simultaneamente, os valores de tensão e corrente da fonte são atualizados a cada ciclo de varredura do CLP, como é possível visualizar na Figura 35, o que permite detectar rapidamente qualquer variação nos parâmetros elétricos. Todas essas variáveis são acompanhadas em tempo real para garantir a estabilidade do processo e, em caso de desvios.

Figura 34 - Lógica para monitoramento de temperatura.



Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

Figura 35 - Lógica para aquisição dos valores de tensão e fonte.



Fonte: Elaborado pelo a utor (2025).

- Geração de arquivos *logs*: A geração de arquivos de *log* no processo de monitoramento é fundamental para registrar os dados operacionais, o que favorece a rastreabilidade e análise de desempenho dos parâmetros durante a deposição. Esses registros são salvos em arquivos armazenados na memória interna do controlador, sendo organizados conforme as configurações de quantidade de registros e modo de operação, de acordo com a Figura 36. A interface homem-máquina (IHM) desempenha um papel essencial nessa dinâmica, pois permite ao operador supervisionar o status de gravação, receber feedbacks visuais sobre o sucesso ou falha na geração dos arquivos e selecionar as condições específicas que habilitam o início da gravação. Dessa forma, a IHM assegura uma interação intuitiva e eficaz entre o operador e o sistema de registro de dados, facilitando tanto a visualização das informações críticas quanto a gestão das ações corretivas quando necessário.

Figura 36 - Lógica para gravação de parâmetros em arquivos tipo CSV.

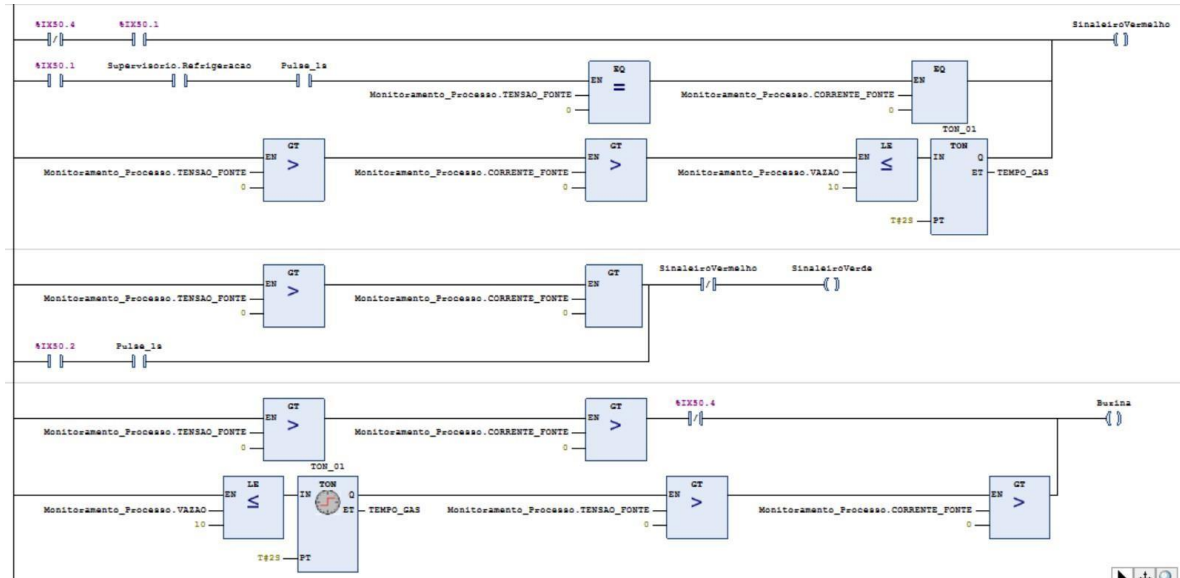


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

- Alarmes e notificação: A Figura 37 demonstra parte do sistema de alarmes que desempenha um papel fundamental na segurança e estabilidade do processo WAAM, o que garante que o operador seja alertado em caso de anomalias. A lógica de supervisão verifica continuamente os valores de tensão, corrente e vazão de gás, comparando-os com os limites estabelecidos. Caso ocorra qualquer desvio, como baixa vazão de gás, ausência de corrente ou tensão inadequada na fonte, o sistema aciona sinais visuais e sonoros, como sinalizadores luminosos e buzina, alertando o operador. Além disso,

temporizadores são utilizados para validar se a condição de falha persiste por um período determinado antes de disparar o alarme, evitando alarmes falsos devido a oscilações momentâneas.

Figura 37 - Lógica de alarmes e notificações do sistema.



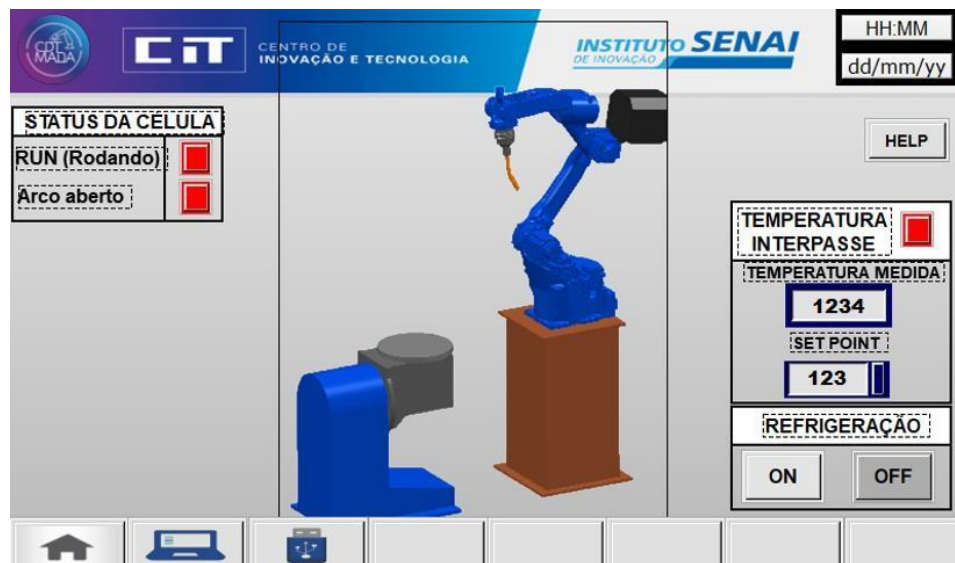
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

3.3 Desenvolvimento da interface Homem-Máquina (IHM)

A IHM foi desenvolvida com o propósito de permitir ao operador o acompanhamento gráfico do processo WAAM, além de possibilitar a intervenção direta no controle do sistema. A implementação foi realizada utilizando o software *DOPSoft*, sendo a IHM física do tipo *Delta DOP-107*, instalada na célula robotizada.

3.3.1 Organização e *layout* da interface

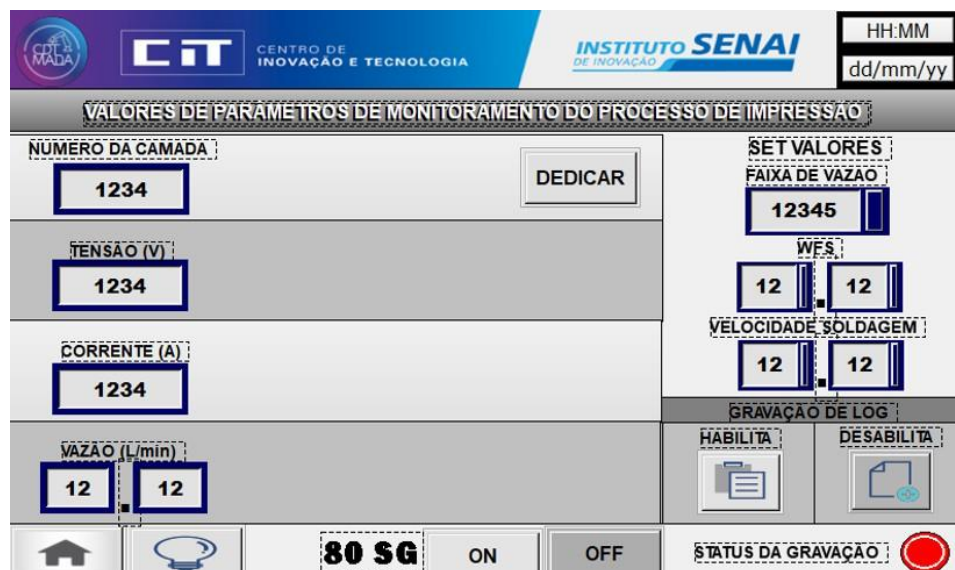
A estrutura da interface foi planejada de forma a distribuir as informações de maneira lógica e acessível. Na tela principal, o operador tem acesso imediato ao estado operacional do robô, à condição do arco elétrico e à temperatura do material durante o processo, como demonstra a Figura 38. Essa visualização permite uma análise rápida da condição da célula, com destaque visual para situações críticas. Nessa mesma tela, é possível configurar o valor de referência de temperatura desejado e acionar manualmente o sistema de refrigeração, tornando o controle da célula mais responsivo.

Figura 38 - Tela *home* da IHM da célula.

Fonte: Elaborado pelo a autor (2025).

A Figura 39 representa uma outra tela foi desenvolvida com foco no acompanhamento dos parâmetros do processo de impressão. Nela são apresentados, de forma organizada, os valores de tensão, corrente, número de camada, vazão de gás, velocidade de soldagem e velocidade de alimentação de arame. O operador também pode definir limites de operação, selecionar o tipo de consumível metálico utilizado no processo e ativar ou desativar a gravação de dados diretamente por comandos na interface.

Figura 39 - Tela de visualização dos parâmetros do processo.



Fonte: Elaborado pelo a autor (2025).

3.3.2 Comunicação com o CLP e mapeamento de dados

A comunicação entre a IHM e o CLP *Altus NX3003* foi realizada por meio do protocolo *Modbus TCP/IP*, utilizando a porta padrão para acesso aos dados. Os valores apresentados na interface e os comandos acionados pelo operador são diretamente relacionados às variáveis mapeadas no CLP, que por sua vez refletem os estados reais da célula.

Além da leitura de variáveis internas do processo, a IHM também realiza escrita em variáveis do CLP, o que permite executar ações a partir da interface, como iniciar a gravação de dados, selecionar parâmetros de processo ou habilitar dispositivos auxiliares. Essa bidirecionalidade da comunicação torna a interface um ponto central de supervisão e controle, contribuindo para a autonomia do operador e a confiabilidade do sistema como um todo.

3.4 Desafios de integração e implementação

Durante o desenvolvimento do sistema, diversas dificuldades foram encontradas, principalmente relacionadas à integração entre os diferentes subsistemas envolvidos. A sincronização da comunicação entre o robô industrial, o CLP, os sensores e a fonte de solda exigiu um esforço contínuo de configuração, testes e ajustes finos, visando garantir a troca de dados de forma confiável e em tempo real. Desafios como o correto mapeamento de sinais, compatibilidade entre protocolos de comunicação e estabilidade da rede foram recorrentes ao longo do processo.

Ademais, o desenvolvimento das lógicas no CLP demandou atenção na organização modular do código, no tratamento adequado das variáveis e na definição de condições seguras de operação, especialmente devido à natureza dinâmica do processo WAAM. A etapa de testes também se mostrou crítica, uma vez que foi necessário validar o funcionamento integrado de todos os componentes, identificar falhas de sincronismo e corrigir inconsistências entre o comportamento esperado e o real. Dessa forma, os ciclos de testes e ajustes foram fundamentais para alcançar um sistema estável e com capacidade de repetição adequada para o processo de manufatura.

4 RESULTADOS

A partir da metodologia aplicada, apresentam-se os resultados obtidos com o sistema desenvolvido.

4.1 Validação do sistema de automação

Os resultados foram analisados sob três perspectivas: desempenho geométrico da peça, ganhos operacionais do sistema automatizado e contribuição da arquitetura de monitoramento desenvolvida. Como estudo de caso, utilizou-se a fabricação da peça denominada *Porta Bricks*, usualmente utilizado para teste de catalisador no setor automotivo, cuja geometria apresenta características relevantes para análise de estabilidade e repetibilidade do processo, sendo representativa de aplicações industriais.

Durante a execução dos ensaios, observou-se que a comunicação entre os dispositivos ocorreu de forma contínua e sem falhas, o que viabiliza a sincronização entre a execução da trajetória robótica e a aquisição das variáveis do processo. O sistema demonstrou capacidade de operar de maneira estável ao longo de toda a fabricação, sem ocorrência de interrupções não planejadas, evidenciando robustez para aplicações industriais.

Cumpre destacar que, a integração entre os dispositivos permitiu que o operador tivesse acesso em tempo real às informações do processo, o que viabiliza condições para intervenções rápidas e assertivas. Esse aspecto representa uma evolução significativa em relação ao método manual anteriormente utilizado, no qual não havia visibilidade das variáveis durante a deposição.

Tabela 1 - Comparação do processo antes e depois da automação.

Critério	Processo manual	Sistema desenvolvido
Monitoramento em tempo real	Não	Sim
Registro em CSV	Não	Sim
Alarmes de processo	Não	Sim
Programação de trajetória	<i>Teach pendant</i> (Manual)	<i>PowerMill</i> (Automático)
Repetibilidade	Baixa	Alta
Rastreabilidade	Limitada	Ampliada

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 1 evidencia que os ganhos obtidos não se restringem à geometria depositada, mas abrangem também monitoramento, rastreabilidade e robustez operacional do processo.

4.1.1 Monitoramento e aquisição de dados

A implementação do sistema de aquisição de dados possibilitou o registro contínuo das principais variáveis do processo, incluindo tensão, corrente, vazão de gás, tempo de arco aberto, tempo total de produção e taxa de deposição, conforme Figura 40. Os dados foram armazenados em arquivos no formato CSV, o que garante a rastreabilidade completa do processo e permitindo análises posteriores detalhadas.

Figura 40 - Parte de um arquivo CSV salvo durante processo.

RECORD	CAMADA	TENSAO(V)	CORRENTE(A)	VAZAO(L/min)	LITROS GAS GASTO(L)	MASSA DEPOSITADA(Kg)	TX. DEPOSICAO MINUTOS(Kg/min)	TEMPO ARCO ABERTO(min)	TEMPO PRODUCAO(min)
2045	1	15	118	16,01885	272	0,5066062	0,0291992	17	35
2046	1	14	140	15,676433	272	0,5070928	0,0291992	17	35
2047	1	14	132	16,01885	272	0,5075795	0,0291992	17	35
2048	1	15	126	16,01618	272	0,5080661	0,0291992	17	35
2049	1	15	116	15,850319	272	0,5085528	0,0291992	17	35
2050	1	14	131	16,0242	272	0,5090394	0,0291992	17	35
2051	1	14	138	16,0135	272	0,5095261	0,0291992	17	35
2052	1	14	128	16,01083	272	0,5100128	0,0291992	17	35

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Essa capacidade de registro também representa um avanço significativo em relação ao processo manual, no qual não havia qualquer tipo de monitoramento estruturado, como já apresentado na Tabela 1. A disponibilidade de dados permite a construção de indicadores de desempenho e a análise do comportamento do processo sob diferentes perspectivas, como por tempo de arco aberto e por camada depositada.

Conforme observado no estudo de caso, a análise dos dados registrados é fundamental para a identificação de padrões operacionais, avaliação de desempenho e suporte à tomada de decisão, contribuindo para a melhoria contínua do processo produtivo (DING *et al.*, 2015).

4.2 Análise da trajetória: programação manual versus geração por *software*

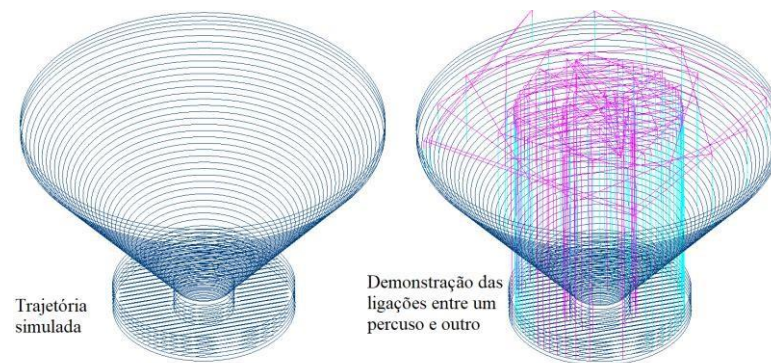
Um dos aspectos mais relevantes do processo de fabricação analisado está relacionado à forma de geração das trajetórias de deposição. No método tradicional, a programação do robô era realizada manualmente, ponto a ponto, o que limita significativamente a complexidade geométrica das peças e aumenta a dependência da experiência do operador.

Nesse tipo de método, não há garantia de uniformidade entre trajetórias, sendo comum a ocorrência de variações na deposição devido a inconsistências na programação. Em

complemento, a ausência de integração com parâmetros de processo dificulta a otimização da estratégia de fabricação.

Por outro lado, na abordagem adotada neste trabalho, a trajetória foi gerada por meio do *software* de manufatura assistida *PowerMill*, o qual permite o fatiamento do modelo CAD em camadas e a definição automática das estratégias de deposição, como demonstrado na Figura 41.

Figura 41 - Trajetória desenvolvida pelo *PowerMill* para o *Porta Bricks*.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A utilização de ferramentas computacionais para geração de trajetória apresenta diversas vantagens técnicas, entre as quais se destacam maior uniformidade do cordão depositado, redução de excesso de material, menor variação geométrica entre camadas, menor incidência de respingos e melhor acabamento superficial. Esses fatores estão associados ao controle mais consistente da trajetória e à consistência promovida pela automação, como é possível visualizar na Figura 42.

Figura 42 - Comparação de deposições.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Tabela 2 - Comparação dimensional das peças manufaturadas.

Parâmetro	Manual (mm)	Automatizado (mm)	Referência (mm)	Erro Manual (%)	Erro Automatizado (%)
Altura	114	121	119	4,2%	1,7%
Diâmetro interno	120	134	136	11,8%	1,5%

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A Tabela 2 apresenta os resultados da avaliação dimensional das peças manufaturadas. Observa-se que o processo automatizado apresentou melhor desempenho em relação à deposição manual. Para a altura da peça, a estratégia automatizada apresentou erro relativo de aproximadamente 1,7%, enquanto o processo manual registrou erro de 4,2%. Para o diâmetro interno superior, observou-se erro de apenas 1,5% no processo automatizado, enquanto o método manual apresentou desvio de 11,8%. Esses resultados evidenciam maior aderência ao modelo CAD proporcionada pela estratégia automatizada.

Adicionalmente, observa-se que a estratégia automatizada promoveu redução relativa de 59,5% no erro associado à altura e de 87,3% no erro relacionado ao diâmetro interno, evidenciando ganhos significativos de precisão dimensional em relação à programação manual.

A redução dos erros dimensionais observada não decorre apenas da automatização da trajetória, mas pode ser associada a mecanismos físicos inerentes ao processo. A geração automatizada das trajetórias contribui para maior uniformidade na sobreposição dos cordões e

menor acúmulo de desvios entre camadas, reduzindo a propagação de erros geométricos ao longo da construção da peça.

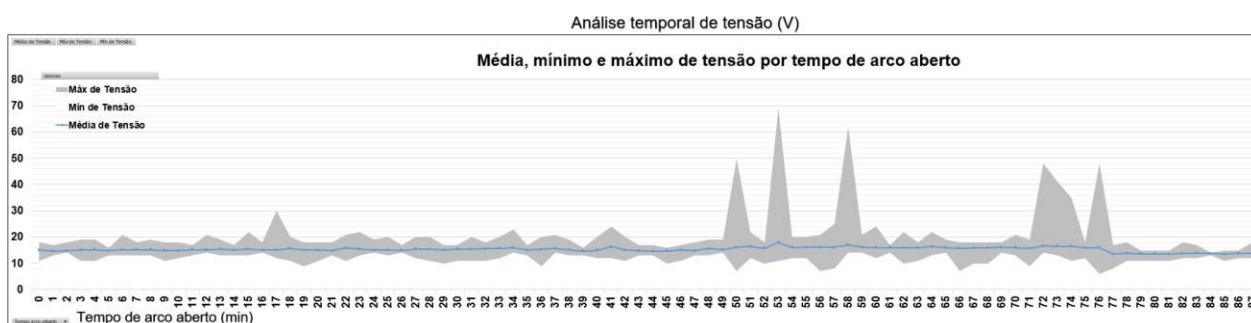
Também se observa que, a consistência na movimentação do robô e no controle dos parâmetros de deposição tende a favorecer distribuição térmica mais uniforme, minimizando variações na formação do cordão e efeitos associados à distorção. Sob essa perspectiva, a melhoria dimensional observada pode ser interpretada como consequência causal da maior estabilidade promovida pela automação proposta.

Portanto, a adoção de ferramentas de geração automática de trajetória representa um avanço relevante na consolidação do WAAM como processo industrial, pois permite integrar geometria, parâmetros de processo e estratégia de deposição em um único ambiente. Embora a validação geométrica tenha sido apresentada com base em uma peça representativa, a consistência dos sinais monitorados ao longo dos ensaios e a repetição das condições operacionais examinadas fornecem evidências complementares de reprodutibilidade do sistema desenvolvido.

4.3 Análise de parâmetros: tensão e corrente elétrica.

A análise da tensão ao longo do tempo de arco aberto evidencia aspectos importantes relacionados à estabilidade do processo. Conforme apresentado na Figura 43, a tensão média se manteve predominantemente na faixa de aproximadamente 14 V a 16 V durante a maior parte da deposição.

Figura 43 - Trecho do gráfico referente à análise da tensão elétrica em função do tempo de arco aberto.



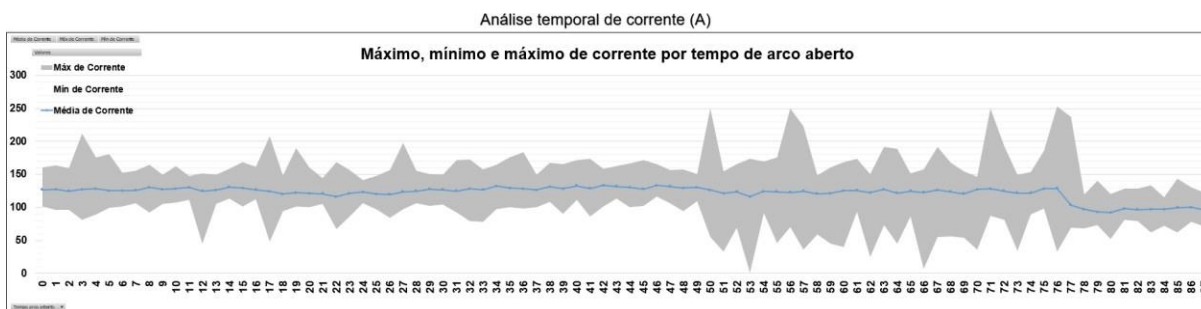
Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

A observação do comportamento da variável revela que, embora existam picos pontuais de tensão, estes se caracterizam como eventos transitórios, não comprometendo a estabilidade global do processo. Tais variações podem ser atribuídas a fatores inerentes ao WAAM, como mudanças de trajetória.

A manutenção da tensão dentro de uma faixa relativamente estreita indica que o processo operou em regime estável, com rápida recuperação após perturbações. Essa estabilidade é fundamental para garantir a qualidade da transferência metálica e a formação adequada do cordão depositado.

Em relação a análise da corrente complementa a avaliação do comportamento do arco elétrico, o que possibilita uma compreensão mais detalhada da dinâmica do processo. Conforme apresentado na Figura 44, a corrente média permaneceu na faixa de aproximadamente 120 A a 140 A ao longo da deposição.

Figura 44 - Trecho do gráfico referente à análise da corrente elétrica em função do tempo de arco aberto.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Observa-se a ocorrência de picos e quedas pontuais, característicos do processo WAAM, associados a eventos como início e término de cordões, mudanças de direção e variações na alimentação do material. Apesar dessas oscilações, o sistema apresentou rápida estabilização, mantendo a corrente dentro de limites operacionais aceitáveis.

A estabilidade dos sinais de corrente e tensão observada durante a deposição sugere consistência operacional do processo, sendo compatível com deposições estáveis em WAAM descritas na literatura.

4.3.1 Avaliação da estabilidade operacional do processo WAAM

Complementarmente aos resultados dimensionais apresentados na Tabela 2, os dados adquiridos durante a gravação de arquivos do processo permitiram avaliar estatisticamente o comportamento das principais variáveis monitoradas em tempo real, incluindo tensão, corrente, vazão de gás e taxa de deposição. Os baixos níveis de dispersão observados em parâmetros críticos, particularmente na vazão e na taxa de deposição, indicam estabilidade operacional ao longo da fabricação da peça e reforçam a relação entre desempenho geométrico e consistência do processo.

A relevância desses resultados é ampliada pela capacidade de rastreamento das variáveis operacionais ao longo de todo o processo de fabricação. Nesse contexto, os indicadores estatísticos apresentados na Tabela 3 não apenas caracterizam o comportamento das variáveis monitoradas, mas também fornecem subsídios para a análise da qualidade da deposição, permitindo correlacionar as condições operacionais com o desempenho dimensional da peça produzida.

Tabela 3 - Estatística descritiva dos parâmetros monitorados durante a deposição WAAM.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Coeficiente de variação (%)
Tensão (V)	15,236	1,886	12,40
Corrente (A)	117,65	22,079	18,80
Vazão (L/ min)	15,51	0,948	6,10
Taxa deposição (kg/ h)	0,03006	0,000369	1,23

Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

No contexto do WAAM, a consistência das variáveis de processo é um fator determinante, uma vez que oscilações significativas de corrente, tensão ou aporte de material podem comprometer a formação do cordão, a uniformidade entre camadas e a integridade geométrica da peça construída. Sob essa perspectiva, os resultados obtidos evidenciam a robustez do sistema desenvolvido, demonstrando que o monitoramento contínuo e o controle das variáveis operacionais contribuem para a previsibilidade do comportamento de deposição.

Consequentemente, a arquitetura proposta favorece a repetibilidade do processo e fornece informações relevantes para a rastreabilidade e avaliação da qualidade das peças produzida.

4.4 Eficiência operacional

A análise dos dados revelou tempo de arco aberto de aproximadamente 120 minutos e tempo total de produção de aproximadamente 800 minutos. A razão entre o tempo de arco aberto e o tempo total de produção indica eficiência de arco de aproximadamente 15%, evidenciando que o arco permaneceu ativo durante uma parcela reduzida do ciclo produtivo, enquanto o tempo restante corresponde a movimentações, reposicionamentos e operações auxiliares inerentes ao processo.

Embora esse percentual pareça reduzido, verificou-se que a maior parcela do tempo improdutivo está relacionada à espera entre camadas para resfriamento e a pausas operacionais inerentes ao processo WAAM, e não a ineficiências do sistema de automação. Os tempos associados à movimentação do robô representaram parcela secundária desse total. A identificação desses tempos é essencial para futuras otimizações do processo, permitindo aumentar a eficiência produtiva.

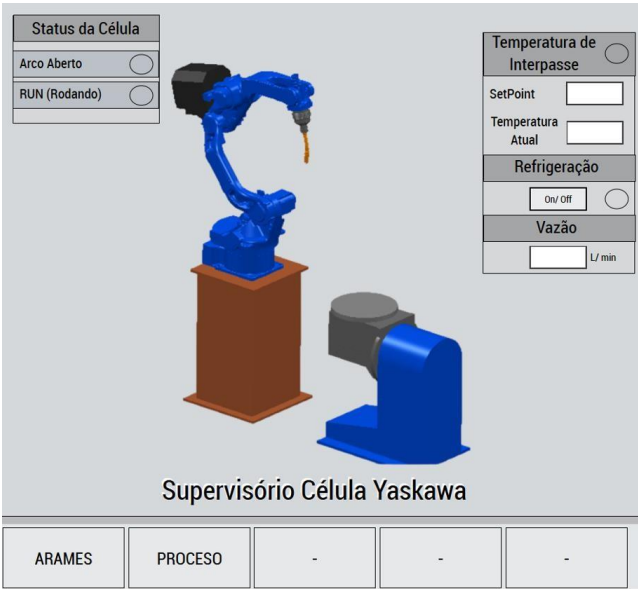
A disponibilidade dessas informações reforça a importância do sistema de monitoramento, pois permite análises quantitativas do desempenho da célula de manufatura.

4.5 Interface Homem-Máquina

A interface homem-máquina desenvolvida, como demonstra a Figura 45 e 46, permitiu uma interação eficiente entre o operador e a célula de manufatura, possibilitando o controle do processo por meio de comandos de *start* e *stop*, além da visualização em tempo real dos parâmetros operacionais.

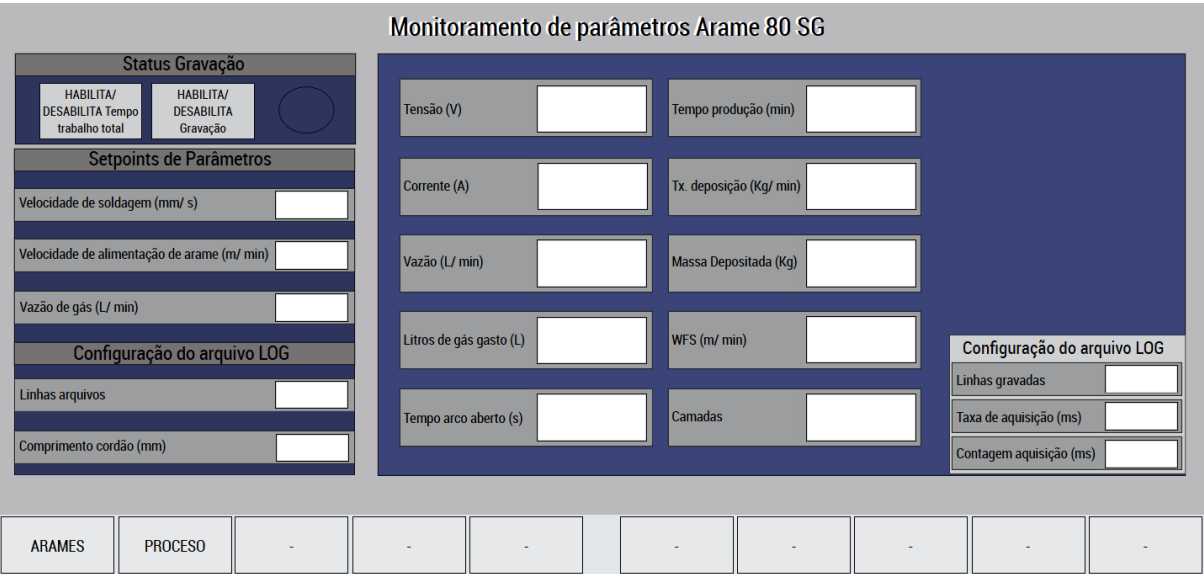
A centralização das informações em uma única interface contribuiu para tornar o processo mais dinâmico e intuitivo, facilitando a tomada de decisão e o que reduz a complexidade operacional. Durante os testes, a IHM apresentou funcionamento adequado, atendendo às necessidades da aplicação proposta.

Figura 45 - Home IHM para visualização geral do processo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

Figura 46 - Monitoramento dos parâmetros específicos durante deposição.



Fonte: Elaborado pelo autor (2026).

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo desenvolver e validar um sistema de automação e monitoramento aplicado a uma célula WAAM, integrando robô industrial, controlador lógico programável, interface supervisória e aquisição de variáveis operacionais, com foco na estabilidade operacional. A partir dos resultados obtidos, verificou-se que a arquitetura proposta atendeu aos objetivos estabelecidos, demonstrando viabilidade técnica para supervisão da operação e contribuição efetiva para a melhoria do desempenho dimensional das peças produzidas.

Os resultados indicaram que a automação implementada não se limitou à substituição de operações manuais, mas atuou como elemento interveniente na redução de variabilidade do sistema. A melhoria observada na precisão dimensional e na consistência dos parâmetros monitorados sugere que a integração entre controle, monitoramento e execução automatizada contribuiu para maior estabilidade de deposição, minimizando efeitos associados a desvios acumulados entre camadas e irregularidades geométricas típicas da manufatura aditiva WAAM.

Sob a perspectiva científica, o trabalho também contribui ao reforçar a relação causal entre automação e repetibilidade em sistemas WAAM, tema ainda pouco explorado de forma integrada na literatura. Diferentemente de abordagens focadas apenas no monitoramento isolado de variáveis ou na otimização pontual de parâmetros, a proposta apresentada demonstrou que a arquitetura de automação pode atuar como mecanismo estruturante para rastreabilidade, controle operacional e suporte à qualidade dimensional.

Além das contribuições técnicas e científicas, o sistema desenvolvido apresenta potencial de aplicação industrial, especialmente em cenários que demandam maior confiabilidade, escalabilidade e digitalização da manufatura. A solução proposta está alinhada aos princípios da Indústria 4.0 ao incorporar supervisão, aquisição de dados e integração entre subsistemas industriais como base para futuras estratégias de controle avançado.

Como continuidade desta pesquisa, recomenda-se a ampliação do número de replicatas experimentais, a incorporação de técnicas de monitoramento visual e sensoriamento em malha fechada, bem como a implementação futura de algoritmos de controle adaptativo capazes de atuar em tempo real sobre a deposição.

Conclui-se, portanto, que os objetivos propostos foram plenamente atingidos e que o sistema desenvolvido representa uma contribuição original e relevante tanto para a automação industrial aplicada ao WAAM quanto para o avanço de estratégias de monitoramento voltadas à repetibilidade e qualidade dimensional.

REFERÊNCIAS

- [1] **AZEVEDO, Hugo César Diniz.** Controlador lógico programável aplicado à indústria 4.0. 2018.
- [2] **BASTOS, Rômulo da Costa Brazil.** Interfaces homem-máquina de alta performance análise de aplicação junto à norma IEC 63303. 2021.
- [3] **CRAIG, John J.** *Introduction to robotics: mechanics and control*. 3. ed. Upper Saddle River: Pearson Prentice Hall, 2005.
- [4] **DA SILVA, Edilson Alfredo.** Introdução às linguagens de programação para CLP. Editora Blucher, 2021.
- [5] **DING, D. et al.** *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 81, p. 465–481, 2015.
- [6] **HEIMANN, O.; GUHL, J.** Industrial robot programming methods: A scoping review. 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA), p. 696–700, 2020.
- [7] **IAN GIBSON, Ian Gibson.** Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. 2015.
- [8] **JIN, Wanwan et al.** Wire arc additive manufacturing of stainless steels: a review. **Applied sciences**, v. 10, n. 5, p. 1563, 2020.
- [9] **JOSTEN, A.; HÖFEMANN, MJWitW.** Arc-welding based additive manufacturing for body reinforcement in automotive engineering. *Welding in the World*, v. 64, n. 8, p. 1449-1458, 2020.
- [10] **LU, Chen-Lung et al.** Multi-robot scan-n-print for wire arc additive manufacturing. *ASME Letters in Translational Robotics*, v. 1, n. 1, p. 011003, 2025.
- [11] **MICHEL, Florent et al.** A modular path planning solution for Wire+ Arc Additive Manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v. 60, p. 1-11, 2019.

- [12] **NIKU, S. B.** Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications. 3. ed. EUA: John Wiley Sons, 2020.
- [13] **PAN, Z.; POLDEN, J.; LARKIN, N.; DUIN, S. V.; NORRISH, J.** Recent progress on programming methods for industrial robots. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, p. 87–94, 2012.
- [14] **PETRUZELLA, Frank D.** Controladores lógicos programáveis. AMGH Editora, 2014.
- [15] **ROCHA, Sofia Tami Kitayama et al.** Modelo de referência para interface homem máquina no CLP. 2021.
- [16] **RODRIGUES, Tiago A. et al.** Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM). *Materials*, v. 12, n. 7, p. 1121, 2019.
- [17] **SHAH, Abid et al.** A review of the recent developments and challenges in wire arc additive manufacturing (WAAM) process. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 7, n. 3, p. 97, 2023.
- [18] **STAVROPOULOS, Panagiotis.** *Additive manufacturing: design, processes and applications*. Cham: Springer, 2023.
- [19] **TOMAR, Bunty; SHIVA, S.; NATH, Tameshwer.** A review on wire arc additive manufacturing: Processing parameters, defects, quality improvement and recent advances. *Materials Today Communications*, v. 31, p. 103739, 2022.
- [20] **TURNER, Brian N.; GOLD, Scott A.** A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. *Rapid Prototyping Journal*, v. 21, n. 3, p. 250-261, 2015.
- [21] **VAGHASIA, Vatsal et al.** Parametric Study on Investigations of GMAW-Based WAAM Process Parameters and Effect on Microstructure and Mechanical Properties of NiTi SMA. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, v. 9, n. 2, p. 58, 2025.
- [22] **WU, Bintao et al.** A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement. *Journal of manufacturing processes*, v. 35, p. 127-139, 2018.
- [23] **XIA, Chunyang et al.** A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system. *Journal of manufacturing systems*, v. 57, p. 31-45, 2020.

[25] **ZAHID, Moosa** *et al.* Wire arc additive manufacturing (waam): reviewing technology, mechanical properties, applications and challenges. In: ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition. American Society of Mechanical Engineers, 2020. p. V02AT02A042.