

Universidade do Estado do Amazonas – UEA
Escola Superior de Tecnologia – EST
Engenharia de Controle e Automação

VICTOR ALVES FIGUEIRA

DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE CÉLULA ROBÓTICA
INDUSTRIAL PARA PROCESSO DE APLICAÇÃO DE COLA

MANAUS - AM
2024

VICTOR ALVES FIGUEIRA

**DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE CÉLULA ROBÓTICA
INDUSTRIAL PARA PROCESSO DE APLICAÇÃO DE COLA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Dr. Almir Kimura Jr.

**MANAUS - AM
2024**

Ficha Catalográfica

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Sistema Integrado de Bibliotecas da Universidade do Estado do Amazonas.

F475d

Figueira, Victor Alves

Desenvolvimento e otimização de célula robótica industrial para processo de aplicação de cola / Victor Alves Figueira . Manaus : [s.n], 2024.

100 f.: color.; 21,0 cm.

TCC - Graduação em Engenharia de Controle e Automação-
Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2024.

Inclui Apêndice.

Orientador: Almir Kimura Júnior .

1. Automação industrial . 2. Robôs industriais . 3. Aplicados de cola. 4. Indústria 4.0. 5. Otimização de processos. I. Almir Kimura Júnior (Orient.) II. Universidade do Estado do Amazonas. III. Título

CDU(1997)681.5

VICTOR ALVES FIGUEIRA

DESENVOLVIMENTO E OTIMIZAÇÃO DE CÉLULA ROBÓTICA INDUSTRIAL
PARA PROCESSO DE APLICAÇÃO DE COLA

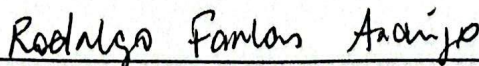
Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca avaliadora do curso de Engenharia de Controle e Automação da Escola Superior de Tecnologia da Universidade do Estado do Amazonas como pré-requisito para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação.

Aprovada em: 18/12/2024.

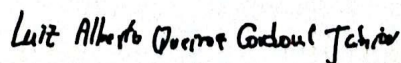
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Israel Mazaira Morales
Examinador interno (UEA/EST)



Prof. Dr. Rodrigo Farias Araújo
Examinador interno (UEA/EST)



Prof. Dr. Luiz Alberto Queiroz Cordovil Júnior
Examinador externo(UEA/EST)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, pela dádiva da vida, pela força e sabedoria concedidas em cada momento, e por ser minha guia e refúgio durante toda essa jornada.

À minha família, com destaque especial aos meus pais, Wilma e Amaury, minha eterna gratidão por serem meu alicerce. Obrigado pelo amor incondicional, pelo apoio constante e pelos ensinamentos que carregarei por toda a vida. Vocês sempre foram minha maior inspiração e força motriz em cada conquista.

À minha namorada, Victoria, que esteve ao meu lado em cada etapa dessa trajetória, oferecendo suporte, compreensão e encorajamento inabaláveis. Sua presença foi essencial para que eu pudesse enfrentar os desafios e celebrar as vitórias.

Aos amigos, tanto os que encontrei ao longo da graduação quanto os que já faziam parte da minha vida, sou profundamente grato. Vocês tornaram essa caminhada mais leve e memorável, repleta de aprendizado, risos e momentos inesquecíveis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Almir Kimura Jr., registro minha gratidão por todo o conhecimento compartilhado, pela paciência e pelo apoio ao longo desta jornada acadêmica. Sua orientação foi fundamental para a realização deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia de Controle e Automação, que com dedicação e excelência contribuíram para minha formação técnica e pessoal. Cada ensinamento, seja em sala de aula ou fora dela, foi indispensável para moldar minha trajetória.

Aos laboratórios e projetos que marcaram minha formação, como o LAICP, onde o Prof. Dr. Rubens Sicchar abriu as portas para os projetos acadêmicos; o OCEAN, sob a orientação do Prof. Dr. Almir Kimura Jr., que me guiou nos passos seguintes, contribuindo significativamente para minha evolução; e a Academia STEM, com os professores Dr. Adan Medeiros, Dr. Rodrigo Araújo, Dr. Whasgthon Almeida e Dra. Josefina Barreto, que me ajudaram a aprimorar minhas habilidades técnicas e pessoais.

À Angstrom, pela oportunidade de aprendizado e crescimento profissional. Um agradecimento especial ao Ricardo Tony, Gerente Industrial, e ao Sr. Edimilson Souza, cuja orientação e suporte durante o período de mudanças na célula foram fundamentais para o sucesso do projeto.

Por fim, à Universidade do Estado do Amazonas (UEA), que se tornou minha segunda casa durante esses anos. Sou grato pela oportunidade de realizar esse curso e por todas as vivências que levarei para sempre comigo.

A todos que, direta ou indiretamente, fizeram parte dessa caminhada, o meu mais sincero obrigado.

RESUMO

A automação industrial tem se consolidado como uma ferramenta estratégica para otimizar processos produtivos, especialmente em setores como o automobilístico, onde a precisão e a eficiência são cruciais. Este trabalho aborda a otimização de uma célula robótica de aplicação de cola, com o objetivo de reduzir a ociosidade do robô e aumentar a produtividade. A célula inicial consistia na aplicação de cola em uma única peça por vez, o que gerava períodos de inatividade durante a troca de peças. A solução implementada envolveu a reestruturação da célula para permitir que o robô aplicasse cola alternadamente em duas peças, reduzindo assim significativamente o tempo de ociosidade e aumentando a eficiência do processo. A metodologia adotada foi composta por etapas de modelagem 3D utilizando o *software Autodesk Inventor*, que possibilitou uma visualização detalhada das modificações estruturais. Implementação da nova estrutura, assim como a movimentação do robô. A programação da célula foi revisada, ajustando-se para sincronizar a operação dos dois berços e maximizar a produtividade. O método Taguchi foi empregado para otimizar os parâmetros críticos do processo, como a temperatura do adesivo, a velocidade do robô e a uniformidade da aplicação de cola. Os resultados estatísticos indicaram uma redução significativa no tempo de ciclo, de 27,5 segundos para 25 segundos, com uma diminuição da ociosidade do robô de 17,5 segundos para apenas 5 segundos. A produção também aumentou de 130 para 240 peças por hora, representando um crescimento de 84,6% na capacidade produtiva. A solução foi validada em um ambiente controlado, onde se observou uma melhora substancial na qualidade, com uma taxa de rejeição de apenas 1%, e uma precisão de 95% na aplicação. Esses resultados demonstram a eficácia da melhoria proposta, que não só otimizou o processo produtivo, mas também comprovou a viabilidade técnica e econômica da célula.

Palavras-chave: Automação industrial, Robôs industriais, Aplicador de cola, Indústria 4.0, Otimização de processos

ABSTRACT

Industrial automation has become a strategic tool for optimizing production processes, especially in sectors like the automotive industry, where precision and efficiency are crucial. This work focuses on the optimization of a robotic cell for adhesive application, aiming to reduce robot idle time and increase productivity. The initial cell involved applying adhesive to a single part at a time, which caused periods of inactivity during part changeovers. The implemented solution involved restructuring the cell to allow the robot to apply adhesive alternately to two parts, thereby significantly reducing idle time and increasing process efficiency. The methodology adopted included 3D modeling using Autodesk Inventor, which enabled a detailed visualization of the structural modifications. The new structure was implemented, along with adjustments to the robot's movement. The cell's programming was revised to synchronize the operation of both workstations and maximize productivity. The Taguchi method was used to optimize critical process parameters, such as adhesive temperature, robot speed, and adhesive application uniformity. Statistical results showed a significant reduction in cycle time, from 27.5 seconds to 25 seconds, with robot idle time decreasing from 17.5 seconds to just 5 seconds. Production also increased from 130 to 240 parts per hour, representing an 84.6% increase in production capacity. The solution was validated in a controlled environment, where substantial improvements in quality were observed, with a rejection rate of only 1% and 95% application accuracy. These results demonstrate the effectiveness of the proposed improvement, which not only optimized the production process but also proved the technical and economic feasibility of the cell.

Key-words: Industrial automation, Industrial robots, Glue applicator, Industry 4.0, Process optimization

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Elos e juntas do Robô.	21
Figura 2 – Diagrama de blocos do controle de malha fechada de um manipulador robótico.	24
Figura 3 – Estabilidade.	25
Figura 4 – Repetibilidade.	26
Figura 5 – Interligação entre componentes de uma célula.	28
Figura 6 – Procedimentos de impressão 3D.	43
Figura 7 – Fluxograma.	49
Figura 8 – Estrutura da célula antes da modificação.	50
Figura 9 – Espaço de trabalho.	51
Figura 10 – Estrutura da grade inicial.	53
Figura 11 – Área ocupada pela célula.	56
Figura 12 – Célula inicial.	57
Figura 13 – Célula Modificada.	58
Figura 14 – Desmontagem da estrutura.	59
Figura 15 – Desmontagem da fixação do robô.	59
Figura 16 – corte da estrutura e movimentação do robô.	60
Figura 17 – Testes do quadro de comandos.	60
Figura 18 – Montagem da estrutura.	61
Figura 19 – Montagem dos componentes.	61
Figura 20 – Nova célula.	62
Figura 21 – Programação da trajetória.	63
Figura 22 – Impressão 3D do berço.	65
Figura 23 – Robô ABB IRB 2400.	68
Figura 24 – Controlador IRC5.	68
Figura 25 – Teach Pendant.	69
Figura 26 – Relés.	69
Figura 27 – Disjuntor.	70
Figura 28 – Fonte de alimentação 24v.	70
Figura 29 – Botão cogumelo.	71
Figura 30 – Chave seletora.	71
Figura 31 – Botão pulso.	71
Figura 32 – Botões bimanuais.	72
Figura 33 – Barreira de segurança.	72
Figura 34 – Gráfico das amostras da melhor combinação das variáveis.	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Arranjos Ortogonais do Método Taguchi	48
Tabela 2 – Ciclo Operacional da Célula Inicial	66
Tabela 3 – Ciclo Operacional da Célula Modificada	66
Tabela 4 – Configuração do Experimento usando o Método Taguchi	67
Tabela 5 – Comparativo de indicadores de produtividade entre a célula inicial e a célula modificada	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	<i>Asea Brown Boveri</i>
ABS	<i>Acrylonitrile Butadiene Styrene</i>
AM	<i>Additive Manufacturing</i>
AMF	<i>Additive Manufacturing File Format</i>
CA	Corrente Alternada
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CC	Corrente Contínua
CLP	Controlador Lógico Programável
CNC	Comando Numérico Computadorizado
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
KUKA	<i>Keller und Knappich Augsburg</i>
KPI	<i>Key Performance Indicators</i>
MOD	Mão de Obra Direta
NR	Norma Regulamentadora
OEE	<i>Overall Equipment Effectiveness</i>
PCB	<i>Printed Circuit Board</i>
PETG	<i>PolyEthylene Terephthalate Glycol</i>
PLA	<i>PolyLactic Acid</i>
ROI	<i>Return on Investment</i>
RPM	Rotação por minuto
SLA	<i>StereoLithography Apparatus</i>

SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>STereoLithography</i>
STP	Sistema Toyota de Produção
TCP	<i>Tool Center Point</i>
TP	<i>Teach Pendant</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	<i>Objetivo geral</i>	15
1.1.2	<i>Objetivos específicos</i>	15
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	17
2.1	Automação Industrial	17
2.1.1	<i>Evolução histórica da automação</i>	17
2.1.2	<i>Conceitos Fundamentais de Automação</i>	18
2.1.3	<i>Indústria 4.0</i>	19
2.2	Robótica industrial	19
2.2.1	<i>Evolução da Robótica Industrial</i>	20
2.2.2	<i>Robôs Articulados</i>	20
2.2.2.1	<i>KUKA</i>	22
2.2.2.2	<i>ABB Robotics</i>	22
2.2.2.3	<i>Yaskawa</i>	23
2.2.3	<i>Sistemas de controle</i>	23
2.2.4	<i>Dinâmica do braço robótico</i>	23
2.2.4.1	<i>Precisão dos movimentos</i>	24
2.2.4.2	<i>Estabilidade</i>	25
2.2.4.3	<i>Repetibilidade</i>	26
2.2.5	<i>Aplicações em Células de Produção Automatizadas</i>	27
2.2.6	<i>Integração de Sensores e Atuadores</i>	29
2.2.7	<i>Programação de Robôs Industriais</i>	29
2.2.7.1	<i>Tipos de programação</i>	30
2.2.7.2	<i>Programação Robô ABB</i>	31
2.2.7.3	<i>Características da Linguagem RAPID</i>	31
2.3	Adesivo industrial	32
2.3.1	<i>Composição e Características da Cola Hotmelt</i>	32
2.3.2	<i>Aplicação em Processos Industriais</i>	33
2.4	Integração de sistemas	33
2.4.1	<i>Robôs Industriais e Automação no Processo de Aplicação de Cola Hotmelt</i>	34
2.4.2	<i>Vantagens da Integração Robótica com Hotmelt</i>	34
2.5	Comandos elétricos	35
2.5.1	<i>Quadro Elétrico</i>	37
2.5.2	<i>Relação com a Mudança na Célula Robótica</i>	38

2.6	Segurança em Células Robóticas: Normas e Dispositivos de Proteção	38
2.6.1	<i>Normas Regulamentadoras (NRs)</i>	38
2.6.2	<i>Considerações sobre Manutenção e Treinamento</i>	39
2.7	Fabricação Digital	39
2.7.1	<i>Modelagem 3D</i>	40
2.8	Manufatura Aditiva	40
2.8.1	<i>Impressão 3D</i>	42
2.8.2	<i>Tipos de filamentos</i>	42
2.8.2.1	<i>PLA</i>	42
2.8.2.2	<i>ABS</i>	43
2.8.2.3	<i>PETG</i>	43
2.8.3	<i>Indicadores de Desempenho (KPIs)</i>	44
2.8.3.1	<i>KPIs Aplicados à Célula Robótica</i>	46
2.8.4	<i>Uso de KPIs no Monitoramento e Melhoria</i>	47
2.8.5	<i>Método Taguchi</i>	47
3	METODOLOGIA	49
3.1	Tipo de Pesquisa	49
3.2	Etapas do Trabalho	49
3.2.1	<i>Análise Inicial da Célula Robótica</i>	50
3.2.1.1	<i>Estrutura e Configuração da Célula</i>	50
3.2.1.2	<i>Espaço de Trabalho</i>	51
3.2.1.3	<i>Ciclo Operacional</i>	53
3.2.1.4	<i>Controle e Integração do Sistema</i>	54
3.2.1.5	<i>Gargalos e Manutenções</i>	54
3.2.2	<i>Proposta de Melhoria</i>	55
3.2.2.1	<i>Solução Proposta: Duplicação de MOD</i>	55
3.2.2.2	<i>Alternativas Consideradas</i>	55
3.2.2.3	<i>Restrições e Impactos</i>	55
3.2.3	<i>Simulação e Modelagem</i>	56
3.2.4	<i>Construção e Implementação</i>	58
3.2.4.1	<i>Desmontagem da estrutura</i>	58
3.2.4.2	<i>Desfixação do Robô para Movimentação</i>	58
3.2.4.3	<i>Corte da grade</i>	59
3.2.4.4	<i>Montagem do quadro elétrico</i>	60
3.2.4.5	<i>Solda da grade</i>	60
3.2.4.6	<i>Montagem dos comandos</i>	61
3.2.4.7	<i>Célula nova</i>	62
3.2.4.8	<i>Programação</i>	62

3.2.4.9	<i>Impressão 3D dos berços</i>	64
3.2.5	<i>Validação e Testes</i>	65
3.2.5.1	<i>Análise do ciclo</i>	65
3.2.5.2	<i>Ciclo Operacional da Célula Inicial</i>	65
3.2.5.3	<i>Ciclo Operacional da Célula Modificada</i>	66
3.2.5.4	<i>Método Taguchi</i>	66
3.3	Materiais Utilizados	67
3.3.1	<i>Robô ABB IRB 2400</i>	68
3.3.2	<i>Controlador IRC5</i>	68
3.3.3	<i>Teach Pendant</i>	69
3.3.4	<i>Relés</i>	69
3.3.5	<i>Disjuntor Monofásico</i>	70
3.3.6	<i>Fonte</i>	70
3.3.7	<i>Botão Cogumelo</i>	70
3.3.8	<i>Botão Chave</i>	71
3.3.9	<i>Botão Pulso</i>	71
3.3.10	<i>Botões bimanuais</i>	72
3.3.11	<i>Barreira de Segurança</i>	72
4	RESULTADOS	73
4.1	Análise de Produtividade e Impacto das Modificações na Célula de Produção	73
4.1.1	<i>Situação Inicial da Célula de Produção</i>	73
4.1.2	<i>Modificações Realizadas</i>	73
4.1.3	<i>Produtividade Após a Modificação</i>	74
4.1.4	<i>Impacto dos Defeitos na Produção</i>	74
4.1.5	<i>Análise dos Indicadores de Desempenho (KPIs)</i>	75
4.1.5.1	<i>Ciclo Médio</i>	75
4.1.5.2	<i>Tempo de Operação do Robô</i>	75
4.1.5.3	<i>Tempo de Ociosidade</i>	75
4.1.5.4	<i>Produção por Hora</i>	76
4.2	Avaliação da Qualidade da Aplicação de Cola	76
4.3	Impacto no Layout e na Estrutura da Célula	77
4.3.0.1	<i>Ajustes no Percurso dos Berços</i>	78
4.3.0.2	<i>Troca do Tambor de Cola</i>	78
5	CONCLUSÃO	79
	REFERÊNCIAS	81
	APÊNDICE A – PROGRAMAS	86
	APÊNDICE B – MODELAGEM	98

1 INTRODUÇÃO

A automação industrial tem se tornado uma peça central no avanço da produtividade e eficiência das indústrias modernas, promovendo a integração de tecnologias que otimizam processos produtivos. Segundo Alves (2005), a automação industrial visa substituir tarefas repetitivas e propensas a erros por sistemas controlados automaticamente, resultando em maior eficiência e segurança nas linhas de produção. Essa premissa tem sido amplamente validada ao longo dos anos, especialmente em setores como a indústria automobilística, onde a precisão e a repetibilidade são fundamentais.

O uso de robôs industriais com aplicadores de cola é um exemplo claro da importância dessa tecnologia. De acordo com Groover (2011), os robôs industriais desempenham papéis essenciais na automação de sistemas de manufatura, permitindo não só a redução de custos, mas também o aumento da flexibilidade e da precisão em operações como montagem e colagem. Entretanto, mesmo com os avanços tecnológicos, ainda há espaço para melhorias, principalmente no que se refere ao tempo de ociosidade de robôs durante os ciclos de operação.

A célula robótica em análise, que realiza a aplicação de cola em uma única peça por vez, apresenta uma limitação significativa. O robô fica ocioso enquanto aguarda a substituição da peça processada, o que resulta em uma perda de produtividade. Um dos grandes desafios da automação industrial é otimizar os tempos de ciclo e reduzir a ociosidade dos equipamentos, garantindo uma operação contínua e eficiente (Martins, 2012). A proposta deste trabalho é justamente abordar essa limitação ao modificar a célula robótica para que ela possa alternar entre duas peças durante o ciclo de aplicação de cola.

A implementação dessa melhoria não só aumentará a produtividade, mas também reduzirá os custos operacionais da célula. Moraes e castrucci (2007) apontam que a integração eficiente de sistemas automáticos, além de garantir maior qualidade, resulta em uma redução considerável de custos em termos de mão de obra e tempo de produção. Isso demonstra a relevância econômica da proposta, uma vez que a automação otimizada tem impactos diretos no custo-benefício dos processos industriais.

Além disso, no contexto mais amplo da automação e suas inovações, Rippey (2004) discute a importância da integração de sistemas de comunicação em células de soldagem, um conceito que pode ser aplicado à integração de sistemas de controle em células de colagem. A eficiência de uma célula robótica depende não apenas da mecânica do sistema, mas também da forma como os componentes e as operações são integrados e controlados (Sterneson, 2003).

Essa visão se alinha com os conceitos discutidos na Indústria 4.0, conforme Vieira *et*

al. (2019) explora ao mencionar que a quarta revolução industrial visa integrar tecnologias emergentes para promover maior conectividade e automação dentro do ambiente produtivo. "Portanto, a melhoria proposta para a célula de aplicação de cola vai ao encontro dessa tendência, utilizando estratégias de otimização para maximizar a eficiência operacional e minimizar o tempo de ociosidade do robô.

A proposta deste trabalho é, portanto, relevante tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Como Vasconcellos e Garcia (1998) afirmam, a eficiência produtiva é um dos pilares da competitividade em mercados industriais modernos, e as empresas que investem em automação e otimização dos processos tendem a se destacar no cenário global. Assim, a modificação proposta permitirá que a empresa não apenas aumente sua eficiência produtiva, mas também se alinhe com as melhores práticas de automação industrial.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma, iniciando com uma revisão da literatura sobre o uso de robôs em processos de colagem. Posteriormente, será detalhada a metodologia de modificação da célula, incluindo os testes de validação e uma análise dos ganhos de produtividade resultantes da implementação da nova estrutura.

1.1 Objetivos

1.1.1 *Objetivo geral*

Automatizar o processo em uma célula robótica de aplicação de cola, modificando sua estrutura para que o robô possa operar em duas peças alternadamente, eliminando o tempo de inatividade e aumentando a eficiência e a produtividade do processo.

1.1.2 *Objetivos específicos*

Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Estudo bibliográfico;
2. Analisar a configuração atual da célula robótica que aplica cola em uma única peça, identificando pontos de ineficiência e inatividade.
3. Desenvolver um projeto de modificação estrutural para a célula robótica, que permita a aplicação de cola em duas peças de forma alternada.
4. Implementar a solução proposta em um ambiente controlado, garantindo que a alteração estrutural seja funcional e segura.
5. Realizar a impressão 3D do dispositivo de apoio do produto.

6. Testar e validar a nova configuração da célula robótica, mensurando a redução do tempo de ciclo e o aumento da produtividade.
7. Avaliar os impactos da modificação na eficiência operacional da linha de produção, identificando reduções nos custos operacionais e aumento da competitividade.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

Este capítulo tem como objetivo explorar os principais fundamentos teóricos que serviram de alicerce para o desenvolvimento deste estudo. Serão abordados diversos tópicos, começando pela automação industrial, que contextualiza a importância da integração de tecnologias para aumentar a eficiência produtiva, seguida de uma análise sobre a robótica e o controle no ambiente industrial. Também serão discutidas as células de robôs e suas características estruturais, a programação de robôs para otimização de tarefas repetitivas, e a integração de sistemas que permite a comunicação entre diferentes equipamentos. Além disso, serão explorados temas como quadro elétrico, tecnologia de colagem (*Hotmelt*), aspectos de segurança relacionados à Norma Regulamentadora, a manufatura aditiva utilizada na produção dos berços do produto e, por fim, os indicadores de desempenho.

2.1 Automação Industrial

A automação industrial revolucionou a produção ao longo do século XX, proporcionando eficiência, precisão e segurança. Esta seção explora o histórico e os principais conceitos da automação, com foco em como essas tecnologias transformaram as indústrias e continuam a evoluir no contexto da Indústria 4.0. A célula robótica de aplicação de cola, tema deste estudo, é um exemplo prático da implementação desses conceitos.

2.1.1 *Evolução histórica da automação*

A automação industrial, embora tenha ganhado força durante o século XX, tem suas origens no século XVIII, com a primeira Revolução Industrial. Nesse período, as máquinas a vapor substituíram o trabalho manual em diversas tarefas, iniciando um movimento de mecanização que mudou a forma como produtos eram fabricados. No entanto, a automação, no sentido moderno, começou a se desenvolver com o advento de tecnologias como a eletricidade e os motores elétricos, no final do século XIX e início do século XX (Groover, 2011).

O grande salto veio com o surgimento de controladores lógicos programáveis (CLPs) na década de 1960. Introduzido pela General Motors, o CLP trouxe flexibilidade para as indústrias, permitindo que processos fossem controlados por meio de lógica programada, substituindo painéis de relés. Esse avanço tornou possível a automação de processos complexos, integrando sensores e atuadores que monitoram e controlam diversas variáveis de produção (Sterneson, 2003).

No final do século XX, o foco passou a ser a integração entre os sistemas de produção e o uso de computadores para o controle avançado de processos, abrindo caminho

para a Indústria 3.0, marcada pela automatização computacional e robótica. As fábricas automatizadas começaram a operar com o mínimo de intervenção humana, utilizando sistemas como o controle numérico computacional (CNC) e CLPs, ambos amplamente utilizados nas indústrias automotivas, de eletrônicos e de bens de consumo (Alves, 2005).

A introdução do Sistema Toyota de Produção (STP), desenvolvido por Taiichi Ohno, revolucionou a forma como a automação foi vista e implementada. Ohno (1997) descreve que, além de buscar a eficiência através da eliminação de desperdícios (muda), o STP empregava máquinas que paravam automaticamente quando detectavam problemas, utilizando o conceito de Jidoka. A produção passou a ser mais flexível, com maior controle da qualidade e da eficiência.

Esse conceito se alinha diretamente ao desenvolvimento de células robóticas como as que estão sendo propostas neste estudo. A busca por flexibilidade, menor tempo de ociosidade e a capacidade de operar com alta precisão são parte dos princípios centrais do STP e continuam a ser aplicados no contexto da automação atual.

2.1.2 Conceitos Fundamentais de Automação

Automação industrial é, de forma geral, a substituição do trabalho manual por sistemas mecânicos e eletrônicos que realizam operações repetitivas e complexas com maior eficiência e precisão. (Groover, 2011) define a automação como o uso de sistemas tecnológicos para operar equipamentos e processos de manufatura sem necessidade de intervenção humana direta. Esse conceito envolve uma série de elementos, como sensores, atuadores, CLPs e sistemas de supervisão, que trabalham em conjunto para controlar as variáveis de um processo produtivo.

No contexto da célula robótica, a automação industrial está intimamente ligada à robótica, que utiliza controladores avançados para manipular peças de forma precisa e eficiente. A principal vantagem dessa abordagem é a capacidade de operar 24 horas por dia, 7 dias por semana, sem interrupções, aumentando significativamente a produtividade. Além disso, os robôs são programados para seguir trajetórias complexas e podem ser facilmente reprogramados para mudar de tarefa, garantindo flexibilidade no processo de manufatura (Sterneson, 2003).

Outro conceito central na automação é o controle em malha fechada, onde sensores monitoram constantemente o processo, fornecendo feedback ao sistema de controle para que ele possa ajustar automaticamente as variáveis e manter a operação dentro dos parâmetros desejados. Esse tipo de controle é essencial em processos de aplicação de cola, onde a precisão da dosagem e da posição são cruciais para garantir a qualidade do produto final (Martins, 2012).

A automação também visa reduzir a variabilidade nos processos produtivos, eli-

minando a imprevisibilidade do fator humano. Ao automatizar tarefas repetitivas, as indústrias garantem maior padronização dos produtos e uma maior consistência na produção (Scopel, 1995). Isso é particularmente importante em setores como o automotivo, onde a precisão e a repetibilidade são essenciais para atender aos rigorosos padrões de qualidade.

2.1.3 Indústria 4.0

Indústria 4.0 representa a mais recente evolução da automação industrial, caracterizada pela interconectividade de sistemas e pela capacidade de processamento de grandes volumes de dados em tempo real. Vieira *et al.* (2019) descreve a Indústria 4.0 como a integração de tecnologias ciberfísicas, Internet das Coisas (*IoT*) e inteligência artificial para criar fábricas inteligentes e adaptativas.

A célula robótica proposta neste trabalho pode ser vista como uma aplicação direta dos princípios da Indústria 4.0. Com a integração de sensores inteligentes, é possível monitorar o processo de aplicação de cola em tempo real, tempo de ciclo e desempenho do robô. Esses dados podem ser analisados para identificar oportunidades de melhoria e para prever possíveis falhas no sistema, implementando um modelo de manutenção preditiva.

Além disso, a Indústria 4.0 permite a integração entre diferentes sistemas dentro da fábrica, como o planejamento de produção, o controle de qualidade e a logística. Dessa forma, a célula robótica não opera de forma isolada, mas faz parte de um sistema de manufatura totalmente integrado e otimizado (Groover, 2011). A capacidade de adaptação em tempo real é outra característica marcante, possibilitando que o sistema ajuste automaticamente a produção conforme a demanda e as condições operacionais.

2.2 Robótica industrial

A robótica industrial é um dos principais pilares da automação moderna, contribuindo significativamente para a transformação dos processos produtivos em diversas indústrias. Desde a sua introdução, robôs industriais têm proporcionado melhorias em termos de produtividade, precisão e segurança, sendo amplamente utilizados em setores como o automotivo, eletrônico e de manufatura de bens de consumo. Este tópico explora a evolução, os principais conceitos e as aplicações da robótica no contexto industrial, com ênfase nos manipuladores robóticos e sua relevância para a célula robótica de aplicação de cola proposta neste trabalho.

De acordo com Carrara (2010), as máquinas robóticas podem ser classificadas com base em diferentes critérios, como aplicação, cadeia cinemática, tipo de atuadores ou anatomia. O termo "robô" não possui um significado único e pode englobar desde veículos autônomos e humanoides até simples braços mecânicos com movimentos específicos.

A interatividade dos robôs com agentes externos permite classificá-los como totalmente autônomos, programáveis, sequenciais ou inteligentes. No entanto, dada a variedade crescente de aplicações, estabelecer uma única forma de classificação para robôs é praticamente inviável.

Carrara (2010) restringe o foco de sua abordagem aos robôs industriais, projetados principalmente para substituir o trabalho humano em atividades repetitivas, perigosas ou que demandam alto desgaste físico ou mental no ambiente produtivo. Assim, robôs com forma humanoide, veículos autônomos e outras configurações fora do contexto industrial não são considerados.

Na terminologia apresentada, um robô industrial é composto por um circuito eletrônico computadorizado de controle e um mecanismo articulado, chamado de manipulador. Termos como "robô" e "manipulador" são usados de forma intercambiável para descrever esses sistemas no âmbito industrial.

2.2.1 Evolução da Robótica Industrial

A robótica industrial teve início com o desenvolvimento do robô *Unimate*, em 1961, pela General Motors. Este foi o primeiro robô industrial a ser implementado em uma linha de montagem, sendo utilizado para tarefas de soldagem de peças metálicas. Desde então, o campo evoluiu rapidamente, com a inclusão de sistemas de controle e sensoriamento, aumentando a precisão e a eficiência dos robôs (Craig, 1986).

Na década de 1980, a robótica industrial foi impulsionada pela integração de tecnologias de visão computacional e inteligência artificial. Robôs tornaram-se capazes de realizar tarefas mais complexas, como montagem e inspeção, e começaram a ser amplamente utilizados em setores além do automotivo, como o eletroeletrônico e o farmacêutico (Fu; Gonzales; Lee, 1987).

Nos anos 2000, a Indústria 4.0 trouxe a robótica para um novo patamar, com a introdução de robôs colaborativos (*Cobots*) e a integração de sensores inteligentes, permitindo que os robôs trabalhassem lado a lado com os humanos de maneira segura e eficiente (Vieira *et al.*, 2019). Esses avanços também permitiram a criação de sistemas de robótica autônoma e a interconectividade de robôs com outros sistemas industriais através da Internet das Coisas (*IoT*).

2.2.2 Robôs Articulados

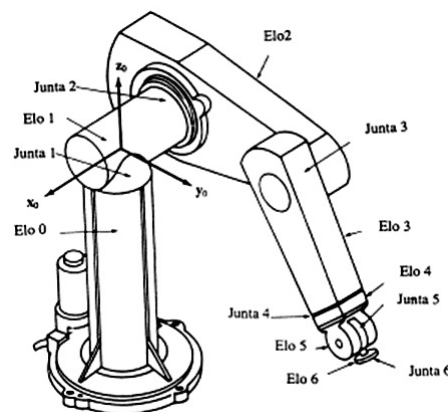
O Robô articulado é um dos componentes centrais de qualquer sistema robótico industrial. Ele consiste em uma série de juntas e elos que proporcionam movimentos em múltiplos eixos, imitando o comportamento de um braço humano, permitindo ao robô realizar tarefas complexas com precisão. Cada elo do manipulador é controlado por motores

e atuadores que executam comandos gerados pelo sistema de controle do robô. Craig (1986) descreve o manipulador robótico como um dispositivo mecânico com capacidade de realizar movimentos articulados precisos em várias direções, sendo controlado por um computador ou sistema de controle automatizado.

Esses manipuladores são programados para seguir trajetórias específicas, que podem ser definidas por coordenadas espaciais ou por aprendizado, onde o robô "memoriza" movimentos executados manualmente por um operador e os reproduz automaticamente. Em células robóticas de aplicação de cola, como a discutida neste trabalho, o manipulador desempenha o papel de realizar o movimento de aplicação de forma precisa, garantindo que a cola seja distribuída corretamente sobre as superfícies das peças. Além disso, o manipulador pode ser equipado com diferentes ferramentas de fim de braço (*end-effectors*), adaptando-se à aplicação desejada, seja uma pinça, uma pistola de soldagem ou, como neste caso, um aplicador de cola (Cutkosky, 1989).

O robô articulado é formado pela integração dos seguintes componentes:

Figura 1 – Elos e juntas do Robô.



Fonte: (Lopes, 2002)

Manipulador mecânico: refere-se à parte estrutural e mecânica de um robô, composta por uma sequência de corpos rígidos chamados elos, interligados por articulações, conhecidas como juntas. O elo inicial é denominado base, enquanto o último é chamado de terminal, onde é instalado o componente efetuator. As juntas conectam os elos e permitem movimentos relativos entre eles, conferindo mobilidade ao manipulador.

Sensores: são dispositivos essenciais para o monitoramento do manipulador, medindo parâmetros como posição e velocidade dos elos ao longo do tempo, além de registrar a interação do robô com o ambiente. Sensores são geralmente integrados às juntas, permitindo o controle preciso das posições e dos movimentos. Essas informações são enviadas para a unidade de controle, que as utiliza para ajustar as operações do robô.

Unidade de controle: responsável por supervisionar e gerenciar os parâmetros operacionais do robô, garantindo a execução das tarefas programadas. Ela processa os sinais provenientes dos sensores e, a partir disso, envia comandos para os atuadores. Esse ciclo de monitoramento e controle é fundamental para o funcionamento eficiente do sistema robótico.

Efetuator: é o dispositivo fixado ao terminal do robô, projetado para realizar tarefas específicas. Pode ser uma ferramenta, que executa operações diretamente sobre o objeto, ou uma garra, utilizada para manipular e transportar objetos entre posições predefinidas. O efetuator determina a funcionalidade final do robô, adaptando-se às necessidades de sua aplicação.

Atuadores: convertem energia elétrica, pneumática ou hidráulica em movimento mecânico. Por meio de sistemas de transmissão, essa potência é transferida para os elos, permitindo sua movimentação. Atuadores são elementos fundamentais para transformar comandos do controlador em ações físicas do robô.

Unidade de potência: fornece a energia necessária para operar os atuadores. Essa unidade é dimensionada para atender às demandas energéticas de todos os componentes do robô, garantindo seu pleno funcionamento e desempenho eficiente.

Alguns dos principais fabricantes de robôs industriais incluem:

2.2.2.1 KUKA

A *KUKA*, uma das principais fabricantes de robôs industriais, é conhecida por suas soluções robustas e inovadoras, tanto para automação pesada quanto para aplicações colaborativas. Os robôs da *KUKA* se destacam pela flexibilidade e pela capacidade de serem facilmente programados para diferentes aplicações, como soldagem, manipulação de materiais e montagem (Cutkosky, 1989). Um dos principais modelos é o *LBR iiwa*, um cobot que tem sensores de torque integrados e pode realizar tarefas complexas com alta precisão. A *KUKA* também tem investido em soluções de digitalização, oferecendo softwares como o *KUKA Connect*, que permite o monitoramento em tempo real dos robôs e sua integração com sistemas de *IoT* industriais.

2.2.2.2 ABB Robotics

A *ABB* é outra grande referência no mercado de robótica industrial. A empresa tem uma ampla linha de robôs de seis eixos, com destaque para o robô colaborativo *YuMi*, que é capaz de operar em conjunto com trabalhadores humanos em ambientes de montagem e eletrônica (Craig, 1986). A *ABB* tem investido fortemente em automação colaborativa e integração de sistemas, sendo uma das pioneiras na aplicação de robôs em indústrias farmacêuticas, de eletrônicos e automotivas. A *ABB* oferece ainda uma plataforma de

software integrada para programação de robôs, conhecida como *RobotStudio*, que permite a simulação e otimização de processos antes de sua implementação real.

2.2.2.3 *Yaskawa*

A *Yaskawa*, fabricante dos robôs Motoman, é reconhecida pela inovação em robôs de múltiplos braços, como o *Dual Arm SDA*, que permite maior flexibilidade e capacidade de manipulação em tarefas complexas, como montagem de componentes pequenos ou operações de soldagem. Além disso, os robôs *Motoman* são amplamente utilizados em manufatura aditiva, onde podem realizar tarefas como aplicação de cola ou movimentação de peças para impressão 3D, devido à sua precisão e repetibilidade (Fu; Gonzales; Lee, 1987).

2.2.3 *Sistemas de controle*

Carrara (2009) explica que o controle de robôs é realizado por meio de um sistema integrado de software e hardware. Esse sistema é responsável por processar os sinais de entrada e convertê-los em ações previamente programadas.

O *software* pode ser desenvolvido em um microcontrolador ou em um computador pessoal, considerando as vantagens e limitações de cada solução. Microcontroladores são mais econômicos, rápidos e dedicados exclusivamente ao controle do robô, mas possuem restrições quanto ao tamanho do programa. Já os computadores pessoais oferecem maior capacidade de processamento e espaço para armazenamento, mas podem elevar os custos do projeto. Carrara (2009) destaca ainda a possibilidade de uma abordagem híbrida, em que as tarefas mais leves são executadas no microcontrolador e as mais complexas ficam a cargo do computador.

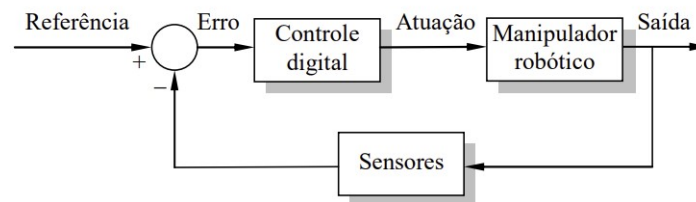
O *hardware*, por sua vez, inclui componentes como motores de passo, cabos, dispositivos de entrada, sensores e amplificadores de potência. Sensores desempenham um papel fundamental no controle em malha fechada, permitindo que o sistema monitore o estado atual do robô e o compare com valores predefinidos. Essa comparação gera um erro que é utilizado pelo sistema para ajustar os parâmetros e minimizar o desvio até que o erro seja praticamente nulo.

Carrara (2009) também ressalta a importância dos sensores, como citado por Bolton (1995), ao integrar um sistema de controle robusto e eficiente, essencial para aplicações industriais.

2.2.4 *Dinâmica do braço robótico*

O desempenho dinâmico de um braço robótico está diretamente relacionado a fatores como velocidade de resposta, estabilidade e precisão. A velocidade de resposta está

Figura 2 – Diagrama de blocos do controle de malha fechada de um manipulador robótico.



Fonte: (Carrara, 2010)

associada à habilidade do manipulador de se deslocar entre diferentes posições em um curto intervalo de tempo, sendo necessário analisar tanto o torque aplicado em cada junta quanto a aceleração dos elos durante o desenvolvimento do projeto. Por sua vez, a estabilidade é determinada pelo tempo necessário para dissipar as oscilações geradas no movimento de uma posição para outra. Em situações de baixa estabilidade, é possível implementar elementos de amortecimento no braço robótico, o que contribui para uma movimentação mais estável, embora possa impactar negativamente a velocidade de resposta (Groover, 1988).

2.2.4.1 Precisão dos movimentos

De acordo com Carrara (2010), a resolução espacial de um robô depende tanto das características do sistema de controle quanto das imprecisões mecânicas do braço robótico. O sistema de controle é responsável por gerenciar os incrementos individuais das articulações, enquanto as inexatidões estão associadas à qualidade dos componentes que formam as uniões entre as articulações, como folgas em engrenagens, tensões em polias, histereses mecânicas e magnéticas, entre outros fatores.

A precisão, por sua vez, refere-se à capacidade do robô de posicionar seu órgão terminal em um ponto específico dentro do volume de trabalho, estando diretamente ligada à resolução espacial. Isso ocorre porque a precisão é influenciada pelos incrementos que as juntas conseguem realizar para alcançar um ponto definido.

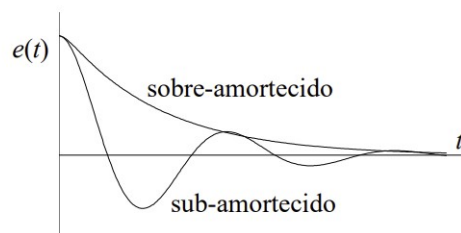
Já a repetibilidade está relacionada à habilidade do braço robótico de repetir movimentos e posicionar seu órgão terminal no mesmo ponto várias vezes, sendo afetada por fatores como folgas mecânicas, flexibilidade e limitações do sistema de controle. Em resumo, a precisão reflete o quão próximo o robô consegue chegar de um ponto marcado, enquanto a repetibilidade avalia a consistência desses movimentos.

2.2.4.2 Estabilidade

A estabilidade em sistemas robóticos está diretamente ligada à capacidade do braço manipulador de alcançar sua posição final com velocidade nula e mínima oscilação. Segundo Carrara (2020), essa estabilidade é uma medida do tempo necessário para que o órgão terminal atinja a posição desejada com um nível específico de precisão. Entretanto, alcançar um equilíbrio ideal entre estabilidade e velocidade é um desafio, pois esses dois fatores são antagônicos: enquanto um favorece um desempenho mais rápido, o outro pode comprometer esse aspecto em prol de um movimento mais controlado e sem oscilações.

Ao aplicar um torque elevado, o manipulador pode alcançar alta velocidade de aproximação, mas isso resulta em oscilações acentuadas até que o sistema de controle estabilize o movimento (caracterizando uma resposta subamortecida). Por outro lado, ao priorizar um movimento gradual e estável, elimina-se a oscilação, mas aumenta-se o tempo para atingir o posicionamento desejado (curva sobreamortecida). Esse dilema é particularmente relevante em sistemas dinâmicos de robôs industriais, onde otimizar um parâmetro frequentemente compromete o outro (Carrara, 2020).

Figura 3 – Estabilidade.



Fonte: (Carrara, 2010)

Além disso, o desempenho em termos de velocidade e estabilidade varia com a configuração do manipulador no espaço de trabalho. Carrara (2020) observa que, em braços revolutos, a velocidade tende a ser maior quando o braço está totalmente estendido, enquanto a estabilidade é reduzida. O oposto ocorre quando o braço opera próximo ao eixo da junta base, onde a estabilidade melhora, mas a velocidade diminui. Essa característica ressalta a complexidade de alcançar um ajuste ideal que seja eficaz em todas as regiões do espaço de trabalho.

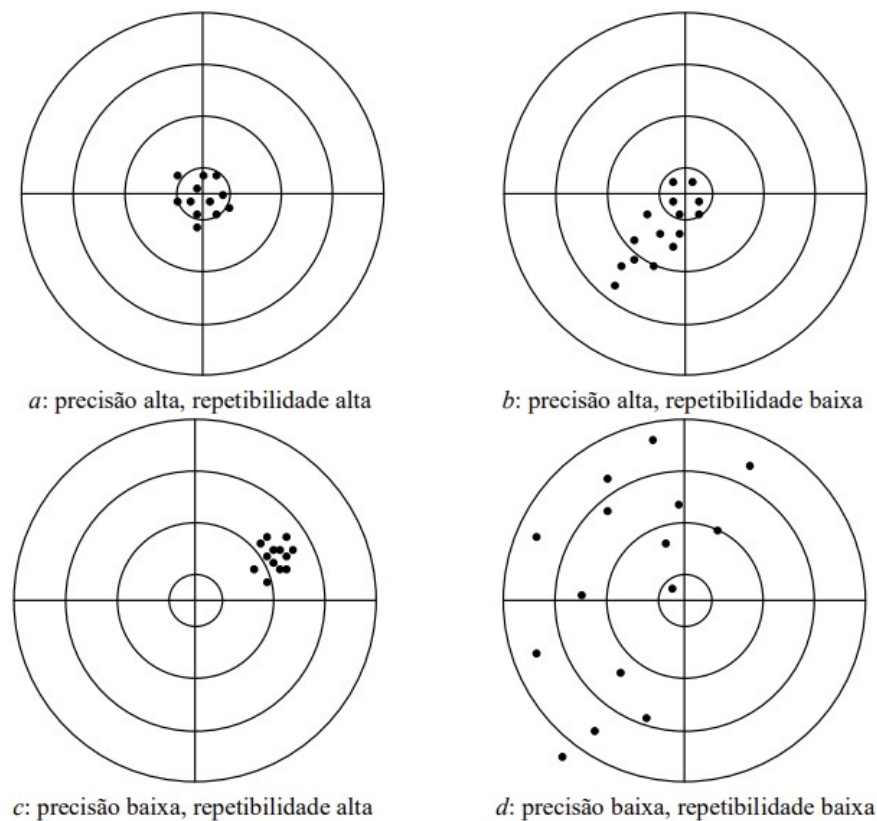
Groover (1988) complementa essa análise ao destacar que o comportamento dinâmico de manipuladores robóticos depende de fatores como torque nas juntas e aceleração dos elos, os quais influenciam diretamente na estabilidade e na velocidade de resposta. De forma semelhante, Bolton (1995) enfatiza a importância de sistemas de controle bem projetados para minimizar as oscilações e maximizar a precisão do posicionamento. A esco-

lha adequada de componentes e sensores também desempenha um papel fundamental na estabilidade, garantindo que o sistema seja responsivo e confiável em operações industriais.

2.2.4.3 Repetibilidade

A repetibilidade em sistemas robóticos está diretamente ligada à capacidade do manipulador em posicionar seu órgão terminal no ponto de destino especificado várias vezes, com um alto grau de consistência. Esse conceito é fundamental para garantir a eficiência e a precisão do robô em suas tarefas, principalmente em ambientes industriais que exigem alta performance. Quando um manipulador apresenta baixa repetibilidade, isso resulta em imprecisões no posicionamento de sua extremidade, mesmo que, em algumas tentativas, o ponto especificado seja atingido. Carrara (2017) aborda a importância da repetibilidade para garantir a precisão do sistema robótico. Ele explica que a repetibilidade está relacionada à capacidade do robô de retornar ao mesmo ponto repetidamente dentro de um intervalo de erro especificado. A falta dessa característica compromete o desempenho do manipulador, gerando inconsistências no processo de produção.

Figura 4 – Repetibilidade.



Fonte: (Carrara, 2010)

De acordo com Carrara (2017), a Figura 4 ilustra as relações entre precisão e repetibilidade. Em um cenário ideal, onde tanto a repetibilidade quanto a precisão

são elevadas, o ponto meta será atingido com alta frequência (Figura 4a). Por outro lado, quando a repetibilidade é baixa, o robô falha em atingir o ponto desejado nas tentativas subsequentes (Figura 4b). No caso de uma precisão reduzida, mas com alta repetibilidade, o manipulador pode consistentemente alcançar um ponto incorreto, mas sempre no mesmo local (Figura 4c). Finalmente, quando ambos os parâmetros são baixos, o erro de posicionamento não só aumenta como também se torna variável (Figura 4d).

Além disso, Siciliano, Kalata e Dell’Unto (2016) destacam que a repetibilidade é um dos principais fatores que determinam o desempenho dos manipuladores robóticos, especialmente em tarefas que demandam alta precisão, como a montagem de componentes eletrônicos ou a aplicação de adesivos, onde um pequeno erro pode comprometer a qualidade do produto final. Eles ressaltam que, para alcançar uma boa repetibilidade, é fundamental que o sistema de controle do robô seja calibrado corretamente, minimizando erros no movimento e garantindo que o robô retorne de forma precisa ao ponto inicial.

Estudos realizados por KUKA (2019) também reforçam que a repetibilidade, aliada à precisão, é um dos principais requisitos para sistemas robóticos eficientes. Em sua análise, a *KUKA* demonstra como manipuladores com alta repetibilidade e precisão são capazes de otimizar os ciclos de produção, reduzindo o tempo de inatividade e aumentando a produtividade das linhas de montagem. A empresa também enfatiza a importância da calibração e manutenção dos robôs para garantir que esses parâmetros permaneçam dentro dos limites aceitáveis, garantindo a alta performance do sistema.

2.2.5 Aplicações em Células de Produção Automatizadas

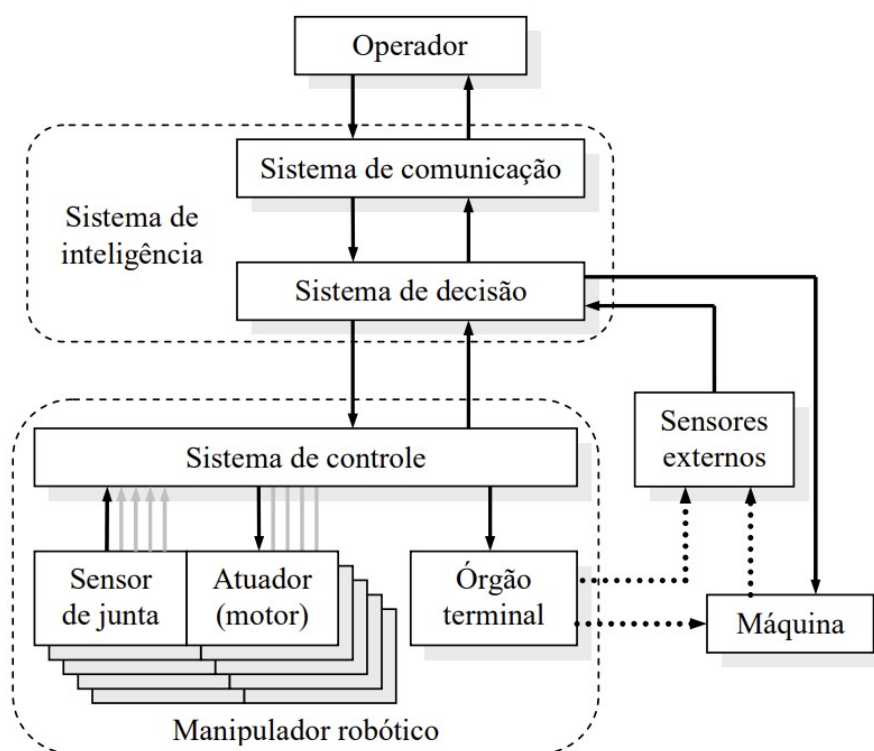
O uso de robôs em células de produção automatizadas é uma das principais aplicações da robótica industrial moderna. Essas células integram robôs, sistemas de controle e sensores para realizar tarefas de forma autônoma e com alta precisão. Na indústria de automóveis, por exemplo, as células robóticas são utilizadas para a aplicação de cola em painéis de veículos, soldagem e montagem de componentes. O uso de robôs em células de produção também permite uma maior personalização e flexibilidade, otimizando a produção em ambientes de manufatura variada.

Um dos principais desafios na utilização de robôs em células de produção é a integração de sistemas, que envolve a sincronização de diferentes dispositivos e a programação avançada dos robôs para realizar tarefas em harmonia com outros equipamentos. Além disso, a segurança é um fator crítico em células robóticas, especialmente em aplicações onde robôs colaborativos trabalham próximos a operadores humanos (Schiavico; Siciliano, 1995).

A interação entre o robô e a célula de trabalho, conforme ilustrado na Figura 5, envolve a supervisão do operador, que é responsável por garantir que o processo produtivo

aconteça corretamente, realizando ajustes ou reprogramações sempre que necessário. Carrara (2017) descreve que o sistema de comunicação conecta o operador ao programa de controle do processo, permitindo que este, por sua vez, gerencie a execução dos programas no manipulador, ative ou desative os acionamentos das máquinas da célula e coordene as atividades entre elas. Baseado nas informações fornecidas pelos sensores externos presentes na célula, o sistema de tomada de decisões tem a capacidade de alterar a programação do robô ou das máquinas, dependendo do tipo de produto em questão. O sistema de controle do robô, em resposta, recebe comandos do sistema de decisão, executa o programa corrente, controla os motores das juntas e monitora o posicionamento através dos sensores instalados.

Figura 5 – Interligação entre componentes de uma célula.



Fonte: (Carrara, 2010)

Outros autores, como Groover (2014), destacam que a integração do sistema de controle do robô com os sensores da célula de trabalho é um fator essencial para a automação eficaz em ambientes industriais. Segundo o autor, a comunicação eficiente entre os diversos componentes do sistema é fundamental para garantir que o robô execute as tarefas de forma precisa e em tempo real, com a capacidade de reagir a mudanças nas condições do processo de maneira adaptativa. Além disso, o controle do robô deve ser robusto e flexível, permitindo ajustes rápidos no caso de falhas ou variações inesperadas, como discutido por Spong e Vidyasagar (2008), que enfatizam a importância da modelagem

e do controle dinâmico nos sistemas robóticos industriais.

Já o autor (McKerrow, 2013) observa que, em sistemas mais avançados, a interação entre o operador e a célula de trabalho pode ser aprimorada com a introdução de interfaces mais sofisticadas, como as de realidade aumentada, que permitem uma visualização mais intuitiva do status do processo e facilitam a intervenção do operador.

2.2.6 Integração de Sensores e Atuadores

A robótica industrial moderna depende fortemente da integração de sensores e atuadores para permitir que os robôs interajam com seu ambiente de maneira eficaz. Sensores de visão, força e proximidade fornecem dados em tempo real sobre as condições da tarefa e o ambiente ao redor do robô, enquanto atuadores elétricos e pneumáticos permitem o controle preciso dos movimentos (Fu; Gonzales; Lee, 1987).

Na célula robótica de aplicação de cola, sensores de proximidade são usados para detectar a posição exata das peças, garantindo que o robô aplique a cola na localização correta. Sensores de força podem ser integrados ao sistema para ajustar a pressão exercida pelo aplicador de cola, evitando desperdícios ou falhas na aplicação. Além disso, a visão computacional pode ser utilizada para verificar a qualidade da aplicação, permitindo que o robô corrija eventuais erros em tempo real (Cutkosky, 1989).

A capacidade de integrar sensores e atuadores torna o robô mais adaptável a variações no processo produtivo, permitindo maior flexibilidade e precisão. Schiavico e Siciliano (1995) ressaltam que a robótica moderna se caracteriza pela implementação de sistemas autônomos, onde a interação com o ambiente é essencial para o sucesso da operação.

2.2.7 Programação de Robôs Industriais

A programação de robôs industriais é uma das áreas mais desafiadoras, pois envolve definir como o robô deve realizar suas tarefas, desde os movimentos até a interação com outros sistemas na fábrica.

A principal característica dos robôs industriais é a sua capacidade de serem programados para executar uma variedade de tarefas. Carrara (2017) enfatiza que, ao contrário de sistemas fixos, os robôs industriais podem ser reprogramados para adaptar-se a diferentes funções, o que aumenta sua versatilidade e aplicabilidade em diversas indústrias. Além disso, os robôs podem ser programados por meio de diferentes dispositivos de entrada, como *joystick*, *mouse*, teclado e até luvas artificiais, que são formas de interação entre o ser humano e a máquina. Esses dispositivos enviam sinais de dados ao sistema de controle, o qual, por sua vez, transmite essas informações para os acionadores, que são responsáveis por gerar os movimentos nos manipuladores robóticos.

Além dos métodos de programação baseados em dispositivos de entrada, outros autores, como Craig (2005), destacam que existem diversas abordagens para programar braços mecânicos, sendo as mais comuns a programação por demonstração, onde o operador guia o robô fisicamente através dos movimentos desejados, e a programação *offline*, onde o movimento do robô é planejado em um ambiente virtual antes de ser executado fisicamente. Em ambas as abordagens, o controle do robô é altamente dependente da interação com o operador, seja por comandos diretos, como no caso do *joystick*, ou por interfaces mais avançadas que permitem uma programação mais intuitiva e precisa.

Ainda, Sharma (2011) discute que a programação de robôs pode envolver diferentes níveis de complexidade, dependendo da aplicação. Para tarefas simples, como movimentação de objetos, a programação pode ser realizada de maneira relativamente simples. No entanto, para tarefas mais complexas, como montagem de peças ou processos de soldagem, a programação requer um maior grau de sofisticação, com a necessidade de um controle mais avançado e o uso de sistemas de feedback para garantir a precisão e a eficiência das operações.

Nos últimos anos, com o avanço da computação e das ferramentas de simulação, a programação *offline* tornou-se cada vez mais popular. Ela permite que engenheiros programem robôs de forma mais eficiente, simulem diferentes cenários e otimizem a trajetória do robô antes mesmo de colocá-lo em operação. Isso é especialmente importante em aplicações como a célula robótica de aplicação de cola, onde a precisão e a eficiência são essenciais para garantir a qualidade do produto final.

2.2.7.1 Tipos de programação

1. **Programação por aprendizagem:** A aprendizagem é a técnica mais comum e amplamente utilizada na programação de robôs. Ela envolve a instrução do manipulador para posicioná-lo nos pontos específicos da trajetória desejada. Esse posicionamento é realizado com o auxílio de uma eletrônica especializada, que inclui um joystick, permitindo ao operador mover cada junta do robô de forma independente. Esse dispositivo eletrônico é conhecido como *teaching-box*, *teach-in-box* ou *teach-pendant*, e possui chaves para selecionar a junta a ser movida, botões direcionais e comandos que permitem ao operador instruir o controlador a armazenar a posição atual (incluindo os ângulos e deslocamentos das juntas) na memória. Essa abordagem de programação é tipicamente utilizada no controle ponto-a-ponto.
2. **Programação por linguagem textual:** Todos os sistemas de controle de manipuladores robóticos possuem recursos para programação em linguagem textual. Essa linguagem utiliza palavras em inglês para codificar as instruções do programa. Assim como em várias outras linguagens, a programação de robôs é sequencial, ou seja, uma

nova instrução só é executada após a conclusão da anterior. Os pontos da trajetória são representados por símbolos, que fazem parte das instruções do programa. Algumas linguagens oferecem recursos adicionais, como operações de cálculo, lógicas booleanas de desvio, sub-rotinas e comandos para interação com sensores e atuadores externos.

3. **Programação mecânica:** A programação mecânica é utilizada em robôs de sequência fixa, que são controlados por chaves de fim de curso, *comes* e chaves elétricas de contato. Normalmente, essa forma de programação é associada ao uso de atuadores pneumáticos em aplicações específicas para a realização de tarefas determinadas. Embora seja a abordagem mais simples e econômica de programação, ela oferece pouca flexibilidade, sendo, por isso, utilizada principalmente em operações simples, como tarefas de pegar e colocar objetos.
4. **Programação de célula de trabalho:** A programação de controle inteligente envolve um sistema onde o controlador é capaz de tomar decisões sobre as operações ou ciclos de trabalho a serem realizados, com base nas informações fornecidas por sensores externos. O controlador tem a capacidade de alternar entre diferentes programas, permitindo sua adaptação a múltiplos produtos sendo produzidos ao mesmo tempo, como ocorre nas linhas de montagem de veículos. Além disso, ele pode acionar e controlar outras máquinas e dispositivos conforme necessário.

2.2.7.2 Programação Robô ABB

A programação de robôs industriais é uma etapa fundamental na automação de processos, garantindo precisão e eficiência na execução de tarefas. No caso do robô ABB IRB 2400, utilizado neste trabalho, a programação foi realizada utilizando a linguagem *RAPID*, que é amplamente reconhecida por sua flexibilidade e simplicidade para tarefas industriais complexas (Craig, 1986).

2.2.7.3 Características da Linguagem *RAPID*

RAPID é a linguagem nativa dos robôs *ABB* e foi projetada para proporcionar alto controle em operações como movimentação, integração com periféricos e execução de comandos lógicos. Essa linguagem permite configurar parâmetros como velocidade, aceleração e zona de precisão, possibilitando uma aplicação uniforme e confiável da cola *Hotmelt*. Comandos específicos como *MoveL* (movimento linear), *MoveJ* (movimento de junta) e *MoveC* (movimento curvilíneo) foram usados para criar trajetórias precisas e adaptadas ao design das peças (Schiavico; Siciliano, 1995).

Uma das grandes vantagens do *RAPID* é sua capacidade de integrar sensores externos e atuadores, o que é fundamental para o controle de processos dinâmicos, como a interação com periféricos, monitoramento em tempo real e adaptação de movimentos

dependendo das condições variáveis do processo produtivo. Isso facilita a implementação de sistemas que exigem alta precisão e flexibilidade, características essenciais em linhas de produção de alta performance.

Além disso, a linguagem *RAPID* é estruturada de maneira sequencial, o que significa que cada comando é executado em uma ordem específica, respeitando a lógica definida no programa. Ela também suporta operações de cálculo, lógicas booleanas e sub-rotinas, garantindo uma grande versatilidade para personalização dos processos. Para complementar, pode-se programar parâmetros de segurança e de diagnóstico diretamente na linguagem, otimizando tanto a operação quanto a manutenção do sistema, a programação *RAPID* é uma ferramenta poderosa para automatizar e otimizar a operação de robôs industriais, permitindo sua adaptação e controle preciso para diferentes necessidades de produção.

2.3 Adesivo industrial

O uso de adesivos industriais tem sido uma das principais estratégias na automação de processos produtivos, principalmente na montagem de componentes e estruturas. Entre os tipos de adesivos disponíveis, a cola *Hotmelt* se destaca por sua versatilidade, rapidez de aplicação e eficiência em processos de manufatura automatizados. Essa tecnologia de adesão tem sido amplamente utilizada em indústrias que vão desde embalagens até a fabricação de automóveis, devido à sua capacidade de criar ligações fortes e duráveis em uma variedade de materiais.

2.3.1 Composição e Características da Cola *Hotmelt*

A cola *Hotmelt* é um tipo de adesivo termoplástico que é aplicado em estado fundido e solidifica ao esfriar, formando uma ligação permanente entre os materiais. Sua composição básica inclui polímeros, resinas e agentes de viscosidade, que são formulados para fornecer propriedades adesivas específicas dependendo da aplicação. Uma das grandes vantagens da cola *Hotmelt* é sua rápida cura, o que permite a agilidade no processo de montagem industrial, com tempos de secagem muito curtos comparados a outros adesivos (Smith; Martin; O'Brien, 2020).

Esse tipo de adesivo é conhecido por não requerer solventes, o que contribui para um ambiente de trabalho mais seguro e menos agressivo ao meio ambiente (Kissel; Heß, 2012). Além disso, as colas *Hotmelt* são bastante versáteis, podendo ser aplicadas em uma grande variedade de superfícies, como plásticos, metais, vidros e madeiras, proporcionando uma excelente aderência inicial e resistência a impactos e vibrações (Silva; Ochsenius; Adams, 2011).

Os adesivos *Hotmelt* são encontrados em diversas formas: filmes, revestidos em fitas, blocos, grãos, etc. Atendem tanto a área doméstica quanto a industrial. Quando

se solidificam, possuem uma alta força de coesão. Em sua composição não existe água e solventes voláteis, ou seja, são 100% sólidos

2.3.2 Aplicação em Processos Industriais

A cola *Hotmelt* é amplamente utilizada em processos industriais automatizados devido à sua facilidade de aplicação. A aplicação é feita normalmente através de pistolas de aplicação ou sistemas automatizados que depositam o adesivo aquecido diretamente sobre as superfícies a serem coladas. Quando combinada com robôs industriais, como os da *ABB*, *KUKA* e *Motoman*, a cola *Hotmelt* pode ser aplicada de maneira precisa e consistente, reduzindo o tempo de ciclo e garantindo uma qualidade uniforme em todas as peças produzidas (Craig, 1986).

Nas linhas de montagem de automóveis, por exemplo, a *Hotmelt* é usada para colar componentes internos, como painéis e molduras, oferecendo não apenas adesão, mas também isolamento acústico e vibração reduzida. Em processos de embalagens, a cola *Hotmelt* é amplamente empregada para selar caixas e embalagens de maneira eficiente e rápida (Rutherford; Davies, 2018).

Apesar de suas muitas vantagens, a cola *Hotmelt* apresenta alguns desafios. Um deles está relacionado ao controle de temperatura. Como esse tipo de adesivo precisa ser aquecido a temperaturas relativamente altas para ser aplicado, o controle preciso da temperatura é essencial para evitar problemas como carbonização ou degradação do adesivo, que podem afetar sua performance (Kissel; Heß, 2012). Além disso, em algumas aplicações onde são necessários longos tempos de cura ou altas resistências químicas, outros tipos de adesivos podem ser mais apropriados.

Outro ponto a ser considerado é a sua limitação em termos de resistência térmica. Embora a cola *Hotmelt* ofereça uma resistência adequada em temperaturas ambientes e moderadas, sua performance pode ser comprometida quando exposta a temperaturas extremamente altas, como as encontradas em algumas aplicações industriais.

2.4 Integração de sistemas

A integração de sistemas de automação é essencial para a eficiência dos processos industriais modernos, especialmente em linhas de produção que envolvem operações complexas e repetitivas, como a aplicação de adesivos. A sinergia entre robôs industriais e a utilização de adesivos *Hotmelt* tem se destacado como uma solução robusta e eficiente em diversos setores, como o automotivo, eletroeletrônico e de embalagens, garantindo precisão, velocidade e uniformidade na colagem de componentes.

2.4.1 Robôs Industriais e Automação no Processo de Aplicação de Cola Hotmelt

Os robôs industriais, como os das marcas ABB, Kuka e Motoman, são amplamente utilizados em processos de colagem com adesivos *Hotmelt* devido à sua capacidade de realizar movimentos precisos e repetitivos, essenciais para a correta aplicação do adesivo em superfícies variadas. Segundo Craig (1986), a robótica industrial, ao longo das últimas décadas, evoluiu consideravelmente, sendo aplicada em processos de manufatura que exigem precisão e controle rigoroso, como é o caso da aplicação de colas industriais.

A cola *Hotmelt*, utilizada por sua rápida cura e forte adesão, é amplamente empregada em indústrias de alta demanda. Os robôs, neste cenário, são responsáveis por manipular as ferramentas de aplicação de cola com alta precisão, controlando parâmetros como temperatura e pressão para garantir a qualidade da colagem. De acordo com Cutkosky (1989), a integração entre sistemas robóticos e ferramentas de aplicação automatizada de adesivos representa um avanço significativo na otimização de processos produtivos.

No processo de aplicação de *Hotmelt*, os robôs industriais realizam movimentos programados, com trajetórias previamente calculadas para garantir que o adesivo seja distribuído uniformemente sobre a peça. A precisão desses movimentos reduz significativamente o desperdício de material e minimiza a necessidade de retrabalho, aumentando a eficiência global da produção. Fu, Gonzales e Lee (1987) destacam que robôs equipados com sensores avançados e sistemas de visão computacional permitem ajustes dinâmicos no processo, assegurando a correta aplicação do adesivo mesmo em condições variáveis.

2.4.2 Vantagens da Integração Robótica com Hotmelt

A integração de robôs industriais com a aplicação de cola *Hotmelt* proporciona vantagens competitivas em termos de produtividade e controle de qualidade. Um dos principais benefícios é a capacidade de realizar a colagem de peças de diferentes tamanhos e formas, sem a necessidade de ajustes manuais frequentes. Robôs como os da *KUKA*, por exemplo, são amplamente empregados na indústria automobilística, aplicando adesivos em portas, painéis e outras estruturas de veículos. Essa flexibilidade operacional aumenta a eficiência do processo, eliminando a variabilidade humana e assegurando resultados uniformes (Schiavico; Siciliano, 1995).

Além disso, a integração de sistemas robóticos com o processo de colagem oferece um controle rigoroso sobre as condições do adesivo. Para que o *Hotmelt* mantenha sua eficácia, é crucial que a temperatura e a viscosidade sejam controladas com precisão. Para isso, robôs são equipados com sensores que monitoram esses parâmetros em tempo real, ajustando automaticamente a vazão e a pressão da cola durante a aplicação (Michaels; Carroll, 2016). Esses avanços tecnológicos garantem que o processo ocorra de forma consistente,

independentemente das variações de temperatura ambiente ou da complexidade geométrica da peça a ser colada.

Apesar dos avanços, a integração de robôs industriais com a aplicação de cola *Hotmelt* apresenta desafios técnicos que devem ser superados. Um dos principais problemas é a manutenção da estabilidade térmica do *Hotmelt*, especialmente em processos de alta demanda produtiva. A viscosidade do adesivo é altamente dependente da temperatura, e variações térmicas podem comprometer a qualidade da colagem, resultando em defeitos ou falhas no produto final (Rutherford; Davies, 2018). Para lidar com esses desafios, sistemas modernos integram controle térmico avançado, que monitora e ajusta a temperatura do adesivo em tempo real.

Outro desafio significativo está relacionado à adaptação de robôs para diferentes tipos de superfícies e materiais. A flexibilidade necessária para lidar com peças de diferentes formas e tamanhos exige programação sofisticada e, muitas vezes, o uso de inteligência artificial para que os robôs possam aprender e adaptar-se a novas condições produtivas. Isso é especialmente importante na aplicação de *Hotmelt*, onde a qualidade da colagem pode ser comprometida por variações mínimas no material ou na superfície de contato (Smith; Martin; O'Brien, 2020). A utilização de sistemas de aprendizado de máquina e inteligência artificial, cada vez mais presentes na Indústria 4.0, tem permitido que robôs ajustem suas operações em tempo real, melhorando a eficiência e a qualidade do processo produtivo.

2.5 Comandos elétricos

Na automação industrial, os comandos e o quadro elétrico desempenham papéis essenciais, funcionando como o núcleo que coordena e controla as operações de sistemas automatizados, incluindo robôs industriais. Um quadro elétrico bem projetado organiza e distribui a energia elétrica e os sinais de controle de forma segura e eficiente, garantindo que cada componente do sistema funcione em sincronia. No contexto da célula robótica para aplicação de cola, a modificação na estrutura exigirá ajustes no sistema de comandos e no quadro elétrico, para acomodar a integração de novas peças e a alternância das operações.

Esses sistemas são compostos por três principais categorias de componentes: elementos de entrada de sinais elétricos, elementos de processamento de sinais e elementos de saída de sinais elétricos.

1. Elementos de Entrada de Sinais Elétricos

- Os elementos de entrada são responsáveis por capturar as informações do ambiente e transformá-las em sinais elétricos que serão processados pelos sistemas de controle.

Esses sinais podem vir de uma ampla variedade de fontes, como sensores, botões de pressão, chaves de fim de curso, fotocélulas, entre outros dispositivos. O objetivo desses elementos é converter estímulos físicos (como a posição de um objeto ou o comando de um operador) em sinais que podem ser compreendidos e manipulados pelo controlador.

- Os sensores de proximidade, por exemplo, são amplamente utilizados para detectar a presença ou ausência de objetos sem a necessidade de contato físico. Eles são essenciais para sistemas de automação onde a precisão e a confiabilidade são fundamentais, como na indústria automotiva e eletrônica (Costa (2016)). Outro exemplo importante são as chaves de fim de curso, que detectam a posição de partes móveis de máquinas, fornecendo informações vitais sobre o ciclo de operação. A precisão dessas informações é crucial, pois pode afetar diretamente a performance e a segurança do sistema.
- A integração desses dispositivos com Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) tem sido cada vez mais comum. O CLP recebe os sinais de entrada, processa-os e envia os comandos correspondentes para os elementos de saída. A utilização desses sensores no contexto de automação moderna permite uma enorme flexibilidade e capacidade de adaptação dos sistemas (Lima, 2017).

2. Elementos de Processamento de Sinais

- Uma vez que os sinais de entrada são capturados, é necessário que sejam processados para gerar respostas adequadas, o que é feito pelos elementos de processamento. Estes dispositivos são responsáveis por interpretar os sinais recebidos e tomar as decisões lógicas que orientarão a operação do sistema. Entre os principais elementos de processamento, destacam-se relés, contadores, temporizadores e, principalmente, os CLPs.
- Os relés e contadores são utilizados para controlar a passagem de corrente elétrica em circuitos de maior potência, possibilitando que sistemas de controle de baixa potência possam gerenciar dispositivos como motores e outros equipamentos industriais. Costa (2016) ressalta que os relés, ao funcionar como interruptores automáticos, são essenciais para garantir a segurança e o isolamento entre os circuitos de controle e os de potência. Além disso, os temporizadores são cruciais para criar atrasos nas operações, controlando a sequência de atividades em processos que requerem intervalos de tempo específicos. Schiavetti (2019) destaca que os temporizadores são particularmente úteis em processos de produção em série, onde a sincronização é fundamental para garantir a eficiência do ciclo de trabalho.
- Os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) são, sem dúvida, os dispositivos de processamento mais sofisticados e amplamente utilizados. Os CLPs permitem

o processamento em tempo real, executando lógicas programadas que determinam como os sistemas automatizados devem responder às condições de entrada. Segundo Souza (2015), o CLP pode ser programado para realizar uma vasta gama de funções, desde simples operações de on/off até algoritmos complexos de controle, adaptando-se às necessidades de cada aplicação.

3. Elementos de Saída de Sinais Elétricos

- Por fim, os elementos de saída de sinais elétricos são responsáveis por realizar as ações físicas com base nos comandos recebidos dos elementos de processamento. Esses dispositivos traduzem as decisões tomadas pelo sistema de controle em ações visíveis ou tangíveis, como o acionamento de motores, válvulas ou atuadores.
- Os motores elétricos são um exemplo clássico de elementos de saída, sendo usados para movimentar peças em linhas de produção ou para acionar outros dispositivos. Costa (2016) afirma que os motores de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA) são os mais utilizados devido à sua confiabilidade e capacidade de adaptação a diversas aplicações industriais. As válvulas solenoides e atuadores pneumáticos ou hidráulicos também desempenham papéis cruciais em sistemas de automação que envolvem controle de fluxo de fluidos, como ar comprimido ou líquidos, com alta precisão e rapidez. Schiavetti (2019) salienta que esses atuadores são especialmente úteis em processos industriais que exigem grande força e precisão em movimentos de curto alcance.
- Além dos atuadores, os dispositivos de sinalização, como lâmpadas de status e sirene de alarme, são usados para fornecer *feedback* visual e sonoro aos operadores, indicando o estado do sistema ou alertando sobre falhas. Esses dispositivos são vitais para manter o controle e a segurança nas operações, garantindo que qualquer anomalia seja rapidamente identificada e corrigida.

2.5.1 Quadro Elétrico

O quadro elétrico é responsável pela centralização e distribuição de energia e sinais de controle para os diversos atuadores, sensores, e controladores dentro da célula robótica. Ele integra dispositivos de proteção, como disjuntores e fusíveis, e componentes de controle, como relés e CLPs (Controladores Lógico-Programáveis), que permitem a operação automatizada de máquinas e robôs (Alves, 2005).

Na célula robótica em questão, a modificação para aplicar cola em duas peças alternadas requer uma atualização do quadro elétrico para suportar o aumento na complexidade do controle. Isso implica na adição de circuitos para controlar os atuadores que manipulam as peças alternadamente, bem como na ampliação dos sinais de monitoramento,

garantindo a sincronia entre a preparação e aplicação da cola em duas peças de maneira coordenada.

2.5.2 Relação com a Mudança na Célula Robótica

A mudança estrutural na célula robótica afeta diretamente o sistema de comandos e o quadro elétrico, pois a alternância entre duas peças exige uma sincronização complexa e maior flexibilidade no controle do robô. Para viabilizar essa mudança, o quadro elétrico deve ser reconfigurado para incluir mais entradas e saídas, capazes de lidar com os novos sensores e atuadores adicionados ao processo (Martins, 2012).

Além disso, a aplicação de cola *Hotmelt* exige um controle preciso da temperatura e do fluxo de cola, o que pode ser gerenciado via CLP ou sistemas de controle dedicados. Dispositivos de medição, como sensores de temperatura e fluxo, podem ser integrados ao sistema de controle para garantir que as condições ideais de aplicação sejam mantidas (Moraes; castrucci, 2007).

2.6 Segurança em Células Robóticas: Normas e Dispositivos de Proteção

A segurança em células robóticas é um aspecto crucial no projeto e operação de sistemas automatizados, garantindo a proteção tanto dos operadores quanto dos equipamentos. Em aplicações industriais onde robôs executam tarefas como a aplicação de cola *Hotmelt*, são utilizados diversos dispositivos de segurança, como grades de proteção, botões de emergência e cortinas de luz, em conformidade com as Normas Regulamentadoras (NRs) que regem a segurança no ambiente de trabalho.

2.6.1 Normas Regulamentadoras (NRs)

No Brasil, a segurança no trabalho com robôs industriais é regida por várias NRs, sendo a NR-12 a mais relevante para a proteção de máquinas e equipamentos. A NR-12 estabelece os requisitos mínimos para a prevenção de acidentes, envolvendo desde o projeto até a manutenção de máquinas, e inclui a necessidade de dispositivos de segurança em células automatizadas (Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego, 2010).

Entre os principais pontos da NR-12, destacam-se a exigência de proteções físicas, como grades e barreiras que impeçam o acesso à zona de operação dos robôs, e a instalação de sistemas de desligamento de emergência facilmente acessíveis. Além disso, a norma reforça a importância de sistemas de segurança intertravados, como cortinas de luz, que são capazes de parar imediatamente a operação do robô ao detectar a entrada de qualquer objeto ou pessoa na área de risco (Moraes; castrucci, 2007).

Com a implementação da modificação na célula robótica para alternar a aplicação de cola entre duas peças, a complexidade do sistema de segurança aumenta. A necessidade de sincronização entre as operações de troca de peças e aplicação de cola torna crucial a presença de dispositivos de segurança intertravados. Grades de proteção devem ser projetadas para cobrir a área adicional necessária para a movimentação das duas peças, e os botões de emergência devem ser colocados em locais que permitam acesso rápido, mesmo com a operação alternada.

A integração da cortina de luz ao sistema de comandos e ao controlador lógico programável (CLP) assegura que qualquer tentativa de interferência durante o processo seja imediatamente identificada, garantindo a proteção dos operadores e evitando danos ao equipamento (Groover, 2011).

2.6.2 Considerações sobre Manutenção e Treinamento

Além da implementação dos dispositivos de segurança, é fundamental realizar manutenções preventivas e inspeções regulares nos sistemas de segurança da célula robótica. Isso inclui a verificação da integridade das grades, a funcionalidade dos botões de emergência e o alinhamento da cortina de luz.

Outro ponto crítico é o treinamento adequado dos operadores. De acordo com a NR-12, todos os operadores e pessoal de manutenção devem ser devidamente capacitados para trabalhar com máquinas automatizadas e sistemas de segurança. Isso envolve a compreensão dos riscos associados à operação de robôs e o uso correto dos dispositivos de segurança (Alves, 2005).

2.7 Fabricação Digital

A Fabricação Digital é caracterizada como uma nova categoria industrial que emprega ferramentas e processos controlados por computador para converter diretamente projetos digitais em produtos físicos. Isso abrange todas as tecnologias que fazem uso de métodos de deposição de materiais para criar estruturas bidimensionais ou tridimensionais, padrões ou produtos (Igoe; Mota, 2011).

O advento dos processos digitais, através de máquinas CNC (Controle Numérico Computadorizado) e sistemas *CAD/CAE/CAM*, sinaliza uma tendência de mudança nos paradigmas dos processos de fabricação (Volpato, 2007). Essa evolução requer atenção por parte das universidades, profissionais da área e diversos setores industriais, uma vez que essa tecnologia está se tornando mais acessível economicamente a cada dia.

A Fabricação Digital possui várias vantagens, como a capacidade de explorar a liberdade intrínseca ao *design* por meio de geometria complexa e composição de materiais, resultando na produção de produtos mais otimizados para o desempenho funcional, sem

serem prejudicados pelas limitações associadas aos processos de fabricação convencionais (Volpato, 2007).

2.7.1 Modelagem 3D

A modelagem computacional, também conhecida como modelagem 3D, é um procedimento que possibilita a criação de uma representação tridimensional de qualquer objeto, seja ele humano, animal, máquina ou equipamento. Esse processo é executado por meio de softwares denominados *CAD* (*Design* Assistido por Computador), os quais fazem uso de recursos matemáticos para representar uma ampla variedade de formas geométricas, desde as mais simples até as mais complexas (Barros, 2012).

A modelagem 3D surge com o propósito de simplificar a elaboração de desenhos e a documentação de projetos, porém, à medida que os softwares evoluem, este método apresenta outras vantagens notáveis. Entre essas vantagens, destaca-se a capacidade da modelagem 3D de fornecer uma compreensão aprofundada das propriedades do objeto a ser fabricado antes da prototipagem, resultando na redução significativa dos custos do projeto (Oliveira, 2008).

Além disso, a visualização aprimorada do projeto final contribui para evitar a elaboração de um projeto completo que não esteja alinhado com as ideias concebidas e com a funcionalidade desejada (Barros, 2012). Esta abordagem prévia e detalhada possibilita a identificação de possíveis falhas ou inadequações, promovendo eficiência e economia de recursos.

A simulação tridimensional representa a etapa final do processo de modelagem, sendo fundamental para a definição das posições e funções que evidenciarão a funcionalidade do projeto. Nesse estágio, é possível visualizar de forma precisa e dinâmica como cada componente interno do projeto será posicionado e como se movimentará, proporcionando uma representação detalhada e realista do sistema em funcionamento. Essa fase não apenas valida a integração harmônica dos elementos, mas também permite uma análise minuciosa do comportamento dinâmico do projeto, contribuindo para a otimização e refinamento antes da implementação prática.

2.8 Manufatura Aditiva

A manufatura aditiva (*additive manufacturing – AM*), popularmente conhecida como impressão 3D (Volpato, 2021), destaca-se como uma revolução significativa nos domínios dos processos de produção e *design* de produtos. Nesse contexto, as peças fundamentais para a estrutura do protótipo serão fabricadas por meio da tecnologia de impressão 3D.

Os métodos de prototipagem podem ser categorizados, conforme definido por Volpato (2021), em três grupos distintos: (a) processos fundamentados em líquidos, (b) aqueles que têm como base os materiais apresentados na forma de pó e (c) processos fundamentados em sólidos.

Tecnologias e Processos:

Estereolitografia (SLA): Utiliza um laser ultravioleta para polimerizar resina líquida, criando uma estrutura tridimensional.

Sinterização Seletiva a Laser (SLS): Uma das tecnologias mais comuns, envolve o uso de um laser para solidificar camadas sucessivas de pó.

Modelagem de deposição fundida (FDM): É um método de fabricação aditiva onde camadas de materiais são fundidas em um padrão para criar um objeto.

Ao explorar a manufatura aditiva, adentramos em uma categoria de processos de fabricação que se diferencia dos métodos convencionais de subtração de material. O método mais amplamente utilizado para realizar a impressão é conhecido como Modelagem por Fusão e Deposição (FDM), que consiste na extrusão de materiais termoplásticos ou cera (Campbell *et al.*, 2011). Este inovador método constrói objetos de forma incremental, camada por camada, proporcionando a capacidade única de produzir peças intrincadas e personalizadas. Essa abordagem não apenas oferece flexibilidade, mas também promove eficiência notável no processo de produção, moldando assim novas perspectivas na fabricação de componentes complexos (Volpato, 2021; Wiltgen; Lopes, 2022).

A manufatura aditiva abrange uma variedade de materiais, incluindo plásticos, metais, cerâmicas e compósitos. Cada material apresenta propriedades específicas que impactam na resistência, durabilidade e aplicação final da peça produzida.

A AM possui diversas aplicações na indústria que abrangem desde a prototipagem rápida até setores especializados. Na prototipagem rápida, destaca-se pela agilidade na criação de modelos, acelerando significativamente o ciclo de desenvolvimento de produtos. Além disso, a capacidade de produção personalizada permite a fabricação de peças únicas ou pequenas séries, adaptando-se às necessidades específicas dos clientes (Wiltgen, 2019).

Ao explorar as potencialidades da manufatura aditiva, deparamo-nos com desafios e limitações que demandam atenção contínua. Os custos iniciais representam um obstáculo, uma vez que os equipamentos para manufatura aditiva podem ser dispendiosos, especialmente quando se opta por tecnologias de ponta (Volpato, 2021). Enfrentar esse desafio implica encontrar um equilíbrio entre os benefícios oferecidos por essas tecnologias avançadas e os investimentos necessários.

2.8.1 Impressão 3D

O procedimento se inicia com a conversão eletrônica do modelo 3D da peça, que é virtualmente "fatiado", resultando nas curvas de nível 2D. Essas curvas delimitam, em cada camada, as regiões específicas onde o material será adicionado ou não. A concretização física da peça ocorre por meio da sobreposição sequencial e adesão das camadas, começando pela base e progredindo até atingir a sua configuração final no topo.

1. Inicialmente, realiza-se a modelagem tridimensional, gerando um modelo geométrico 3D da peça, utilizando, por exemplo, um sistema *CAD* (*Computer Aided Design*);
2. Em seguida, transforma-se o modelo geométrico 3D em um formato específico para manufatura aditiva, frequentemente representado por uma malha de triângulos em um padrão adequado, como *STL* (*STereoLithography*) ou *AMF* (*Additive Manufacturing File Format*);
3. No estágio de planejamento do processo, ocorre a elaboração da estratégia para fabricação por camadas, envolvendo o processo de fatiamento e a definição de estruturas de suporte, bem como estratégias de deposição de material;
4. A fabricação da peça propriamente dita ocorre no equipamento de manufatura aditiva, onde as camadas são depositadas sucessivamente para construir a forma desejada;
5. Por fim, realiza-se o pós-processamento, cujas etapas variam conforme a tecnologia utilizada. Isso pode incluir atividades como limpeza, processos adicionais de acabamento e, em alguns casos, a aplicação de métodos tradicionais de usinagem por remoção para aperfeiçoar a qualidade final da peça.

2.8.2 Tipos de filamentos

Os filamentos de impressora 3D representam os componentes essenciais no processo de impressão tridimensional, desempenhando um papel central na qualidade e precisão dos objetos produzidos. Disponíveis na forma de fios enrolados em carretéis, esses materiais passam por um processo de fusão, resultando na formação do objeto final. Este artigo explora a relevância fundamental dos filamentos na impressão 3D, destacando seu papel crucial na criação de modelos tridimensionais.

2.8.2.1 PLA

O ácido polilático (*PLA*) destaca-se como o filamento primariamente empregado em impressoras 3D, caracterizando-se por uma temperatura de impressão inferior à do acrilonitrilo butadieno estireno (*ABS*). Tal característica dispensa a necessidade de uma mesa aquecida para a realização da impressão (Brito *et al.*, 2011).

Figura 6 – Procedimentos de impressão 3D.

			
Modelo geométrico 3D (por exemplo, CAD)	Planejamento de processo (fatiamento)	Processamento por adição das camadas	Peça fabricada
Modelo eletrônico 3D		Modelo físico	

Fonte: Volpato (2021, p. 17)

Conforme afirmado por Brito *et al.* (2011), o poli (ácido láctico) - *PLA* é um poliéster alifático, termoplástico, que pode apresentar-se de forma semicristalina ou amorfa, sendo também biocompatível e biodegradável. Sua síntese ocorre a partir do ácido láctico, extraído de fontes renováveis. Tais fontes renováveis incluem amido de milho, cana-de-açúcar, raízes de tapioca e amido de batata.

2.8.2.2 ABS

O segundo filamento mais empregado na impressão 3D é o *ABS*. De acordo com Francisco (2016), o polímero *ABS* é um copolímero derivado de reações envolvendo três monômeros distintos, a saber, acrilonitrilo, butadieno e estireno. A impressão com *ABS* demanda maior conhecimento técnico.

O *ABS* destaca-se em relação ao *PLA* devido às suas propriedades mecânicas superiores, oferecendo durabilidade, resistência e peso consideravelmente reduzido. Além disso, o *ABS* possui maior capacidade de suportar temperaturas elevadas, apresenta uma leve flexibilidade e sua principal vantagem em comparação com o *PLA* reside no fato de ser o termoplástico mais econômico disponível no mercado de filamentos para impressão 3D.

2.8.2.3 PETG

O Polietileno Tereftalato (*PET*) é amplamente reconhecido como o plástico mais empregado globalmente, sendo particularmente conhecido pela população devido ao seu uso predominante em garrafas de água e refrigerantes. O *PET* apresenta diversas características positivas relevantes, o que justifica sua disseminação e utilização generalizada (Lima, 2001).

O polietileno tereftalato "bruto" não é frequentemente empregado na impressão 3D, no entanto, existe uma variante conhecida como polietileno tereftalato modificado com glicol, ou *PETG*. Este último é considerado por alguns como um compromisso equilibrado entre o *PLA* e o *ABS*, pois é mais resistente e flexível que o *PLA*, ao mesmo tempo em que é mais fácil de imprimir em comparação com o *ABS*.

2.8.3 Indicadores de Desempenho (KPIs)

Os *KPIs* (*Key Performance Indicators*), ou Indicadores-chave de Desempenho, são ferramentas estratégicas de gestão que têm como principal objetivo medir e monitorar o desempenho de processos e alcançar os objetivos organizacionais. De acordo com Parmenter (2015), esses indicadores são essenciais para medir o sucesso da administração dentro de uma empresa ou sistema, fornecendo dados concretos sobre o desempenho de diversos processos. Essa abordagem possibilita avaliar, de maneira objetiva, o quanto uma organização está alcançando suas metas estabelecidas.

O principal intuito dos *KPIs* é avaliar o progresso em direção aos objetivos estabelecidos, possibilitando aos gestores analisar a eficácia de suas estratégias e operações. Segundo Kaplan e Norton (1992), o uso de *KPIs* está intimamente relacionado à cultura de melhoria contínua dentro das organizações, pois não apenas medem o que está sendo feito, mas também fornecem *insights* importantes para a tomada de decisões informadas. Além disso, esses indicadores permitem que os gestores compartilhem o desempenho dos processos com suas equipes, promovendo maior clareza sobre os objetivos e facilitando a comunicação sobre como o trabalho de cada colaborador contribui para os resultados da organização.

Em termos práticos, os *KPIs* podem ser aplicados para medir o andamento de diversos tipos de metas, como a produtividade, qualidade e efetividade dos processos. Drongelen e Bilderbeek (1999) destacam que, para uma aplicação eficaz dos indicadores, é necessário que eles estejam alinhados com a missão e visão da empresa, refletindo diretamente nos resultados alcançados e garantindo que todas as partes envolvidas compreendam a importância de seus papéis no sucesso da organização.

Outro ponto relevante é a aplicação dos *KPIs* no acompanhamento de diferentes áreas de negócios. Com os avanços tecnológicos, a geração desses indicadores tornou-se mais acessível, sendo possível monitorar e medir o desempenho em tempo real. Smith (2017) observa que, além dos tradicionais indicadores financeiros, as empresas podem utilizar *KPIs* para avaliar o desempenho das etapas de produção, por exemplo, ou analisar a eficiência operacional em tempo real.

Tipos de *KPIs* incluem:

- **Indicadores de Produtividade:** relacionados ao uso eficiente de recursos para a

produção (Smith, 2017).

- **Indicadores de Qualidade:** focados na satisfação do cliente e na conformidade dos produtos e serviços (Juran; Godfrey, 1998).
- **Indicadores de Efetividade:** que medem os impactos e os resultados gerados pelos produtos ou serviços (Kaplan; Norton, 1992).
- **Indicadores de Capacidade:** que avaliam a performance do processo em relação à sua capacidade de entrega dentro de um tempo determinado (Parmenter, 2015).
- **Indicadores Estratégicos:** que indicam o alinhamento da organização com seus objetivos de longo prazo e o desempenho frente aos fatores críticos de sucesso (Drongelen; Bilderbeek, 1999).

Enquanto todo *KPI* é uma métrica, nem toda métrica é um *KPI*. A diferença fundamental reside no fato de que um *KPI* está diretamente vinculado a resultados significativos, refletindo "vetores de valor planejado", enquanto métricas comuns podem medir processos ou atividades, como tempo ou esforço, sem necessariamente indicar o impacto nos objetivos de longo prazo da empresa.

Com o avanço das tecnologias de informação, como softwares e hardwares, os *KPIs* podem ser aplicados em várias fases de um processo organizacional, abrangendo áreas além das tradicionais métricas financeiras. Esses indicadores podem ser usados para avaliar a eficiência de processos internos, a satisfação do cliente ou a performance de novos produtos, como discutido por Parmenter (2015). O uso eficaz de *KPIs* não apenas mensura o desempenho, mas também comunica a visão e os objetivos da organização para todos os níveis hierárquicos, alinhando a equipe em direção a metas comuns.

Além disso, Neves () alerta para o fato de que os *KPIs* devem ser bem estruturados para indicar as áreas críticas da organização, possibilitando ajustes e melhorias contínuas. O sucesso da implementação de *KPIs* está intimamente relacionado ao comprometimento dos profissionais e à qualidade das informações que circulam dentro da empresa. Como ressaltam Kaplan e Norton (1992), a integração eficaz dos *KPIs* no dia a dia organizacional permite que os gestores tomem decisões baseadas em dados precisos e atualizados, assegurando que a empresa esteja no caminho certo para alcançar seus objetivos.

A gestão de *KPIs* é fundamental não apenas para medir o sucesso, mas também para identificar oportunidades de melhoria e orientar a empresa para o crescimento sustentável. Para isso, é importante que a estrutura de medição de desempenho seja robusta e eficiente, garantindo que todos os colaboradores compreendam seu papel no atingimento das metas estabelecidas.

2.8.3.1 KPIs Aplicados à Célula Robótica

1. Taxa de Utilização do Robô

- Mede o percentual de tempo em que o robô está efetivamente em operação aplicando cola.
- Fórmula:

$$\text{Taxa de Utilização} = \left(\frac{\text{Tempo de operação do robô}}{\text{Tempo total disponível}} \right) \times 100$$

- Objetivo: Maximizar a utilização, reduzindo o tempo de inatividade. A alternância entre dois berços de produção visa otimizar esse indicador.

2. Eficiência Global do Equipamento (OEE)

- Considera a disponibilidade, desempenho e qualidade do processo, oferecendo uma visão holística do desempenho da célula.
- Fórmula:

$$\text{OEE} = \text{Disponibilidade} \times \text{Performance} \times \text{Qualidade}$$

- Meta: Atingir um OEE acima de 85%, considerado o padrão de excelência na indústria (Naimi, 2018).

3. Rejeição de Produtos

- Indica a porcentagem de peças rejeitadas devido a falhas no processo, como excesso ou falta de cola.
- Fórmula:

$$\text{Taxa de Rejeição} = \left(\frac{\text{Número de produtos rejeitados}}{\text{Total de produtos fabricados}} \right) \times 100$$

- Objetivo: Manter a taxa de rejeição abaixo de 1%.

4. Custo por Unidade Produzida

- Avalia o custo médio de produção de cada peça, considerando insumos, energia e tempo de máquina.
- Objetivo: Reduzir custos por meio de melhorias na eficiência e redução de desperdícios, maximizando o retorno sobre o investimento (ROI).

5. Tempo de Ciclo Médio

- Mede o tempo total necessário para produzir uma peça, incluindo movimentação do robô e tempo de aplicação de cola.
- Objetivo: Reduzir o tempo de ciclo médio para atender à meta de 130 peças por hora.

2.8.4 *Uso de KPIs no Monitoramento e Melhoria*

A coleta de dados para os *KPIs* é realizada por meio de sensores, registros no CLP e acompanhamento manual. Esses dados são analisados periodicamente, permitindo identificar pontos de melhoria na célula. Por exemplo, ao monitorar a taxa de rejeição, ajustes no sistema de aplicação de cola podem ser feitos para garantir a uniformidade do cordão e reduzir perdas.

Além disso, os *KPIs* orientam decisões estratégicas, como:

- Planejamento da Manutenção: Baseado na análise de *OEE*, programando manutenções preventivas em períodos de menor impacto.
- Ajustes Operacionais: Reduzindo tempos de ociosidade e melhorando a sincronização entre operadores e o robô.
- Análise de *ROI*: Avaliando a eficácia das mudanças implementadas na célula e seu impacto nos custos operacionais.

2.8.5 *Método Taguchi*

O método Taguchi, desenvolvido pelo engenheiro e estatístico Genichi Taguchi, tem como foco principal o controle de qualidade em produtos e processos, além de visar o aumento da produtividade e a redução de custos. De acordo com Montgomery (2004), um processo pode ser entendido como a transformação de um material de entrada em um produto final, sendo que este último pode possuir uma ou mais respostas. Durante essa transformação, existem variáveis controláveis e não controláveis, estas últimas denominadas fatores de ruído. O modelo geral de um processo pode ser utilizado para representar essa dinâmica.

Para selecionar o arranjo ortogonal mais apropriado, que determina o número de experimentos necessários, utiliza-se uma tabela de referência (Tabela 1). A escolha do arranjo depende diretamente do número de fatores e dos níveis associados a cada fator Phadke (1989).

Conforme afirmado por Ross (1991), é possível identificar os fatores de controle que minimizam a variação na qualidade analisando a quantidade de variações nas respostas do sistema. A relação sinal-ruído (S/N) é usada para combinar os valores observados em uma métrica que reflete o nível de variação. Essa métrica também auxilia na determinação do nível ótimo de uma característica, garantindo que as especificações do produto sejam atendidas ou que o processo seja robusto.

O sucesso do método Taguchi não se limita apenas à produção de produtos com maior qualidade, mas também na redução de custos, pois um processo robusto minimiza o

Tabela 1 – Arranjos Ortogonais do Método Taguchi

Arranjo Ortogonal	Nº de linhas	Nº de máximo de fatores	Nº máximo de fatores com esses níveis			
			1	2	3	4
L_4	4	3	3	-	-	-
L_8	8	7	7	-	-	-
L_9	9	4	-	4	-	-
L_{12}	12	11	11	-	-	-
L_{16}	16	15	15	-	5	-
L'_{16}	16	5	-	5	-	-
L_{18}	18	8	1	7	-	-
L_{25}	25	6	-	-	-	6
L_{27}	27	13	-	13	-	-
L_{32}	32	31	31	-	-	-
L'_{32}	32	10	1	-	9	-
L_{36}	36	23	11	12	-	-
L'_{36}	36	16	3	13	-	-
L_{50}	50	12	1	-	-	11
L_{54}	54	26	1	25	-	-
L_{64}	64	63	63	-	-	-
L'_{64}	64	21	-	-	21	-
L_{81}	81	40	40	-	-	40

retrabalho e a necessidade de ajustes constantes. O método Taguchi, com suas ferramentas estatísticas, oferece um caminho eficiente e eficaz para melhorar a qualidade, aumentar a produtividade e reduzir os custos em ambientes de manufatura e processos industriais.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os métodos, técnicas e procedimentos utilizados para o desenvolvimento deste trabalho, que tem como objetivo a automatização de uma célula robótica de aplicação de cola hotmelt. Serão detalhados os passos seguidos na pesquisa, a configuração experimental, os critérios de avaliação e as ferramentas empregadas, além das justificativas para a escolha de cada abordagem. O desenvolvimento está fundamentado em uma combinação de pesquisa aplicada, experimentação e validação prática, alinhada aos princípios da engenharia e automação industrial.

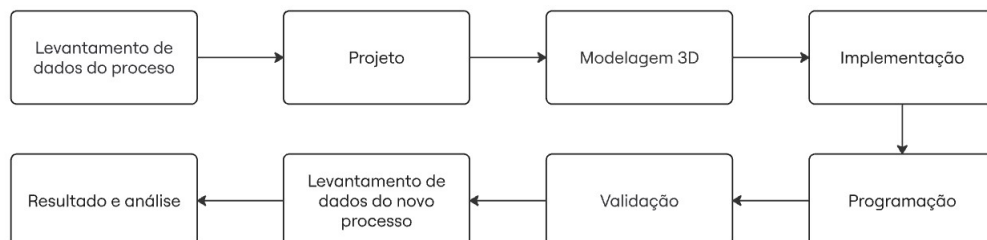
3.1 Tipo de Pesquisa

A pesquisa é caracterizada como aplicada, uma vez que busca resolver um problema específico no contexto industrial: a otimização de uma célula robótica para aumentar a eficiência e reduzir o tempo de ociosidade. De acordo com Gil (2008), a pesquisa aplicada é aquela voltada à solução de problemas práticos, sendo essencial na área de engenharia para o desenvolvimento de novas tecnologias.

Além disso, foi empregada a abordagem quantitativa, com coleta e análise de dados mensuráveis relacionados ao tempo de ciclo, produtividade e eficiência operacional. Essa metodologia foi complementada por experimentação em ambiente controlado para validar as melhorias propostas.

3.2 Etapas do Trabalho

Figura 7 – Fluxograma.



Fonte: Autor

O desenvolvimento do trabalho foi organizado em etapas sequenciais, conforme descrito abaixo:

3.2.1 *Análise Inicial da Célula Robótica*

A análise inicial da célula robótica busca compreender detalhadamente o estado atual do sistema, suas limitações e potenciais para melhoria. A célula analisada utiliza um robô industrial ABB IRB 2400, configurado para aplicar adesivo do tipo *Hotmelt*, com um tambor de cola de 200 kg. O adesivo é essencial para a montagem dos produtos, que consistem nos sinalizadores direito e esquerdo de motos. A estrutura atual da célula é apresentada a seguir.

3.2.1.1 *Estrutura e Configuração da Célula*

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o robô ABB IRB 2400L, controlado pelo sistema IRC5. Este manipulador é amplamente reconhecido por sua versatilidade e robustez, sendo ideal para aplicações industriais como montagem, empacotamento, operações de *pick and place* e testes.

Figura 8 – Estrutura da célula antes da modificação.



Fonte: Autor

Em termos de especificações técnicas, o ABB IRB 2400L possui:

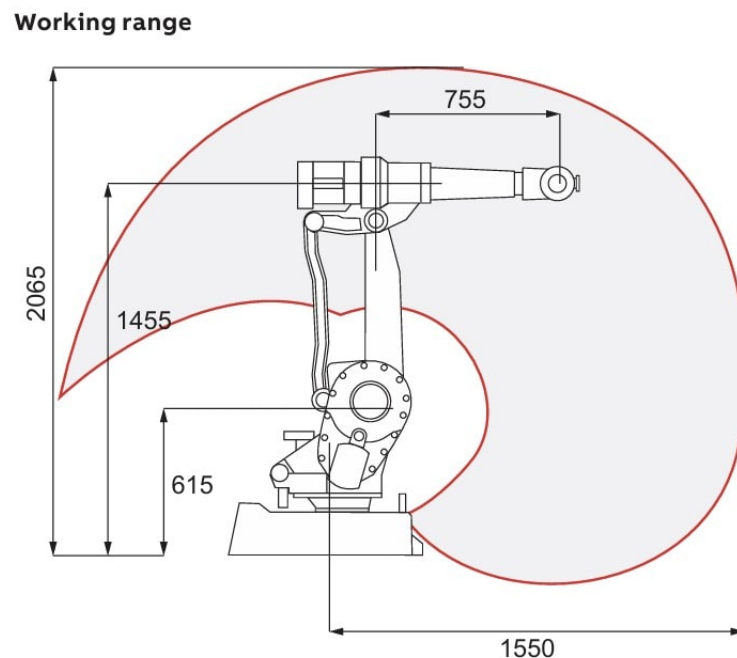
- **Graus de liberdade:** 6, o que permite ampla flexibilidade operacional;
- **Alcance máximo:** 1,8 metros, garantindo uma cobertura eficiente para diferentes operações;
- **Capacidade de carga máxima:** 16 kg, suficiente para lidar com peças de tamanho médio;
- **Repetibilidade:** $\pm 0,06$ mm, assegurando alta precisão em tarefas repetitivas.

3.2.1.2 Espaço de Trabalho

O espaço de trabalho do robô é a região tridimensional dentro da qual ele pode operar, considerando a amplitude dos seus eixos e as limitações impostas pelas juntas e dimensões físicas do manipulador. No caso do ABB IRB 2400L, o espaço de trabalho é ideal para operações em células industriais compactas, como a proposta neste projeto.

A Figura 9 ilustra o espaço de trabalho deste robô, destacando suas dimensões operacionais e sua adequação à aplicação de cola em peças automotivas.

Figura 9 – Espaço de trabalho.



Fonte: (ABB, 2019)

Antes das melhorias implementadas, a célula robótica já contava com um projeto que atendia às normas de segurança e operação estabelecidas para ambientes industriais.

O enclausuramento do robô ABB 2400L foi projetado seguindo padrões regulatórios, como a NR-12 e outras diretrizes aplicáveis, para garantir a proteção dos operadores e prevenir acidentes.

Essa estrutura incluía grades metálicas reforçadas ao redor da célula de trabalho, portas de acesso com intertravamento de segurança e sinalização visual para indicar o status de operação do robô. O espaço interno era suficiente para acomodar as ferramentas e dispositivos necessários para a aplicação de cola em peças individuais. Além disso, o sistema era equipado com sensores de presença para interromper o funcionamento do robô caso algum operador ou objeto não autorizado acessasse a área restrita.

Características Principais da Estrutura Inicial:

1. Enclausuramento Metálico:

- Material resistente e durável, projetado para conter quaisquer movimentações inesperadas do robô.
- Conformidade com as normas de segurança para proteger trabalhadores contra riscos mecânicos.

2. Portas com Intertravamento:

- Mecanismos que garantiam a paralisação automática do robô ao abrir qualquer porta de acesso.

3. Espaço de Trabalho Individualizado:

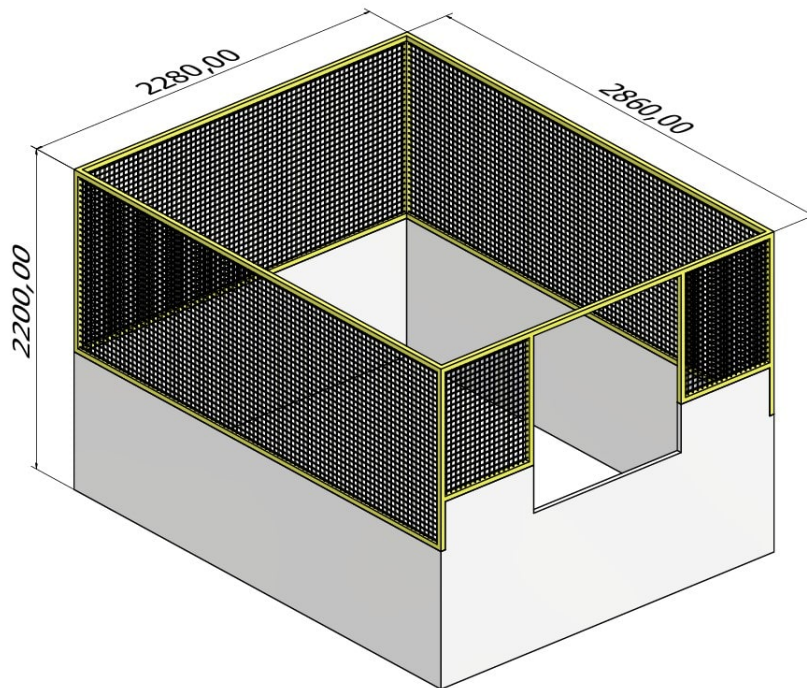
- Configuração limitada à manipulação de uma peça por vez, causando inatividade do robô durante a troca de peças.

Embora funcional e seguro, o *layout* inicial apresentava limitações relacionadas à produtividade, uma vez que o robô permanecia ocioso enquanto as peças eram substituídas manualmente ou pela esteira. Essa ineficiência foi um dos principais motivadores para a realização das mudanças estruturais descritas neste projeto.

A célula robótica está protegida por uma grade de segurança com dimensões de 2,86m x 2,28m x 2,20m, como mostra a Figura 10, Além da grade, a célula possui dispositivos essenciais, como:

- Mesa de apoio: para posicionar os berços dos produtos a serem processados.
- Barreira de proteção e botão de emergência: asseguram controle e segurança durante ajustes no sistema.
- Botão do TCP (Tool Center Point): utilizado para calibração do robô.

Figura 10 – Estrutura da grade inicial.



Fonte: Autor

Os produtos processados incluem carcaças metalizadas e lentes plásticas injetadas. As carcaças, que recebem a cola, são acopladas às lentes após a aplicação do adesivo. Esse processo garante a vedação e a fixação adequadas para o produto final.

3.2.1.3 Ciclo Operacional

O ciclo operacional da célula robótica foi projetado para realizar a aplicação de cola em peças de maneira precisa e segura. A configuração inicial seguia um fluxo bem definido, mas apresentava limitações em termos de produtividade, devido à ociosidade do robô durante as trocas de peças. O ciclo de operação está dividido em três fases principais:

- Preparação do produto: O operador realiza uma inspeção visual para identificar avarias, aplica jato de ar ionizado para remover impurezas e posiciona a carcaça no berço.
- Aplicação de cola: O robô aplica o adesivo *Hotmelt* na carcaça, em um ciclo de 10 segundos. Durante este período, o operador prepara a lente do produto.
- Montagem e rastreabilidade: Após a aplicação, o operador acopla a lente à carcaça, realiza a marcação de rastreabilidade e embala o produto.

Apesar de eficiente, o ciclo apresenta 17,5 segundos de ociosidade, durante os quais o robô permanece inativo enquanto o operador executa tarefas manuais. Essa ociosidade compromete a meta de 130 peças por hora, criando oportunidades para otimização.

3.2.1.4 Controle e Integração do Sistema

A bomba de cola tem como função garantir que o material seja transportado do reservatório até o aplicador com pressão e fluxo desejado, de acordo com os critérios definido pelo responsável do setor de colagem. A bomba de cola permite ajustes de parâmetros como:

- Temperatura do tambor, mangueira e bico do adesivo;
- Velocidade do motor (RPM).

No entanto, esses ajustes são realizados com base em análise estatística, o que pode comprometer a consistência do processo. O sistema de controle é gerenciado por um CLP, que seleciona receitas e recebe acionamentos de botões. A produção só é iniciada após uma série de verificações, incluindo a uniformidade do cordão de cola na canaleta da peça.

O acionamento bimanual e os botões de emergência reforçam a segurança da operação, enquanto a grade protetora impede o acesso durante o funcionamento do robô.

3.2.1.5 Gargalos e Manutenções

Um gargalo é qualquer etapa do processo produtivo que limita ou reduz o fluxo total de produção. Ele ocorre quando a capacidade de uma determinada etapa é inferior à demanda das etapas subsequentes ou precedentes, gerando atrasos, ociosidade de recursos e perda de eficiência. Os principais gargalos identificados incluem:

- Falta de automação na inspeção: A análise manual das peças consome tempo significativo.
- Falta de controle fino na aplicação do adesivo: Isso resulta em variações na quantidade de cola aplicada, gerando desperdício ou falhas.
- Erro de programa: Operadores podem selecionar o programa errado, levando à colisão do robô e ajustes no TCP.

As manutenções preventivas são realizadas semestral e anualmente, minimizando falhas mecânicas. No entanto, a rotatividade de operadores gera um desafio adicional, especialmente quando novos operadores necessitam de supervisão intensiva para evitar erros críticos.

3.2.2 Proposta de Melhoria

A análise de soluções alternativas busca avaliar caminhos viáveis para otimizar o desempenho da célula robótica em estudo, que aplica cola em peças injetadas. A trabalho desse projeto envolve a duplicação de mão de obra, o que permitirá ao robô alternar entre dois berços de aplicação, utilizando dois acionamentos bimanual independentes. Essa abordagem tem como objetivo eliminar o tempo de ociosidade, aumentando a produtividade sem comprometer a qualidade do processo.

3.2.2.1 Solução Proposta: Duplicação de MOD

A duplicação de MOD permitirá que o robô ABB IRB 2400, enquanto realiza a aplicação de cola em um berço, tenha outro disponível para a próxima peça. Esse sistema, que exige sincronização precisa entre os ciclos do robô e os operadores, otimiza a produtividade ao utilizar o tempo de ociosidade para o processamento de uma segunda peça. A implementação incluirá:

- Modificação do *layout* da célula para acomodar a nova estrutura.
- Adição de um novo berço para o produto.
- Configuração de dois acionamentos bimanuais independentes
- Adição de novos componentes de segurança, como botão de emergência e barreira de luz.

3.2.2.2 Alternativas Consideradas

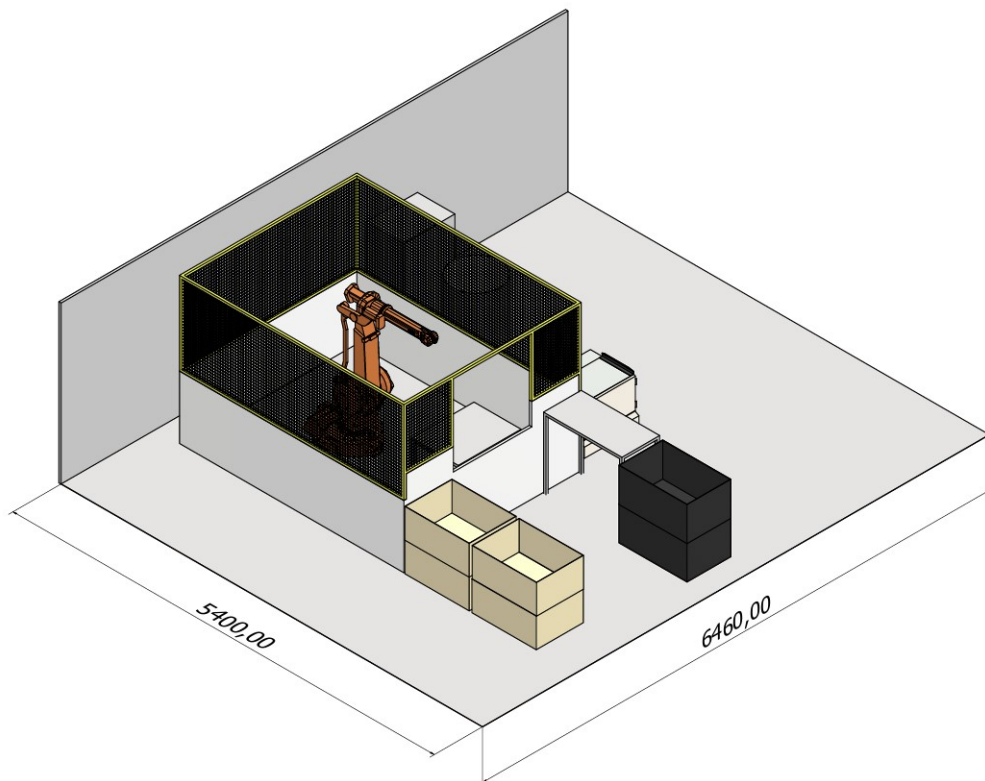
Além da solução proposta, algumas alternativas foram analisadas, mas descartadas por razões técnicas e econômicas:

- Adição de um segundo robô: Embora eficiente, a solução duplicaria o custo de implementação e manutenção, inviabilizando economicamente o projeto.
- Automação total do processo: Exigir sistemas de visão e controle mais complexos aumentaria drasticamente o custo, além de demandar espaço físico que a célula atual não possui.

3.2.2.3 Restrições e Impactos

O espaço físico limitado é a principal restrição identificada. A célula atual possui dimensões de 5,40m x 6,460m, como mostra a Figura 11, restringindo o *layout*. Contudo, estudos preliminares indicam que o espaço disponível é suficiente para a implementação da melhoria.

Figura 11 – Área ocupada pela célula.



Fonte: Autor

3.2.3 Simulação e Modelagem

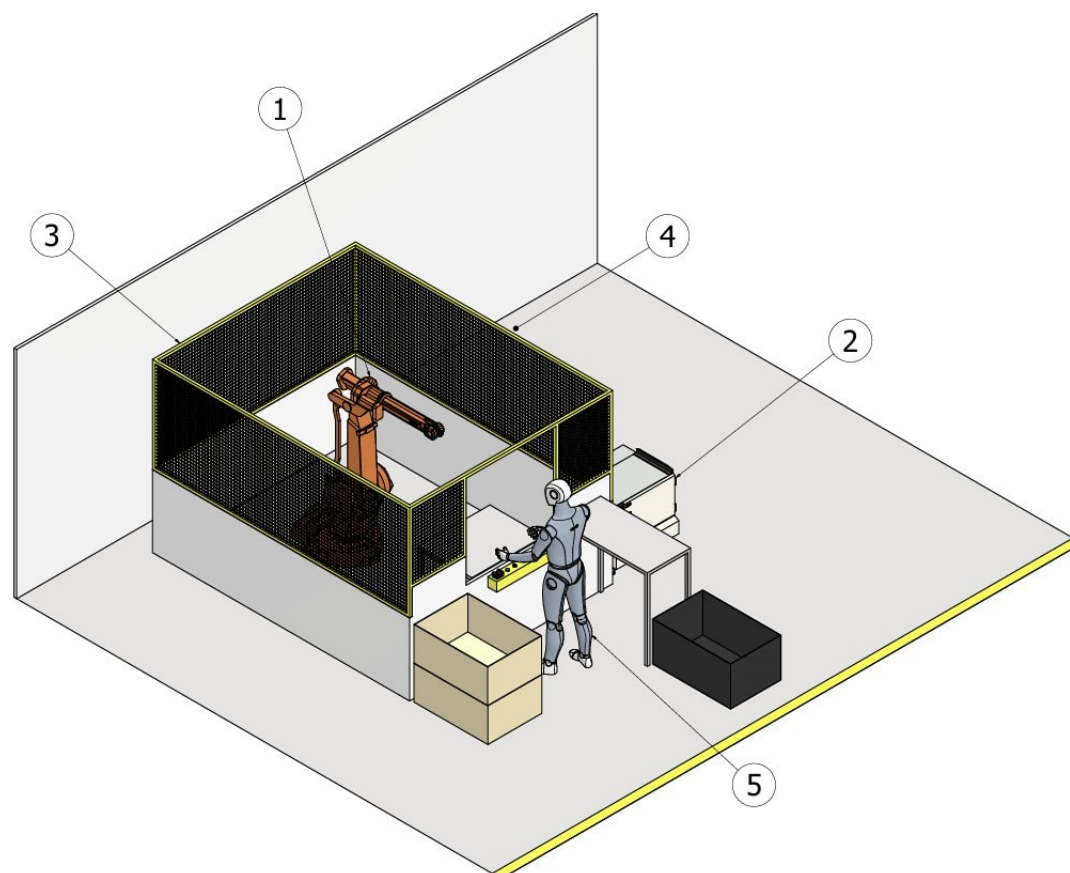
A modelagem da célula robótica inicial e a modelagem do projeto de modificação foram desenvolvidas utilizando o *software Autodesk Inventor*, com o objetivo de detalhar visualmente as alterações previstas e analisar a viabilidade do projeto.

A célula inicial foi representada em um modelo tridimensional que inclui a posição do robô ABB IRB 2400, as caixas com o material, os dispositivos de segurança (grade de proteção, botões de emergência, cortinas de luz) e o espaço destinado ao operador. Esse modelo destaca o *layout* da estrutura inicial e evidencia os pontos de ociosidade do robô.

O *layout* da célula inicial está composto por:

1. Robô ABB
2. IRC5
3. Grade de proteção
4. Bomba de cola
5. Operador

Figura 12 – Célula inicial.



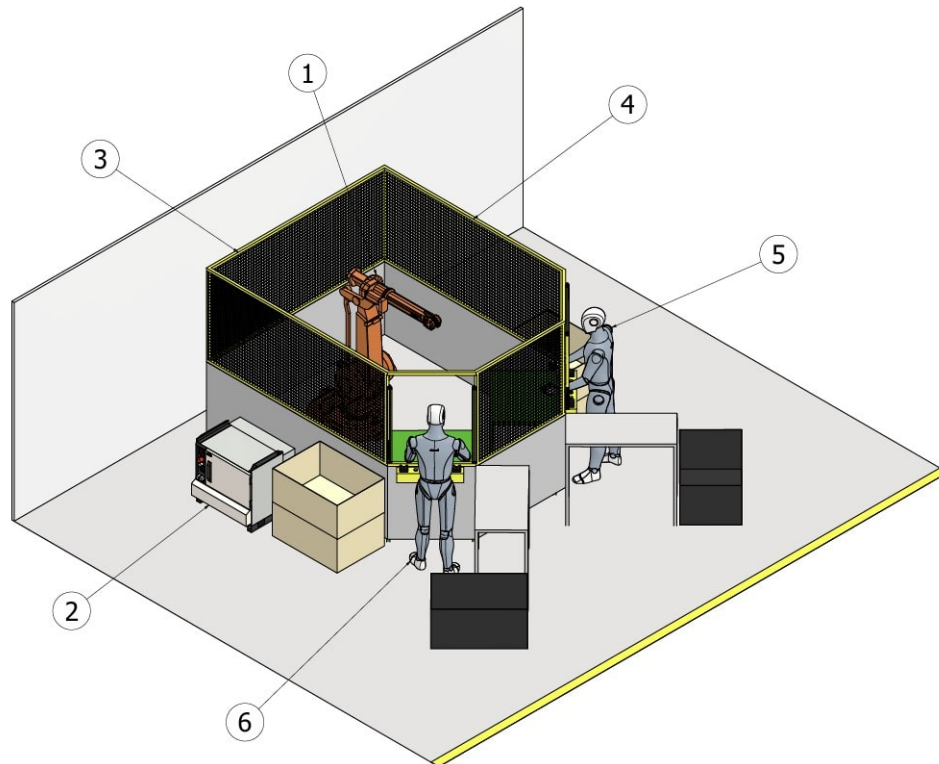
Fonte: Autor

Na Figura 13 temos a modelagem da modificação, a célula foi reorganizada para incorporar dois braços, permitindo a aplicação de cola em dois produtos de forma intercalada. Adicionalmente, o layout foi ajustado para incluir mais um acionamento bimanual independente, novos dispositivos de segurança e a otimização do espaço físico. As imagens da modelagem 3D ilustram essas modificações, destacando o posicionamento estratégico dos componentes e o aumento na eficiência esperada.

O layout da célula modificada está composto por:

1. Robô ABB
2. IRC5
3. Grade de proteção
4. Bomba de cola
5. Operador 1
6. Operador 2

Figura 13 – Célula Modificada.



Fonte: Autor

3.2.4 Construção e Implementação

A etapa de construção e implementação consistiu na execução prática das modificações propostas na célula robótica, com o objetivo de otimizar seu desempenho. Essa fase foi realizada em diversas etapas cuidadosamente planejadas, desde a desmontagem da estrutura atual até a programação da nova trajetória do robô.

3.2.4.1 Desmontagem da estrutura

A primeira etapa consistiu na desmontagem da estrutura existente, incluindo a remoção das grades de proteção e dos componentes acessórios da célula (Figura 14). Esse processo exigiu cuidado para evitar danos aos materiais e equipamentos que seriam reaproveitados na nova configuração.

3.2.4.2 Desfixação do Robô para Movimentação

O robô ABB IRB 2400 foi cuidadosamente desfixado de sua base para permitir sua movimentação. Este processo seguiu protocolos rigorosos de segurança para evitar danos ao equipamento ou riscos para a equipe (Figura 15). A desfixação foi seguida de

Figura 14 – Desmontagem da estrutura.



Fonte: Autor

um reposicionamento definitivo do robô, para ter espaço aos 2 postos da célula nova e aos materiais que serão consumidos durante o processo.

Figura 15 – Desmontagem da fixação do robô.



Fonte: Autor

3.2.4.3 Corte da grade

Com base no *layout* proposto, as grades de proteção foram cortadas para ajustar as dimensões da célula e acomodar a nova configuração (Figura 16). Esse processo foi

realizado utilizando ferramentas de corte e seguiu as normas de segurança da NR-12, garantindo que as bordas cortadas fossem tratadas para evitar acidentes.

Figura 16 – corte da estrutura e movimentação do robô.



Fonte: Autor

3.2.4.4 Montagem do quadro elétrico

O quadro elétrico foi atualizado para atender à nova configuração da célula. Essa etapa envolveu a instalação de novos componentes, como módulos de expansão para os acionamentos bimanual, botões de emergência adicionais e as barreiras de segurança, além da readequação dos circuitos de controle para garantir a integração dos novos berços e comandos (Figura 17).

Figura 17 – Testes do quadro de comandos.



Fonte: Autor

3.2.4.5 Solda da grade

Após os cortes necessários, as grades de proteção foram soldadas para compor a nova estrutura. Esse processo foi realizado utilizando solda, garantindo resistência e

acabamento (Figura 18). As grades foram posicionadas de acordo com o *layout* planejado, respeitando as áreas de acesso do operador e as zonas de segurança.

Figura 18 – Montagem da estrutura.



Fonte: Autor

3.2.4.6 Montagem dos comandos

Os comandos de operação, incluindo acionamentos bimanual, botões de purga e do TCP, foram instalados e configurados. Esses dispositivos foram posicionados estrategicamente para otimizar a ergonomia e a segurança do operador (Figura 19).

Figura 19 – Montagem dos componentes.



Fonte: Autor

3.2.4.7 Célula nova

Com as grades soldadas, o quadro elétrico atualizado e os comandos montados, a estrutura da célula foi finalizada. A nova configuração foi testada para garantir a integridade mecânica e a conformidade com as normas de segurança aplicáveis (Figura 20).

Figura 20 – Nova célula.



Fonte: Autor

3.2.4.8 Programação

A última etapa consistiu na programação da nova trajetória do robô ABB IRB 2400. Essa programação foi realizada diretamente do Teach Pendant (TP) do robô. A trajetória foi otimizada para reduzir o tempo de aplicação da cola e garantir a uniformidade do cordão de adesivo nos dois berços. Após a conclusão, testes operacionais foram realizados para validar a precisão e a eficiência do processo.

O processo de programação do robô ABB para gravar os pontos de trajetória e configurá-lo para os diferentes tipos de peças envolveu um planejamento para otimizar a operação e garantir que o robô pudesse manipular os produtos com precisão e eficiência.

1. **Definição dos Pontos de Trajetória:** O primeiro passo foi identificar os pontos de trajetória que o robô deve seguir para a aplicação de cola. Para isso, utilizou-se o *Teach Pendant* (TP), que permite ao operador ensinar ao robô os pontos de destino para onde o braço robótico deve se mover. Com isso é necessário mover o braço do robô manualmente até a posição desejada e grava esse ponto no TP. Essa gravação é repetida para cada ponto de movimento necessário na trajetória, como os pontos de aplicação

Figura 21 – Programação da trajetória.



Fonte: Autor

da cola em cada berço. Para garantir a precisão, os pontos de aplicação de cola foram definidos com base na posição de cada produto a ser manipulado.

2. **Configuração dos Programas:** Foram criados três programas no TP do robô para cobrir as diferentes configurações de produtos que o robô manipulará. Os programas são:

- Produto Direito e Produto Esquerdo: Configuração onde o robô realiza a aplicação de cola em uma peça lado direita e outro lado esquerdo.
- Produto Direito e Direito: Configuração onde o robô realiza a aplicação de cola em uma peça lado direita e outro lado direito.
- Produto Esquerdo e Esquerdo: Configuração onde o robô realiza a aplicação de cola em uma peça lado esquerdo e outro lado esquerdo.

3. **Testes de Trajetória:** Após a configuração dos programas, foi realizada a simulação e o teste de cada programa no TP para garantir que as trajetórias estavam corretas e que o robô conseguia alcançar todos os pontos de maneira eficiente. Durante esse processo, ajustes finos foram feitos nas posições e nas velocidades de movimentação, a fim de evitar colisões e garantir um movimento suave e preciso. Durante os testes, foi monitorado também o tempo de ciclo e a precisão da aplicação da cola, ajustando os parâmetros conforme necessário.

4. **Seleção do Programa pelo Operador:** Para operar o robô, o operador deve selecionar qual configuração será utilizada. A seleção é feita diretamente no TP, onde a interface gráfica permite a escolha entre os três programas: Produto Direito e Esquerdo, Produto

Direito e Direito, e Produto Esquerdo e Esquerdo. O operador escolhe o programa dependendo da disposição das peças a serem manipuladas no momento, e o robô então executa a trajetória correspondente para realizar a aplicação de cola.

5. **Ajustes e Otimizações:** Após a implementação inicial, o processo foi monitorado para verificar se havia pontos de melhoria, como a redução de tempos de ciclo ou melhorias na precisão da aplicação de cola. Ajustes foram feitos tanto nas trajetórias quanto nos parâmetros de movimento (velocidade, temperatura e peso), com o objetivo de garantir o melhor desempenho do sistema.

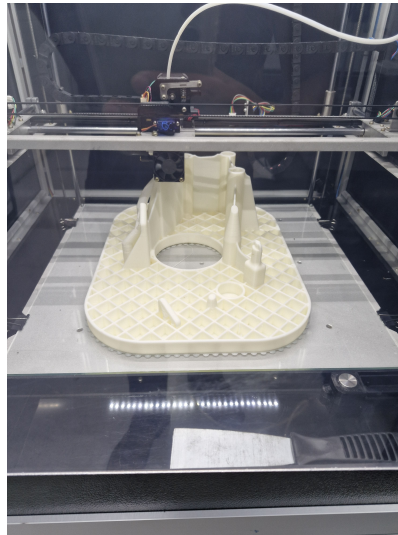
3.2.4.9 Impressão 3D dos berços

Para a fabricação dos berços utilizados na célula de robô, foi empregada a impressora 3D Sethi3D S4X, uma máquina de alta performance e precisão, capaz de garantir a qualidade necessária para a produção de peças com exigências mecânicas específicas.

1. **Objetivo:** O principal objetivo da impressão 3D dos berços foi criar peças de suporte para as peças a serem manipuladas pelo robô. Esses berços são fundamentais para garantir que as peças fiquem firmemente posicionadas durante a aplicação da cola. Foram produzidos dois berços para cada lado, com a finalidade de manter a uniformidade e garantir que, caso seja necessário usar o mesmo lado nos dois postos de trabalho, haja a possibilidade de ter peças idênticas para otimizar o tempo e a operação.
2. **Material Utilizado:** O material escolhido para a impressão foi o ABS (Acrilonitrila Butadieno Estireno). O ABS é um polímero amplamente utilizado na impressão 3D devido à sua alta resistência mecânica, durabilidade e capacidade de suportar esforços. Esse material é ideal para peças que exigem boa resistência estrutural e resistência a impactos, garantindo maior durabilidade para os berços.
3. **Configurações de Impressão:** Para maximizar a eficiência e garantir a resistência mecânica das peças, foram aplicadas configurações otimizadas na impressora.
 - Altura de camada otimizada para alcançar o equilíbrio entre precisão e velocidade de impressão.
 - Preenchimento (infill) mais denso, garantindo maior resistência estrutural sem comprometer a integridade da peça.
 - Temperatura de extrusão ajustada para garantir a aderência adequada das camadas e a melhor adesão entre as partículas do ABS.
4. **Impressão e Resultados:** A impressão dos berços foi realizada com sucesso, com as peças atendendo a todos os requisitos de resistência e precisão dimensional. Os berços foram projetados para encaixar corretamente nos pontos de apoio do robô, garantindo

que as peças sejam posicionadas de maneira estável e segura durante o processo de aplicação da cola.

Figura 22 – Impressão 3D do berço.



Fonte: Autor

3.2.5 Validação e Testes

A etapa final consistiu na realização de testes para validar as melhorias propostas. Os testes foram realizados em ambiente controlado, monitorando os seguintes indicadores:

3.2.5.1 Análise do ciclo

Para realizar a análise do ciclo de produção após a melhoria, usou-se do método de cronometragem de tempo com análise por Diagrama de Gantt. Esse método permite identificar e organizar graficamente as etapas do processo, calculando o tempo total de cada ciclo, incluindo tempos ativos e ociosos.

3.2.5.2 Ciclo Operacional da Célula Inicial

O acompanhamento do ciclo operacional da célula inicial permitiu identificar detalhes sobre o desempenho do processo de colagem. Com um tempo médio de ciclo de 27,5 segundos, observou-se que o robô permanecia em operação por aproximadamente 10 segundos, enquanto os 17,5 segundos restantes correspondiam à ociosidade durante a troca de peças. Essa análise destacou a ineficiência do sistema inicial, evidenciando a necessidade de uma solução que reduzisse o tempo de inatividade e aumentasse a produtividade da célula.

Tabela 2 – Ciclo Operacional da Célula Inicial

Etapa	Tempo (segundos)	Observação
Aplicação de cola (Berço único)	10	Robô em operação.
Ociosidade	17,5	Robô aguardando.
Tempo Total	27,5 segundos	

3.2.5.3 Ciclo Operacional da Célula Modificada

O acompanhamento do ciclo operacional da célula modificada revelou melhorias significativas no desempenho do processo. O tempo médio de ciclo foi reduzido para 25 segundos, com o robô operando por 20 segundos e apresentando apenas 5 segundos de ociosidade. Essa mudança reflete o impacto positivo da reestruturação da célula, que permitiu a aplicação alternada de cola em duas peças.

Tabela 3 – Ciclo Operacional da Célula Modificada

Etapa	Tempo (segundos)	Observação
Aplicação de cola (berço 1)	10	Robô em operação no berço 1.
Aplicação de cola (berço 2)	10	Alternância para o berço 2.
Ociosidade	5	Redução significativa.
Tempo Total	25 segundos	

3.2.5.4 Método Taguchi

Após a implementação inicial, o processo foi monitorado para verificar se havia pontos de melhoria, como a redução de tempos de ciclo ou melhorias na precisão da aplicação de cola. Ajustes foram feitos tanto nas trajetórias quanto nos parâmetros de movimento (velocidade, temperatura e peso), com o objetivo de garantir o melhor desempenho do sistema.

O Método Taguchi foi empregado para determinar a melhor combinação de parâmetros operacionais na célula robótica, visando otimizar a aplicação de cola e melhorar o desempenho do processo. Os parâmetros selecionados para o estudo foram:

1. Rotação da Bomba (RPM): Influencia diretamente a vazão e a pressão da cola durante a aplicação. Um ajuste inadequado pode causar excesso ou falta de material, comprometendo a qualidade do produto.
2. Temperatura: Afeta a viscosidade da cola, que por sua vez impacta na sua uniformidade e adesão. Temperaturas fora da faixa ideal podem dificultar a aplicação ou alterar as propriedades adesivas.

3. Tempo de Aplicação: Define o período em que a cola é depositada na peça, influenciando a quantidade de material aplicado. Uma duração maior ou menor do que o necessário pode gerar desperdícios ou aplicação insuficiente.

Aplicação do Método Taguchi:

Para organizar as combinações possíveis de níveis para as três variáveis (temperatura, tempo e RPM) em um arranjo ortogonal utilizando o método de Taguchi, é necessário estruturar uma tabela que apresente todas as combinações possíveis de forma balanceada. No caso, temos:

- **Temperatura:** 3 níveis (125°, 130°, 135°)
- **Tempo:** 2 níveis (10s, 15s)
- **RPM:** 3 níveis (70, 75, 80)

Tabela 4 – Configuração do Experimento usando o Método Taguchi

Experimento	Temperatura do bico de cola (°C)	Tempo de Ciclo (s)	RPM da Bomba
1	125	10	70
2	125	15	75
3	125	10	80
4	130	15	70
5	130	10	75
6	130	15	80
7	135	10	70
8	135	15	75
9	135	10	80

Cada fator foi avaliado em diferentes níveis, permitindo identificar a influência individual e combinada sobre a qualidade do processo.

Com os valores das amostras coletadas nos experimentos conduzidos pelo Método Taguchi, é possível gerar gráficos que permitem identificar visualmente qual combinação de parâmetros resultou em menor variação e, conseqüentemente, na melhor performance do processo.

3.3 Materiais Utilizados

Para a realização deste trabalho, foi necessária a utilização de diversos materiais e dispositivos fundamentais para a configuração, modificação e operação da célula robótica. A seguir, cada material utilizado será explorado em detalhe:

3.3.1 Robô ABB IRB 2400

O robô industrial ABB é o principal componente da célula, sendo responsável pela aplicação de cola no processo produtivo. Este equipamento destaca-se por sua alta precisão, repetibilidade e confiabilidade, características essenciais para garantir a uniformidade do cordão de cola e a qualidade do produto final. Sua configuração foi ajustada para otimizar o movimento entre os dois berços, reduzindo o tempo de ciclo.

Figura 23 – Robô ABB IRB 2400.



Fonte: (ABB, 2019)

3.3.2 Controlador IRC5

O controlador IRC5, da ABB, é utilizado para gerenciar os movimentos e operações do robô. Este dispositivo é o cérebro do sistema, executando comandos de programação, controlando os servomotores e garantindo a integração com os demais equipamentos da célula. Sua arquitetura modular e flexível permitiu a implementação de ajustes específicos, como o controle da velocidade e a coordenação entre o robô e os dispositivos periféricos.

Figura 24 – Controlador IRC5.



Fonte: (ABB, 2024a)

3.3.3 Teach Pendant

O teach pendant, também fornecido pela ABB, é um dispositivo de interface que permite a programação e o monitoramento do robô. Ele foi essencial durante as etapas de configuração e testes, possibilitando ajustes precisos na trajetória, parâmetros de aplicação de cola e sincronização das operações nos dois braços.

Figura 25 – Teach Pendant.



Fonte: (ABB, 2024b)

3.3.4 Relés

Os relés utilizados na célula robótica têm como função a comutação de sinais elétricos, permitindo o controle de dispositivos externos, como atuadores e barreiras de segurança. Eles garantem a comunicação eficiente entre o controlador e os equipamentos auxiliares, além de protegerem o sistema contra sobrecargas.

Figura 26 – Relés.



Fonte: (AG, 2024b)

3.3.5 Disjuntor Monofásico

O disjuntor monofásico é um elemento de proteção elétrica utilizado para prevenir curtos-circuitos e sobrecargas na alimentação da célula. Sua inclusão no sistema assegura a integridade dos componentes e a segurança dos operadores.

Figura 27 – Disjuntor.



Fonte: (Electric, 2024)

3.3.6 Fonte

A fonte de alimentação é responsável por fornecer energia estabilizada e adequada para os diferentes componentes da célula, como as barreiras e os botões bimanuais. Uma alimentação confiável é indispensável para evitar falhas no funcionamento do sistema.

Figura 28 – Fonte de alimentação 24v.



Fonte: (Metaltex, 2024d)

3.3.7 Botão Cogumelo

O botão de emergência, conhecido como botão cogumelo, é um elemento essencial de segurança. Em caso de situações inesperadas ou perigosas, este botão pode ser acionado para interromper imediatamente todas as operações da célula, protegendo os operadores e o equipamento.

Figura 29 – Botão cogumelo.



Fonte: (Metaltex, 2024a)

3.3.8 Botão Chave

O botão chave foi utilizado para habilitar ou desabilitar funções específicas da célula robótica, como posicionar o robô no TCP, garantindo que apenas operadores autorizados possam realizar ajustes críticos ou iniciar operações.

Figura 30 – Chave seletora.



Fonte: (Metaltex, 2024c)

3.3.9 Botão Pulso

Este botão é empregado para a ativação momentânea de circuitos, como inicialização de processos ou acionamento de testes. Sua utilização foi fundamental durante a validação da programação da célula.

Figura 31 – Botão pulso.



Fonte: (Metaltex, 2024b)

3.3.10 Botões bimanuais

Os botões bimanuais são dispositivos de segurança que requerem o acionamento simultâneo com ambas as mãos do operador para iniciar ou continuar um processo. Essa característica reduz drasticamente o risco de acidentes, pois impede que o operador tenha uma das mãos livre enquanto o sistema está em operação. Eles foram utilizados para garantir que o robô apenas inicie o ciclo de aplicação de cola quando as condições de segurança forem atendidas.

Figura 32 – Botões bimanuais.



Fonte: (Engineering, 2024)

3.3.11 Barreira de Segurança

A barreira de segurança é composta por sensores optoeletrônicos que detectam a presença de pessoas ou objetos em áreas de risco dentro da célula robótica. Este equipamento garante que o sistema seja interrompido automaticamente em caso de invasão da zona de trabalho do robô, prevenindo acidentes e garantindo conformidade com as normas de segurança.

Figura 33 – Barreira de segurança.



Fonte: (AG, 2024a)

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da implementação e análise da automatização da melhoria para a célula robótica, com foco na aplicação alternada de cola em dois produtos. Os resultados foram organizados de forma a demonstrar a viabilidade técnica, os ganhos em eficiência e produtividade, bem como os impactos no layout e na segurança da célula.

4.1 Análise de Produtividade e Impacto das Modificações na Célula de Produção

A produtividade de um sistema produtivo é um dos principais indicadores de desempenho e eficiência operacional. No caso da célula de produção avaliada neste trabalho, as modificações realizadas tiveram como objetivo otimizar o tempo de operação e aumentar a produção horária, garantindo maior eficiência e aproveitamento do ciclo de trabalho do robô industrial.

4.1.1 *Situação Inicial da Célula de Produção*

Antes da modificação, a célula de produção apresentava um ciclo médio de 27,5 segundos por peça, sendo que o robô realizava apenas 10 segundos de operação ativa durante o processo. O restante do ciclo era consumido por movimentações auxiliares, como a troca da peça na estação ou a espera do operador. Dessa forma, a célula estava subutilizando o tempo disponível do robô, resultando em uma produtividade de 130 peças por hora.

Esse valor de produtividade, embora adequado para o processo original, mostrava um potencial significativo de melhoria, especialmente considerando que o robô permanecia em um estado ocioso por uma grande parte do ciclo.

4.1.2 *Modificações Realizadas*

As modificações implementadas incluíram:

Alteração estrutural na célula, permitindo que o robô operasse em dois postos alternados. Ajuste no ciclo operacional, reduzindo os tempos de troca de peças e otimizando o fluxo de movimentação. Com isso, o ciclo médio foi reduzido para 20 segundos, com o robô apresentando apenas 3 segundos de ociosidade. Esse ajuste permitiu que o tempo do ciclo fosse melhor aproveitado, dobrando a capacidade de produção.

4.1.3 Produtividade Após a Modificação

Após as alterações, a célula passou a operar com dois postos de trabalho simultâneos, permitindo a produção de 120 peças por hora em cada posto, totalizando 240 peças por hora. Isso representa um aumento de 84,6% na capacidade produtiva, conforme ilustrado na Tabela 5:

Tabela 5 – Comparativo de indicadores de produtividade entre a célula inicial e a célula modificada

Indicador	Célula Inicial	Célula Modificada	Variação (%)
Ciclo médio (segundos)	27,5	25,0	-9,1
Tempo de operação do robô (s)	10,0	20,0	+100,0
Tempo de ociosidade (s)	17,5	5,0	-71,4
Produção por hora (peças)	130	240	+84,6

Essa melhoria reflete o impacto direto da otimização dos tempos de ciclo e do melhor aproveitamento da capacidade do robô.

4.1.4 Impacto dos Defeitos na Produção

Os produtos com defeito identificados na célula são provenientes de outros setores do processo produtivo. Estima-se que os defeitos representem entre 5 e 10 peças por turno de trabalho. Considerando que um turno compreende 7 horas de produção e 1 hora de intervalo, a produção total em um turno é de 1680 peças (240 peças/hora \times 7 horas).

O impacto dos defeitos pode ser calculado da seguinte forma:

Percentual de defeitos por turno:

$$\text{Percentual de defeitos} = \frac{\text{Quantidade de defeitos}}{\text{Produção total}} \times 100$$

Substituindo os valores, temos:

$$\text{Para 5 defeitos: } \frac{5}{1680} \times 100 = 0,30\%$$

$$\text{Para 10 defeitos: } \frac{10}{1680} \times 100 = 0,60\%$$

Os defeitos representam uma perda relativamente pequena na produção total, variando de 0,30% a 0,60%, o que é um índice aceitável dentro dos padrões industriais, mas que ainda pode ser monitorado para futuras melhorias.

Os resultados demonstram que as modificações na célula de produção foram extremamente eficazes, promovendo:

Redução do ciclo operacional: Menor tempo por ciclo permitiu maior produção no mesmo intervalo de tempo. Aumento da eficiência do robô: A diminuição do tempo de ociosidade do robô evidenciou um melhor aproveitamento do equipamento. Incremento da produtividade: A capacidade produtiva foi quase duplicada, consolidando os ganhos de eficiência. Por outro lado, os produtos defeituosos, embora não sejam oriundos diretamente da célula analisada, representam um ponto de atenção, pois falhas não detectadas podem comprometer o desempenho geral da produção. Implementar um sistema de inspeção mais robusto na célula pode mitigar esse impacto.

4.1.5 Análise dos Indicadores de Desempenho (KPIs)

A análise dos KPIs (Key Performance Indicators) permite avaliar quantitativamente o impacto da modificação da célula industrial no processo produtivo.

4.1.5.1 Ciclo Médio

O ciclo médio foi reduzido de 27,5 segundos na célula inicial para 25,0 segundos na célula modificada, representando uma diminuição de 9,1%. Essa redução é significativa, uma vez que menor ciclo implica maior eficiência no processamento de peças, contribuindo diretamente para o aumento da produtividade da linha.

Essa melhoria foi obtida principalmente devido à reestruturação da célula, que possibilitou ao robô operar em dois postos alternados. Essa configuração reduziu os tempos ociosos e otimizou o fluxo de trabalho.

4.1.5.2 Tempo de Operação do Robô

O tempo de operação do robô aumentou de 10,0 segundos na célula inicial para 20,0 segundos na célula modificada, apresentando um crescimento de 100,0%. Esse aumento reflete a maior utilização do robô no processo produtivo, aproveitando melhor sua capacidade operacional.

Antes, a ociosidade elevada indicava subutilização do equipamento, o que gerava desperdício de potencial produtivo. Agora, com a célula modificada, o robô permanece ativo por mais tempo em atividades produtivas, otimizando o investimento no equipamento.

4.1.5.3 Tempo de Ociosidade

O tempo de ociosidade do robô caiu de 17,5 segundos para 5,0 segundos, uma redução de 71,4%. Essa métrica é fundamental para avaliar a eficiência da célula, indicando que o robô está sendo usado de forma muito mais eficiente. A redução da ociosidade também impacta positivamente na estabilidade do processo e no ritmo de produção.

4.1.5.4 Produção por Hora

A produção por hora passou de 130 peças na célula inicial para 240 peças na célula modificada, um aumento expressivo de 84,6%. Essa elevação é diretamente atribuída à capacidade de produzir peças alternadas em dois postos, permitindo que o processo utilize o tempo de maneira mais eficaz.

A nova configuração trouxe um incremento significativo à capacidade produtiva sem a necessidade de adquirir novos robôs, evidenciando a viabilidade econômica da modificação. Além disso, a redução do ciclo médio e o aumento do tempo de operação do robô foram os principais fatores que impulsionaram essa melhoria.

4.2 Avaliação da Qualidade da Aplicação de Cola

Após a implementação das modificações na célula de robô industrial, um conjunto de inspeções de qualidade foi conduzido para garantir que o processo de aplicação de adesivo hotmelt estivesse operando de acordo com as expectativas. Os principais parâmetros analisados incluíram a regularidade do cordão de cola e a redução de falhas recorrentes, ambos essenciais para garantir a qualidade do produto final e a eficiência da linha de produção.

Outro resultado importante das modificações foi a redução de falhas recorrentes, como a aplicação excessiva ou insuficiente de adesivo. Antes da modificação, essas falhas frequentemente resultavam em produtos com defeitos, afetando tanto a qualidade quanto a produtividade. A implementação desse estudo dos parâmetros de operação da bomba de cola (RPM, temperatura e pressão) resultou em uma significativa redução desses defeitos.

A partir dos dados obtidos através do método Taguchi, foi possível identificar a melhor combinação de parâmetros para a célula de robô, levando em consideração o peso de cola desejado entre 11g e 14g. A combinação de 135°, 10s de tempo e 70 RPM mostrou-se a mais adequada, na Figura 34 temos os seguintes valores observados para as amostras de peso de cola.

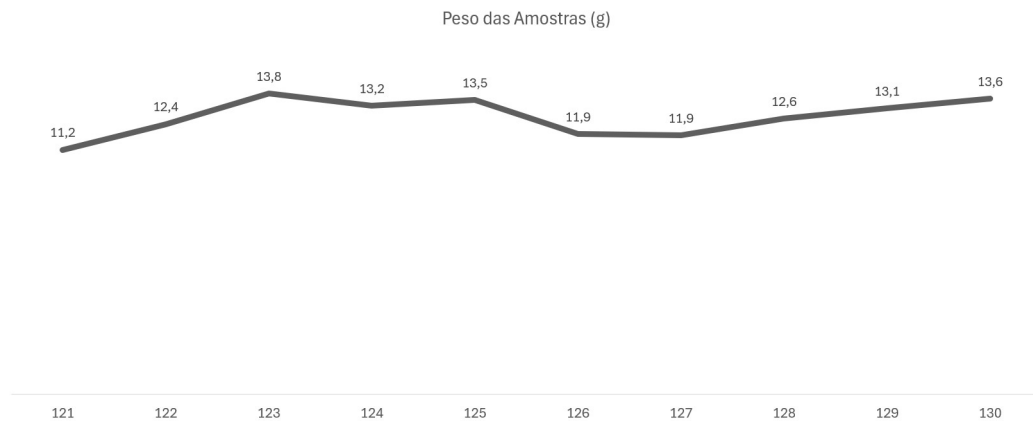
Realizando a análise estatística desses valores, podemos calcular a média, o desvio padrão e o intervalo de variação dos dados:

Média μ : A média dos valores obtidos foi de aproximadamente 12,27g. A média é uma boa representação do peso de cola utilizado nas amostras, refletindo a centralização dos valores em torno de 12g, o que se alinha com o intervalo desejado de 11g a 14g.

Desvio Padrão σ : O desvio padrão dos dados foi de aproximadamente 0,77g. Isso indica que as variações nos pesos das amostras estão dentro de uma faixa razoável de consistência, com uma dispersão moderada em torno da média.

Intervalo de Variação: O valor mínimo observado foi de 11,21g, e o máximo foi de

Figura 34 – Gráfico das amostras da melhor combinação das variáveis.



Fonte: Autor

13,78g, resultando em uma variação de 2,57g. Este intervalo de variação é relativamente pequeno e dentro do esperado para a combinação ideal, garantindo a precisão no controle da quantidade de adesivo aplicado.

4.3 Impacto no Layout e na Estrutura da Célula

A modificação da célula incluiu a instalação de um segundo berço e a realocação do robô ABB IRB 2400, garantindo que os dois operadores pudessem atuar simultaneamente.

Além do layout, a estrutura da célula de produção também passou por modificações que impactaram diretamente a capacidade produtiva e a eficiência operacional. A adição de novos componentes e a modificação dos sistemas de transporte e manuseio de peças permitiram que a célula fosse adaptada para a nova configuração de trabalho, onde a aplicação de cola ocorre em dois postos simultaneamente.

Uma das mudanças mais significativas foi a modificação na estrutura da bancada que suporta as peças durante a aplicação do adesivo. Isso garantiu maior estabilidade e precisão no posicionamento das peças, resultando em uma aplicação de cola mais uniforme e consistente. Além disso, a integração de novos sensores e controles nas máquinas da célula permitiu o monitoramento em tempo real dos parâmetros de operação, como temperatura, pressão e RPM da bomba de cola, o que melhorou ainda mais a qualidade do processo.

Uma das considerações importantes após a modificação na célula de robô industrial é o impacto dos ajustes necessários no percurso dos berços e a troca do tambor de cola. Embora esses processos possam exigir a parada temporária da célula, foi possível minimizar seus efeitos na produção final, graças à melhoria no fluxo de trabalho e ao aumento na quantidade de peças produzidas.

4.3.0.1 Ajustes no Percurso dos Berços

Caso seja necessário ajustar o percurso de um dos berços durante a produção, isso resultará na parada temporária de ambos os postos de aplicação de cola. Esse tipo de ajuste é essencial para garantir que as peças sejam posicionadas corretamente durante a aplicação do adesivo, mas é uma tarefa que pode levar cerca de 1 hora para ser concluída.

Apesar dessa parada, a melhoria no layout da célula e o aumento significativo na capacidade de produção tornam o impacto desses ajustes menos significativo. O aumento de 84,6% na produção por hora garante que, mesmo com a interrupção momentânea para ajustes no percurso, a produção geral durante o turno de trabalho não será seriamente comprometida.

4.3.0.2 Troca do Tambor de Cola

Outro ponto crítico que poderia afetar a continuidade da produção é a troca do tambor de cola, um procedimento que pode levar aproximadamente 45 minutos para ser realizado. Essa troca ocorre quando o volume de adesivo disponível no tambor está prestes a se esgotar, sendo necessário substituí-lo para continuar o processo de aplicação de cola.

Embora a troca do tambor exija uma parada na célula, o aumento na produção por hora contribuem para minimizar os impactos dessa parada na produção final. Com a produção de 240 peças por hora na célula modificada, mesmo com a interrupção para a troca do tambor, o impacto no total de peças produzidas é pequeno, considerando que as perdas de tempo são compensadas pelo ganho de produtividade.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo a automatização de uma célula de robô industrial utilizada na aplicação de cola em peças, focando na redução do ciclo operacional, aumento da produtividade e melhoria na qualidade da aplicação de cola. Após a análise e implementação de ajustes no layout da célula e nos parâmetros de operação, com o auxílio do método Taguchi para otimização, foi possível observar ganhos significativos em termos de eficiência e produção.

Os resultados obtidos indicam uma melhora substancial nos indicadores de desempenho. O ciclo médio da célula foi reduzido de 27,5 segundos para 25 segundos, o que representou uma diminuição de 9,1% no tempo total de ciclo. Além disso, a produção por hora aumentou de 130 peças para 240 peças, um ganho de 84,6%, com a redução da ociosidade do robô, que passou de 17,5 segundos para apenas 5 segundos. Esses ganhos são especialmente relevantes, pois indicam uma melhoria significativa na utilização do tempo de operação e uma maior eficiência no processo de produção.

A implementação das melhorias também contribuiu para a redução de defeitos no processo de aplicação de cola. A inspeção de qualidade, realizada após a modificação da célula, revelou um percentual de defeitos entre 0,30% e 0,60%, dependendo da quantidade de falhas observadas. Esses resultados evidenciam o sucesso das modificações não apenas em termos de produtividade, mas também na qualidade do produto final, com uma maior regularidade no cordão de cola e uma redução das falhas recorrentes.

Além disso, o impacto das paradas para ajustes no percurso dos berços e troca do tambor de cola foi analisado. Embora esses ajustes causem uma interrupção temporária na produção, o aumento significativo na quantidade de peças produzidas garantiu que o impacto na produção final fosse mínimo. Com um tempo de parada estimado em 1 hora para ajustes e 45 minutos para a troca de tambor, a melhoria na produtividade compensou esses tempos de inatividade, permitindo que o processo continuasse sendo eficiente.

Em termos gerais, as modificações na célula de robô resultaram em um grande avanço na eficiência operacional e na qualidade do produto final. O uso do método Taguchi foi fundamental para definir os parâmetros ideais de operação, proporcionando um processo mais estável e com menos variações. Com esses resultados, é possível concluir que as modificações propostas não apenas atenderam às expectativas de aumento de produção, mas também contribuíram para uma maior competitividade da empresa no mercado, oferecendo uma solução mais eficiente e de maior qualidade.

Este trabalho demonstrou a viabilidade da implementação de melhorias contínuas em processos industriais, utilizando uma abordagem sistemática e análise detalhada

dos parâmetros envolvidos. As modificações realizadas são um passo importante para a otimização do processo de produção e podem servir como base para futuras inovações em outras células de robô e sistemas de produção industriais.

REFERÊNCIAS

- ABB. **IRB2400-PR10034EN-Rev.F**. 2019. Manual do robô IRB 2400. Disponível em: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/articulated-robots/irb-2400> Acesso em: [7 dez. 2024]. Citado nas páginas 51 e 68.
- ABB. **IRC5 Overview - Robotics Controllers**. 2024. <<https://new.abb.com/products/robotics/controllers/irc5-overview>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 68.
- ABB. **Produto 3HAC028357-001 - Documentação e Informações Técnicas**. 2024. <<https://new.abb.com/products/3HAC028357-001/3hac028357-001>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 69.
- AG, S. **C4000 ECO - Catálogo Arquivo**. 2024. <<https://www.sick.com/br/en/catalog/archive/c4000-eco/c/g187262>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 72.
- AG, S. **UE43-4AR - Arquivo de Catálogo**. 2024. <<https://www.sick.com/br/pt/catalog/arquivo/ue43-4ar/c/g186170>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 69.
- ALVES, T. dos. Apostila. **Automação Industrial I**. [S.l.]: Escola Superior de Tecnologia de Abrantes, 2005. Citado nas páginas 14, 18, 37 e 39.
- BARROS, G. X. d. S. **Modelagem digital tridimensional para o desenvolvimento de prototipagem rápida: Um enfoque sobre a modelagem orgânica**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Pernambuco, 2012. Citado na página 40.
- BOLTON, W. **Mechatronics: Electronic Control Systems in Mechanical and Electrical Engineering**. Harlow: Pearson Education, 1995. Citado nas páginas 23 e 25.
- Brasil. Ministério do Trabalho e Emprego. **NR-12: Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos**. 2010. Citado na página 38.
- BRITO, G. *et al.* Biopolímeros, polímeros biodegradáveis e polímeros verdes. **Revista eletrônica de materiais e Processos**, v. 6, n. 2, p. 127–139, 2011. Citado nas páginas 42 e 43.
- CAMPBELL, T. *et al.* Could 3d printing change the world. **Technologies, Potential, and Implications of Additive Manufacturing, Atlantic Council, Washington, DC, JSTOR**, v. 3, p. 1–16, 2011. Citado na página 41.
- CARRARA, R. **Robótica industrial: princípios e aplicações**. São Paulo: Editora Fap, 2017. Citado nas páginas 26 e 28.
- CARRARA, V. **Introdução à Robótica Industrial**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2009. Citado na página 23.
- CARRARA, V. **Introdução à Robótica Industrial**. [S. l.]: [s. n.], 2010. Citado nas páginas 24, 25, 26 e 28.
- CARRARA, V. **Introdução à Robótica Industrial**. [S. l.]: [s. n.], 2020. Citado na página 25.

- COSTA, J. **Automação Industrial: Fundamentos e Prática**. São Paulo: Editora Técnica, 2016. Citado nas páginas 36 e 37.
- CRAIG, J. **Introduction to Robotics: Mechanics & Control**. 1. ed. Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Co., 1986. Citado nas páginas 20, 21, 22, 31, 33 e 34.
- CRAIG, J. J. **Introduction to Robotics: Mechanics and Control**. 3. ed. Boston: Pearson, 2005. Citado na página 30.
- CUTKOSKY, M. R. On grasp choice, grasp models, and the design of hands for manufacturing tasks. **IEEE Transactions on Robotics and Automation**, v. 5, n. 3, p. 269–279, 1989. Citado nas páginas 21, 22, 29 e 34.
- DRONGELEN, I. K.-V.; BILDERBEEK, J. **Measuring Business Performance: The Link between Strategy and Results**. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1999. Citado nas páginas 44 e 45.
- ELECTRIC, S. **Disjuntor Easy9 1P 6A 6kA 230V CA Curva C**. 2024. <<https://www.se.com/br/pt/product/EZ9F56106/disjuntor-easy9-1p-6a-6ka-230v-ca-curva-c/>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 70.
- ENGINEERING, B. **Produto 64180 - Sensor Industrial**. 2024. <<https://www.bannerengineering.com/br/pt/products/part.64180.html>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 72.
- FRANCISCO, B. M. Simulação no processo de injeção utilizando o software moldflow. 2016. Citado na página 43.
- FU, K. S.; GONZALES, R. C.; LEE, C. S. G. **Robotics - Control, Sensing, Vision and Intelligence**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Book Inc., 1987. (International Edition). Citado nas páginas 20, 23, 29 e 34.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 5. ed. São Paulo: Atlas, 2008. Citado na página 49.
- GROOVER, M. **Fundamentals of Modern Robotics**. 2. ed. Boston: Pearson, 2014. Citado na página 28.
- GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1988. Citado nas páginas 24 e 25.
- GROOVER, M. P. **Automação industrial e sistemas de manufatura**. [S.l.]: Pearson Education do Brasil, 2011. Citado nas páginas 14, 17, 18, 19 e 39.
- IGOE, T.; MOTA, C. A strategist's guide to digital fabrication. **Strategy+ Business**, v. 4, 2011. Citado na página 39.
- JURAN, J. M.; GODFREY, A. B. **Juran's Quality Handbook**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1998. Citado na página 45.
- KAPLAN, R. S.; NORTON, D. P. **The Balanced Scorecard: Translating Strategy into Action**. Boston: Harvard Business Press, 1992. Citado nas páginas 44 e 45.
- KISSEL, D.; HEß, M. **Handbook of Adhesive Technology**. [S.l.]: CRC Press, 2012. Citado nas páginas 32 e 33.

KUKA. **Tecnologia de robôs industriais: uma visão sobre interação e controle**. 2019. <<https://www.kuka.com>>. Acesso em: 7 dez. 2024. Citado na página 27.

LIMA, A. **Sistemas de Controle e Automação Industrial**. Rio de Janeiro: Editora Industrial, 2017. Citado na página 36.

LIMA, A. F. Estudo da cadeia produtiva do polietileno tereftalato (pet) na região metropolitana de salvador como subsídio para análise do ciclo de vida. **Monografia. Universidade Federal da Bahia-UFBA, Salvador, Brasil**, 2001. Citado na página 43.

LOPES, A. M. **Modelação cinemática e dinâmica de manipuladores de estruturas em série**. Dissertação (Dissertação (Mestrado)) — Universidade do Porto, FEUP, Porto, 2002. Mestrado em automação, instrumentação e controle. Citado na página 21.

MARTINS, G. M. Princípios de automação industrial. **Apostila da disciplina de automação industrial da UFSM, Santa Maria**, 2012. Citado nas páginas 14, 18 e 38.

MCKERROW, P. **Introduction to Robotics: Mechanisms and Control**. 3. ed. Boston: Pearson, 2013. Citado na página 29.

METALTEX. **Botão de Emergência Cogumelo com Trava, 22mm, Vermelho, 2NF**. 2024. <<https://www.metaltex.com.br/produtos/botoes-de-comando/botao-de-emergencia-cogumelo/botao-de-emergencia-cogumelo-com-trava-22mm-vermelho-2nf>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 71.

METALTEX. **Botão Pulsador Faceado Metálico, 22mm, Verde, 1NA**. 2024. <<https://www.metaltex.com.br/produtos/botoes-de-comando/botao-pulsador/botao-pulsador-faceado-metalico-22mm-verde-1na>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 71.

METALTEX. **Chave Seletora Knob Curto, 3 Posições Fixas, 22mm, 2NA**. 2024. <<https://www.metaltex.com.br/produtos/chaves-seletoras/chave-seletora/chave-seletora-knob-curto-3-posicoes-fixas-22mm-2na>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 71.

METALTEX. **Fonte Chaveada 120W, Montagem em Trilho DIN, 90-264V, 24V, 5A**. 2024. <<https://www.metaltex.com.br/produtos/fontes-chaveada/fontes-ac-cc-montagem-din/fonte-chaveada-120w-montagem-em-trilho-din-90-264v-24v-5a>>. Acesso em: 13 dez. 2024. Citado na página 70.

MICHAELS, J.; CARROLL, D. **Adhesive Technologies in Manufacturing**. [S.l.]: Wiley, 2016. Citado na página 34.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 5. ed. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2004. Citado na página 47.

MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. d. L. Engenharia de automação industrial. 2007. 2ª edição. disponível em: file. **C:/Users/Usuario/Downloads/Engenharia% 20de% 20Automacao% 20Industrial**, v. 202, n. 2, p. 0, 2007. Citado nas páginas 14 e 38.

NAIMI, T. **OEE for Production Operators**. [S.l.]: Productivity Press, 2018. Citado na página 46.

- NEVES, L. A. **Indicadores de Desempenho: Diferenciando KPIs de Outras Métricas**. <<https://www.mudancasempresariais.com.br>>. Acesso em: 10 dez. 2014. Citado na página 45.
- OHNO, T. **O Sistema Toyota de Produção: Além da Produção em Larga Escala**. Porto Alegre: Bookman, 1997. Citado na página 18.
- OLIVEIRA, M. R. d. Modelagem 3d e prototipagem rápida aplicada à coordenação de projetos. 2008. Citado na página 40.
- PARMENTER, D. **Key Performance Indicators: Developing, Implementing, and Using Winning KPIs**. 3. ed. [S.l.]: Wiley, 2015. Citado nas páginas 44 e 45.
- PHADKE, M. S. **Quality Engineering Using Robust Design**. [S.l.]: Prentice-Hall, 1989. Citado na página 47.
- RIPPEY, W. G. Network communications for weld cell integration—status of standards development. **Industrial Robot: An International Journal**, Emerald Group Publishing Limited, v. 31, n. 1, p. 64–70, 2004. Citado na página 14.
- ROSS, P. J. **Taguchi Techniques for Quality Engineering: Loss Function, Orthogonal Experiments, Parameter and Tolerance Design**. [S.l.]: McGraw-Hill, 1991. Citado na página 47.
- RUTHERFORD, K.; DAVIES, R. **Advances in Adhesive Bonding of Structural Materials**. [S.l.]: Springer, 2018. Citado nas páginas 33 e 35.
- SCHIAVETTI, F. **Controle de Sistemas Automatizados: Teoria e Aplicação**. São Paulo: Editora Pearson, 2019. Citado nas páginas 36 e 37.
- SCHIAVICCO, L.; SICILIANO, B. **Robotica Industriale - Modellistica e Controllo di Manipolatori**. 1. ed. Milano: McGraw-Hill Inc., 1995. Citado nas páginas 27, 29, 31 e 34.
- SCOPEL, L. M. M. **Automação industrial: uma abordagem técnica e econômica**. [S.l.]: Educs, 1995. Citado na página 19.
- SHARMA, A. **Industrial Robotics: Technology, Programming, and Applications**. New York: McGraw-Hill, 2011. Citado na página 30.
- SICILIANO, B.; KALATA, A.; DELL'UNTO, C. **Introdução à robótica: mecânica e controle**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2016. Citado na página 27.
- SILVA, L. F. M. da; OCHESENIUS, G.; ADAMS, R. D. **Adhesive Joints in Engineering Applications**. [S.l.]: Butterworth-Heinemann, 2011. Citado na página 32.
- SMITH, J.; MARTIN, L.; O'BRIEN, K. **Innovative Adhesive Solutions for Industrial Applications**. [S.l.]: Springer, 2020. Citado nas páginas 32 e 35.
- SMITH, P. **Measuring and Managing Performance in Organizations**. New York: Routledge, 2017. Citado nas páginas 44 e 45.
- SOUZA, E. **Automação e Controle de Sistemas Elétricos Industriais**. Curitiba: Editora FTD, 2015. Citado na página 37.

- SPONG, M.; VIDYASAGAR, M. **Robot Modeling and Control**. New Jersey: Wiley, 2008. Citado na página 28.
- STERNESON, J. U. **Controle Automático de Processos Industriais**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2003. Citado nas páginas 14, 17 e 18.
- VASCONCELLOS, M. A. S.; GARCIA, M. E. **Fundamentos de economia**. [S.l.]: Editora Saraiva, 1998. Citado na página 15.
- VIEIRA, F. F. da S. *et al.* Desvendando o conceito indústria 4.0 e o uso de suas tecnologias. **ITEGAM-JETIA**, v. 5, n. 19, p. 21–28, 2019. Citado nas páginas 15, 19 e 20.
- VOLPATO, N. **Prototipagem rápida: tecnologias e aplicações**. [S.l.]: Editora Blucher, 2007. Citado nas páginas 39 e 40.
- VOLPATO, N. **Manufatura aditiva: tecnologias e aplicações da impressão 3D**. [S.l.]: Editora Blucher, 2021. Citado nas páginas 40, 41 e 43.
- WILTGEN, F. Protótipos e prototipagem rápida aditiva sua importância no auxílio do desenvolvimento científico e tecnológico. In: **Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF), São Carlos-SP**. [S.l.: s.n.], 2019. Citado na página 41.
- WILTGEN, F.; LOPES, M. Manufatura aditiva e subtrativa na construção de moldes mecânicos híbridos para aplicação em manufatura formativa. **RETEC-Revista de Tecnologias**, v. 15, n. 1, p. 45–63, 2022. Citado na página 41.

APÊNDICE A – PROGRAMAS

- **Programa como os lados diferentes**

Proc rSinalizador_LE_LD ()

IF DI10_6 = 1 THEN

TPWrite “Aplicacao de cola LE”;

Reset doBarreira;

MoveJ *, V1000, z50, Bico_cola;

MoveJ *, V300, z50, Bico_cola;

MoveL *, V150, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

WaitTime 0.4;

Set doLiga_Cola;

WaitTime 0.1;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveL *, V80, z1, Bico_cola;

MoveL *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z10, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

```
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z11, Bico_cola;  
WaitTime 0.3;  
Reset doLiga_Cola;  
WaitTime 0.2;  
MoveL *, V300, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ pHome, v400, z5, Bico_cola;  
Set doBarreira;  
PulseDO\PLength:=0.2, DO10_5;
```

```
ENDIF
```

```
IF DI10_7 = 1 THEN
```

```
TPWrite "Aplicacao de cola LD";
```

```
Reset doBarreira;
```

```
MoveJ *, V1000, z50, Bico_cola;  
MoveJ *, V300, z50, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
```

WaitTime 0.4;
Set doLiga_Cola;
WaitTime 0.1;
MoveL *, V60, z1, Bico_cola;
MoveL *, V60, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;
MoveL *, V80, z1, Bico_cola;
MoveL *, V80, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z10, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveL *, V150, z11, Bico_cola;
WaitTime 0.3;

```

Reset doLiga_Cola;

WaitTime 0.2;

MoveL *, V300, z1, Bico_cola;

MoveL *, V500, z1, Bico_cola;

MoveL *, V500, z10, Bico_cola;

MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;

MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;

MoveJ pHome, v400, z5, Bico_cola;

Set doBarreira;

PulseDO\PLength:=0.2, DO10_6;

ENDIF

ENDPROC

```

- **Programa como os lados iguais**

```

Proc rSinalizador_LD ()

IF DI10_6 = 1 THEN

TPWrite "Aplicacao de cola LD";

Reset doBarreira;

MoveJ *, V1000, z50, Bico_cola;

MoveJ *, V300, z50, Bico_cola;

MoveL *, V150, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

WaitTime 0.4;

Set doLiga_Cola;

WaitTime 0.1;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

```

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;
MoveL *, V80, z1, Bico_cola;
MoveL *, V80, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z10, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;
MoveL *, V150, z11, Bico_cola;
WaitTime 0.3;
Reset doLiga_Cola;
WaitTime 0.2;
MoveL *, V300, z1, Bico_cola;
MoveL *, V500, z1, Bico_cola;
MoveL *, V500, z10, Bico_cola;

```
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ pHome, v400, z5, Bico_cola;  
Set doBarreira;  
PulseDO\PLength:=0.2, DO10_5;
```

```
ENDIF
```

```
IF DI10_7 = 1 THEN
```

```
TPWrite "Aplicacao de cola LD";
```

```
Reset doBarreira;
```

```
MoveJ *, V1000, z50, Bico_cola;  
MoveJ *, V300, z50, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;  
WaitTime 0.4;  
Set doLiga_Cola;  
WaitTime 0.1;  
MoveL *, V60, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V60, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V80, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V80, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z10, Bico_cola;  
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;
```

```
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z11, Bico_cola;  
WaitTime 0.3;  
Reset doLiga_Cola;  
WaitTime 0.2;  
MoveL *, V300, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ pHome, v400, z5, Bico_cola;  
Set doBarreira;  
PulseDO\PLength:=0.2, DO10_6;
```

```
ENDIF
```

```
ENDPROC
```

- **Programa como os lados iguais**

Proc rSinalizador_LE ()

IF DI10_6 = 1 THEN

TPWrite “Aplicacao de cola LE”;

Reset doBarreira;

MoveJ *, V1000, z50, Bico_cola;

MoveJ *, V300, z50, Bico_cola;

MoveL *, V150, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

WaitTime 0.4;

Set doLiga_Cola;

WaitTime 0.1;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveL *, V80, z1, Bico_cola;

MoveL *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z10, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V150, z1, Bico_cola;

```
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;  
MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z11, Bico_cola;  
WaitTime 0.3;  
Reset doLiga_Cola;  
WaitTime 0.2;  
MoveL *, V300, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ pHome, v400, z5, Bico_cola;  
Set doBarreira;  
PulseDO\PLength:=0.2, DO10_5;
```

```
ENDIF
```

```
IF DI10_7 = 1 THEN
```

```
TPWrite "Aplicacao de cola LE";
```

```
Reset doBarreira;
```

```
MoveJ *, V1000, z50, Bico_cola;  
MoveJ *, V300, z50, Bico_cola;  
MoveL *, V150, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V100, z1, Bico_cola;  
WaitTime 0.4;  
Set doLiga_Cola;
```

WaitTime 0.1;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

MoveL *, V60, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V80, z1, Bico_cola;

MoveL *, V80, z1, Bico_cola;

MoveL *, V80, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z10, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V100, z1, Bico_cola;

MoveL *, V150, z1, Bico_cola;

MoveL *, V150, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;

MoveL *, V100, z1, Bico_cola;

MoveC *, *, V150, z1, Bico_cola;

MoveL *, V150, z11, Bico_cola;

WaitTime 0.3;

Reset doLiga_Cola;

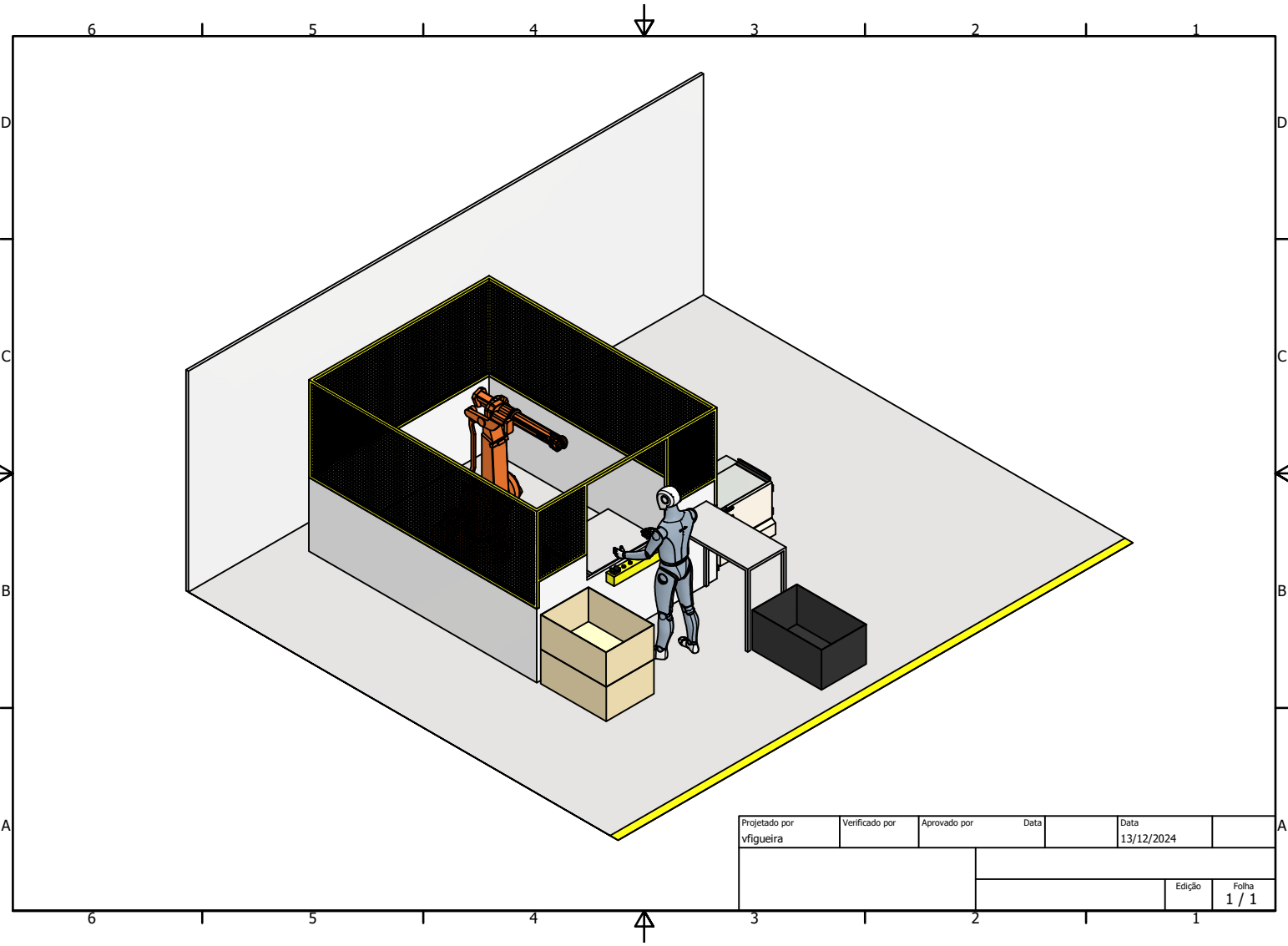
WaitTime 0.2;

```
MoveL *, V300, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z1, Bico_cola;  
MoveL *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ *, V500, z10, Bico_cola;  
MoveJ pHome, v400, z5, Bico_cola;  
Set doBarreira;  
PulseDO\PLength:=0.2, DO10_6;
```

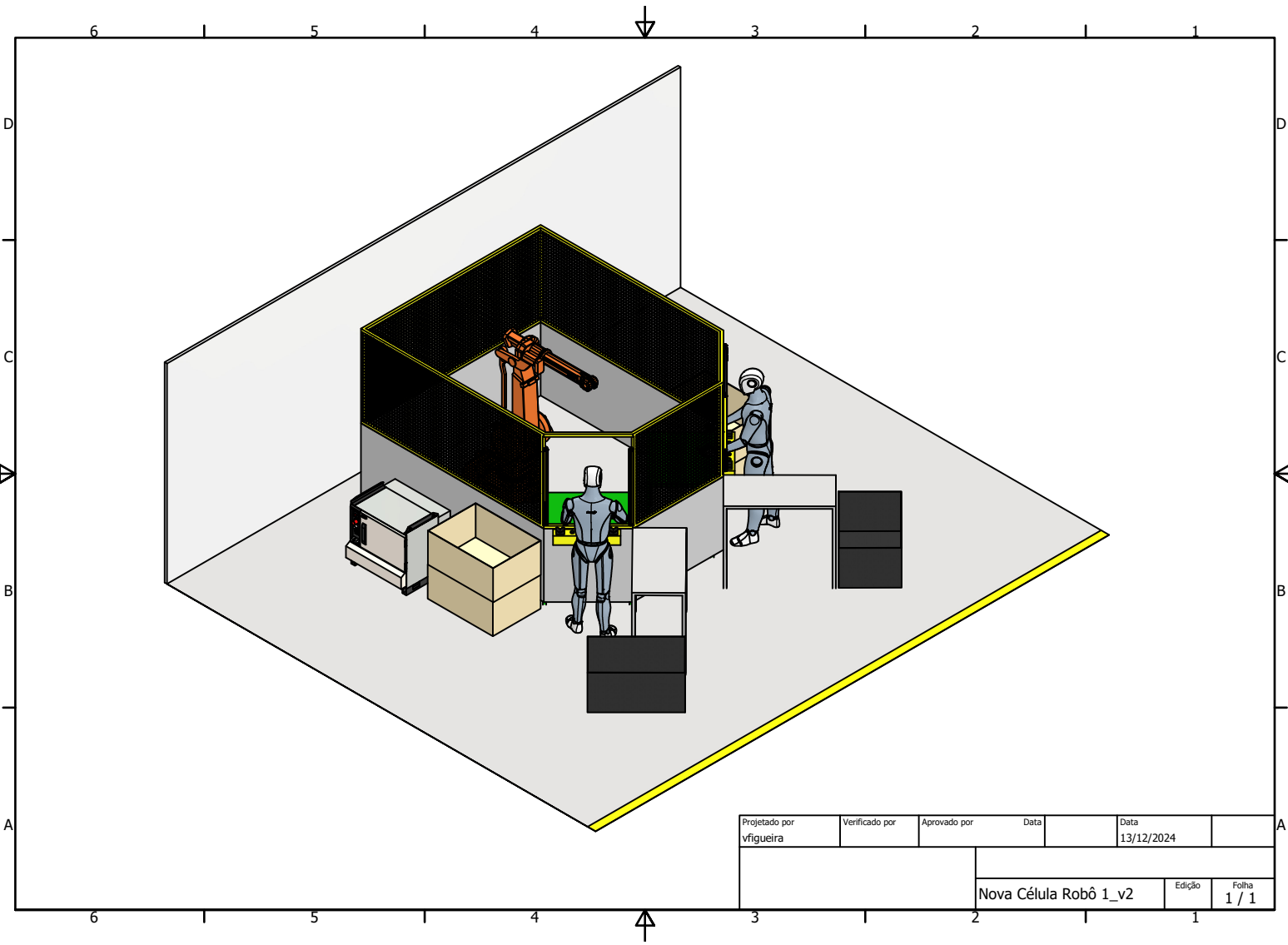
```
ENDIF
```

```
ENDPROC
```

APÊNDICE B – MODELAGEM



Projetado por vfigueira	Verificado por	Aprovado por	Data	Data 13/12/2024
			Edição	Folha 1 / 1



Projetado por vfigueira	Verificado por	Aprovado por	Data	Data 13/12/2024
			Nova Célula Robô 1_v2	
			Edição	Folha 1 / 1