

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

Pedro Henrique da Luz Silva

**PROJETO DE AUTOMAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM CARRO DE
TRANSFERÊNCIA USANDO FACTORY I/O**

Betim
2026

PEDRO HENRIQUE DA LUZ SILVA

PROJETO DE AUTOMAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM CARRO DE TRANSFERÊNCIA USANDO FACTORY I/O

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

Orientador: Profa. Ma. Deliene Costa Guimarães Barros

Betim
2026

FICHA CATALOGRÁFICA

S586p Silva, Pedro Henrique da Luz

Projeto de automação e simulação de um carro de transferência usando Factory I/O / Pedro Henrique da Luz Silva. – 2026.

68 f. : il.

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

Orientação: Prof. Ma. Deliene Costa Guimarães Barros

1. Simulação 3D. 2. Controladores programáveis. 3. Sistemas embarcados. 4. Automação automotiva. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Silva, Pedro Henrique da Luz. II. Título.

CDU: 681.5



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos **08** dias do mês de **julho** do ano de **2026** às dezessete horas, nas dependências do IFMG – Campus Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Deliene Costa Guimarães Barros e demais membros, Arthur Hermano Rezende Rosa e Marcus Paulo Silva de Abreu . Nesta ocasião o discente **Pedro Henrique da Luz da Silva** do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, com registro acadêmico de número 0065134 do IFMG – Campus Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado **“PROJETO DE AUTOMAÇÃO E SIMULAÇÃO DE UM CARRO DE TRANSFERÊNCIA USANDO FACTORY I/O”** e foi APROVADO, com 90 (noventa) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e sua orientadora no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 10 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezoito horas. Para constar, eu, Deliene Costa Guimarães Barros, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 08 de julho de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Deliene Costa Guimaraes Barros, Testemunha**, em 10/07/2026, às 09:46, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Marcus Paulo Silva de Abreu, Testemunha**, em 10/07/2026, às 13:30, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Hermano Rezende Rosa, Professor**, em 10/07/2026, às 18:03, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2801688** e o código CRC **5126DD3F**.

23792.000831/2026-55	2801688v1
----------------------	-----------

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me conceder força e sabedoria ao longo dessa jornada, que não foi fácil.

À minha família, pelo apoio incondicional, incentivo constante e compreensão nos momentos de ausência, excepcionalmente minha noiva que me apoiou em todo esse tempo.

Aos professores e orientadores, pelo compartilhamento do conhecimento, pelas orientações técnicas e pelos ensinamentos que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho.

Aos colegas de curso, pela troca de experiências e pelo companheirismo ao longo da caminhada acadêmica.

E a todos que, de alguma forma, colaboraram para que este projeto se tornasse possível. Meu sincero agradecimento.

“Automação não elimina empregos, ela transforma funções e liberta o potencial humano.” — Bill Gates

RESUMO

A movimentação interna de materiais representa uma atividade crítica em diversos segmentos industriais, impactando diretamente a produtividade, a segurança operacional e a eficiência dos processos produtivos. Nesse contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um projeto conceitual de um carro de transferência automatizado com inteligência embarcada, destinado à automação das etapas de deslocamento e posicionamento de cargas em ambientes industriais.

A solução proposta integra tecnologias consolidadas da automação industrial, incluindo Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), sensores indutivos, sensores de distância a laser, scanners laser de segurança, Interfaces Homem-Máquina (IHMs) e comunicação industrial via protocolo Modbus TCP/IP. O desenvolvimento contemplou o levantamento de requisitos técnicos e normativos, a definição da arquitetura de controle, a seleção dos componentes e a validação funcional do sistema em ambiente virtual.

A validação foi realizada por meio da integração entre o ambiente de desenvolvimento CODESYS V3.5 e o software Factory I/O, permitindo a simulação das rotinas de movimentação, posicionamento, classificação e armazenamento de materiais. Os resultados demonstraram o correto funcionamento das estratégias de controle implementadas, evidenciando posicionamento preciso, repetibilidade operacional, comunicação estável entre os sistemas e atuação adequada das funções de segurança previstas no projeto.

Conclui-se que a arquitetura proposta apresenta viabilidade técnica para aplicação em ambientes industriais, contribuindo para a redução de riscos operacionais, aumento da confiabilidade do processo e alinhamento aos conceitos da Indústria 4.0. Além disso, o projeto estabelece uma base sólida para futuras implementações físicas e evoluções em direção a sistemas de movimentação totalmente autônomos.

Palavras-chave: Automação industrial; Carro de transferência; Inteligência embarcada; CODESYS; Factory I/O; Segurança de máquinas; Modbus TCP/IP.

Palavras-chave: Automação industrial; Carro automatizado; CLP; Segurança de máquinas; Scanner laser; Sensores..

ABSTRACT

Internal material handling is a critical activity in several industrial sectors, directly impacting productivity, operational safety, and process efficiency. In this context, this work presents the development of a conceptual design for an automated transfer cart with embedded intelligence, intended to automate the displacement and positioning of loads in industrial environments.

The proposed solution integrates established industrial automation technologies, including Programmable Logic Controllers (PLCs), inductive sensors, laser distance sensors, safety laser scanners, Human-Machine Interfaces (HMIs), and industrial communication through the Modbus TCP/IP protocol. The development process included technical and regulatory requirement analysis, control architecture definition, component selection, and functional validation in a virtual environment.

The validation was carried out through the integration of the CODESYS V3.5 development environment with the Factory I/O simulation platform, enabling the simulation of material movement, positioning, classification, and storage routines. The results demonstrated the correct operation of the implemented control strategies, providing accurate positioning, operational repeatability, stable communication between systems, and proper performance of the safety functions defined in the project.

The results indicate that the proposed architecture is technically feasible for industrial applications, contributing to reduced operational risks, increased process reliability, and alignment with Industry 4.0 principles. Furthermore, the project establishes a solid foundation for future physical implementation and evolution toward fully autonomous material handling systems.

Keywords: Industrial Automation; Transfer Cart; Embedded Intelligence; PLC; CODESYS; Factory I/O; Machine Safety; Modbus TCP/IP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ciclo de varredura do CLP.	19
Figura 2 – Ilustração de um diagrama de Ladder.	20
Figura 3 – Contato normalmente aberto.	20
Figura 4 – Contato normalmente fechado.	21
Figura 5 – Contato tipo P.	21
Figura 6 – Contato tipo N.	21
Figura 7 – Bobina Simples.	22
Figura 8 – Bobina Set.	22
Figura 9 – Bobina Reset.	22
Figura 10 – Temporizador TON.	22
Figura 11 – Temporizador TOF.	23
Figura 12 – Temporizador TP.	23
Figura 13 – Função MOVE.	23
Figura 14 – Função F-TRIG.	24
Figura 15 – Contador CTU.	24
Figura 16 – Função ADD.	24
Figura 17 – Projeto.	29
Figura 18 – Funcionamento.	30
Figura 19 – Carregamento.	32
Figura 20 – DL100 - Sensor de distância a laser.	34
Figura 21 – Sensor indutivo.	35
Figura 22 – Scanners Laser de Segurança – NanoScan3.	36
Figura 23 – Sistema de segurança.	37
Figura 24 – Configuração do Modbus TCP Slave no CODESYS.	38
Figura 25 – Status da comunicação Modbus TCP/IP entre CODESYS e Factory I/O.	38
Figura 26 – Configuração do driver Modbus TCP/IP Server no Factory I/O..	39
Figura 27 – Visão geral da planta no Factory I/O — ambiente de simulação.	40
Figura 28 – Entradas Digitais CODESYS.	42
Figura 29 – Saídas Digitais CODESYS.	44
Figura 30 – Driver Factory IO.	45
Figura 31 – Sistema automatizado de separação de matéria-prima no Factory I/O.	47
Figura 32 – Centro de usinagem com robôs industriais simulado no Factory I/O.	47
Figura 33 – Sistema de armazenamento automatizado com transelevador simulado no Factory I/O.	48
Figura 34 – Paleta posicionado para coleta do carro tranferencia no Factory I/O.	49
Figura 35 – Movimentação do paleta durante o trajeto do carro no Factory I/O.	49
Figura 36 – Paleta posicionado no destino ao final do ciclo de transferência no Factory I/O.	50

Figura 37 – Rung 1 a 3: inicialização, habilitação do sistema e controle da sinalização luminosa.	51
Figura 38 – Rung 4 a 6: seleção de modo automático/manual e acionamento das esteiras de entrada.	52
Figura 39 – Rung 7 a 9: controle das garras, contador de ciclos e definição da posição de destino.	53
Figura 40 – Rung 10 a 11: movimentação horizontal, posicionamento final e retorno ao estado inicial.	54
Figura 41 – Rungs 1 a 3 — Controle do centro de usinagem de tampas: acionamento, temporização de saída e contagem de produção.	55
Figura 42 – Rungs 4 a 6 — Controle do centro de usinagem de bases: acionamento, temporização de saída e contagem de produção.	56
Figura 43 – Rungs 1 a 3 — Inicialização, habilitação do sistema e temporização da sinalização de parada — Separador.	57
Figura 44 – Rungs 4 a 7 — Seleção de modo de operação, leitura do sensor de visão e classificação para a via 1 — Separador.	58
Figura 45 – Rungs 8 a 11 — Classificação para as vias 2 e 3, avanço após classificação e desligamento da esteira de entrada — Separador.	59
Figura 46 – Rungs 12 a 15 — Desligamento dos classificadores por via e retorno ao estado inicial — Separador.	60
Figura 47 – Rungs 16 a 18 — Contagem de produtos separados por via — Separador. . .	61
Figura 48 – Repositório arquivos da simulação.	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Mapeamento das entradas digitais e analógica — CODESYS / Factory I/O. .	41
Tabela 2	– Mapeamento das saídas digitais e analógicas — CODESYS / Factory I/O. .	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
ISO	Organização Internacional de Padronização
IFMG	Instituto Federal de Minas Gerais
IEC	International Electrotechnical Commission (Comissão Eletrotécnica Internacional)
AGV	Automated Guided Vehicles ou Veículos Guiados Automaticamente

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivo	14
1.1.1	<i>Objetivo específico</i>	15
1.2	Justificativa	15
1.3	Organização do texto	16
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Automação industrial e indústria 4.0	18
2.2	Controladores lógicos programáveis(CLPs)	18
2.2.1	<i>Linguagem de programação ladder</i>	19
2.2.2	<i>Conceito básicos de diagrama ladder</i>	19
2.2.3	<i>Elementos básicos de um diagrama ladder</i>	20
2.3	Ambiente de engenharia codesys	25
2.4	Validação virtual de sistemas de automação via factory I/O e modbus TCP/IP	25
2.5	Veículos guiados automatizados (AGV)	26
2.6	Sensores e controle de navegação	26
2.7	Segurança em sistemas sutomatizados	27
2.8	Aplicações práticas e tecnologias emergentes	27
3	METODOLOGIA	29
3.1	Procedimento de transferência	29
3.2	Definição do trajeto	30
3.3	Movimentação e controle de velocidade	31
3.4	Carregamento	31
3.5	Movimentação e controle de velocidade até o destino	32
3.6	Descarga do carro	33
3.7	Sensoriamento e infraestrutura	33
3.7.1	<i>Dispositivos de sensoriamento do sistema</i>	34
3.7.2	<i>Sensor de distância a laser – DL100</i>	34
3.7.3	<i>Sensor indutivo de posição</i>	35

3.7.4	<i>Sensor indutivo de carro carregado</i>	35
3.7.5	<i>Sensores indutivos do sistema de rosca sem fim</i>	35
3.7.6	<i>Scanners laser de segurança – NanoScan3</i>	35
3.7.7	<i>Interface homem-máquina (IHM)</i>	36
3.7.8	<i>Sistema de segurança</i>	37
3.7.9	<i>Comunicação entre as ferramentas utilizadas</i>	38
4	RESULTADOS	40
4.1	Descrição do funcionamento da planta simulada	46
4.1.1	<i>Primeira etapa - Separador</i>	46
4.1.2	<i>Segunda etapa - Centro de usinagem</i>	47
4.1.3	<i>Terceira etapa - Sistema de armazenamento</i>	48
4.2	Lógica ladder do projeto	50
4.2.1	<i>Sistema de armazenamento</i>	50
4.2.2	<i>Centro de usinagem</i>	54
4.2.3	<i>Separador de matéria-prima</i>	56
4.3	Discussão dos resultados	61
5	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	63
	REFERÊNCIAS	64
	ANEXO A – QR CODE - ARQUIVOS DA SIMULAÇÃO GITHUB	66

1 INTRODUÇÃO

A crescente competitividade do setor industrial tem impulsionado a adoção de soluções tecnológicas capazes de aumentar a eficiência operacional, a produtividade e a segurança dos processos produtivos. Nesse contexto, a automação industrial assume papel estratégico, especialmente em atividades relacionadas à movimentação interna de materiais, tradicionalmente associadas a elevados índices de esforço físico, exposição a riscos ocupacionais e perdas de eficiência decorrentes da variabilidade operacional.

Em diversos segmentos industriais, como os setores siderúrgico, cerâmico e refratário, a utilização de carros de transferência — comumente conhecidos como carros queima — é prática recorrente. Quando operados de forma manual, esses equipamentos tornam-se potenciais fontes de acidentes, além de contribuírem para o aumento do tempo de ciclo e para a dependência excessiva da atuação humana. Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de soluções automatizadas que promovam a padronização do processo e a mitigação de riscos.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um projeto conceitual de um carro de transferência automatizado com inteligência embarcada, destinado à aplicação em ambientes industriais que demandam elevados níveis de eficiência e segurança na movimentação de materiais. A proposta fundamenta-se na integração de tecnologias consolidadas de automação industrial, tais como controladores lógicos programáveis (CLPs), sensores indutivos, scanners laser de segurança e interfaces homem-máquina (IHMs). Esses elementos atuam de forma integrada, permitindo ao sistema monitorar o ambiente de operação, identificar obstáculos, executar rotinas previamente programadas e responder de maneira segura a situações anormais.

O desenvolvimento do projeto é orientado pelo atendimento rigoroso às normas técnicas reconhecidas internacionalmente, com destaque para a IEC 61496-1, que trata dos equipamentos de proteção eletrossensíveis, e a ABNT NBR ISO 12100, que estabelece os princípios para apreciação e redução de riscos em máquinas. A metodologia adotada contempla o levantamento de requisitos técnicos e normativos, a elaboração do projeto conceitual, a seleção criteriosa de componentes, a modelagem do sistema de controle e a validação da arquitetura proposta por meio de simulações em ambiente virtual.

Como resultados esperados, destacam-se a redução do tempo de ciclo operacional, o aumento da confiabilidade do processo e a diminuição dos riscos à integridade física dos operadores. Além disso, o projeto apresenta caráter modular e replicável, possibilitando sua adaptação a diferentes contextos industriais e servindo como base para futuras evoluções em direção a sistemas totalmente autônomos, alinhados aos conceitos da Indústria 4.0.

1.1 Objetivo

Desenvolver um projeto conceitual de um carro de transferência automatizado com inteligência embarcada, integrando sistemas de sensoriamento, controle e segurança, visando

otimizar a movimentação interna de materiais em ambientes industriais com maior eficiência operacional e redução de riscos ocupacionais, em conformidade com normas técnicas nacionais e internacionais.

1.1.1 *Objetivo específico*

- Levantamento de requisitos técnicos e normativos: análise das características operacionais do sistema e das normas aplicáveis, com ênfase na ABNT NBR ISO 12100 e IEC 61496-1.
- Seleção de componentes: escolha criteriosa de CLPs, sensores, scanners laser e IHMs, considerando desempenho, compatibilidade e viabilidade econômica.
- Modelagem e validação do sistema de controle: desenvolvimento da lógica de controle e validação por meio de simulações computacionais, analisando comportamento e robustez da arquitetura proposta.
- Garantia da segurança operacional: aplicação das normas IEC 61496-1 e ABNT NBR ISO 12100 para identificação de riscos e implementação de medidas de proteção ao longo do ciclo de vida do sistema.
- Documentação técnica: registro sistemático de todas as etapas do projeto, incluindo diagramas, especificações, relatórios de simulação e análises de risco.

1.2 Justificativa

A crescente complexidade dos processos industriais, aliada à necessidade de aumento contínuo da produtividade e da segurança operacional, tem impulsionado a adoção de soluções baseadas em automação e inteligência embarcada. Nesse contexto, a movimentação interna de materiais destaca-se como uma atividade crítica, pois influencia diretamente o tempo de ciclo, a confiabilidade do processo e a integridade física dos operadores. Quando realizada de forma manual, essa atividade está sujeita a falhas humanas, variações operacionais e riscos significativos de acidentes, além de limitar a padronização e a rastreabilidade do processo produtivo.

A aplicação de carros de transferência em ambientes industriais, especialmente nos setores siderúrgico e cerâmico, é amplamente difundida. Contudo, a operação manual desses equipamentos impõe desafios relacionados à ergonomia, à segurança e à eficiência operacional. A automação desse tipo de sistema surge, portanto, como uma alternativa estratégica para mitigar riscos ocupacionais, reduzir a dependência da intervenção humana e promover maior previsibilidade e controle das operações. Ao incorporar inteligência embarcada, o carro de transferência passa a atuar de forma semiautônoma, com capacidade de perceber o ambiente, reagir a eventos inesperados e executar rotinas de movimentação de maneira segura e confiável.

Do ponto de vista técnico, a justificativa do projeto fundamenta-se na integração de tecnologias consolidadas da automação industrial, como controladores lógicos programáveis, sensores inteligentes, scanners a laser de segurança e interfaces homem-máquina. A utilização desses recursos possibilita o desenvolvimento de um sistema robusto, capaz de atender às exigências operacionais e às restrições impostas por ambientes industriais severos. Além disso, a adoção de normas técnicas reconhecidas internacionalmente, como a ABNT NBR ISO 12100 e a IEC 61496-1, assegura que o projeto esteja alinhado às melhores práticas de engenharia de segurança de máquinas, desde a fase conceitual até uma futura (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013; International Electrotechnical Commission, 2020).

Sob a perspectiva acadêmica, o trabalho apresenta relevância ao consolidar conceitos teóricos de automação, controle e segurança de máquinas em uma aplicação prática e contextualizada. A fundamentação em normas técnicas, manuais de fabricantes e estudos anteriores sobre veículos autoguiados permite não apenas validar a viabilidade da solução proposta, mas também contribuir para a formação técnica e científica na área de automação industrial. O projeto estabelece uma base conceitual que pode ser utilizada como referência para estudos futuros, protótipos experimentais ou aplicações industriais mais avançadas.

Adicionalmente, a justificativa econômica do projeto está relacionada ao potencial de redução de custos operacionais e de riscos financeiros associados a acidentes de trabalho e retrabalhos. A automação da movimentação de materiais tende a reduzir paradas não programadas, aumentar a vida útil dos equipamentos e melhorar a eficiência global do processo produtivo. A característica modular e replicável da solução proposta amplia seu campo de aplicação, permitindo adaptações para diferentes setores industriais e escalabilidade conforme as necessidades da planta.

Dessa forma, o desenvolvimento de um carro de transferência automatizado com inteligência embarcada justifica-se não apenas como uma solução tecnológica para um problema operacional recorrente, mas também como uma contribuição relevante para a indústria e para o meio acadêmico, ao aliar segurança, eficiência e inovação em um sistema alinhado às demandas atuais da Indústria 4.0 e dos ecossistemas de gêmeos digitais (KRITZINGER *et al.*, 2018).

1.3 Organização do texto

Este trabalho está organizado da seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta a introdução, contextualizando o problema abordado, os objetivos geral e específicos do projeto, bem como a justificativa para o desenvolvimento de um carro de transferência automatizado com inteligência embarcada.

O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, abordando os principais conceitos relacionados à automação industrial e Indústria 4.0, controladores lógicos programáveis, o ambiente de engenharia CODESYS baseado na norma IEC 61131-3, veículos guiados automatizados (AGV), sensores e controle de navegação, segurança em sistemas automatizados e a fundamentação sobre

comissionamento virtual e gêmeos digitais.

O Capítulo 3 descreve a metodologia adotada no desenvolvimento do projeto, detalhando o procedimento de transferência, a definição do trajeto, o controle de velocidade, as etapas de carregamento e descarga, os dispositivos de sensoramento utilizados e o sistema de segurança implementado.

O Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos por meio da simulação do sistema de controle no ambiente CODESYS V3.5, com comunicação via protocolo Modbus TCP/IP integrada ao software Factory I/O, incluindo a análise das respostas dinâmicas e a lógica de controle desenvolvida em linguagem Ladder.

Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões do trabalho, destacando os principais resultados alcançados, as publicações originadas e as propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Groover (2008) "A automação industrial tem sido um dos pilares da modernização dos processos produtivos ao longo das últimas décadas, visando ganhos de eficiência, qualidade, redução de erros e maior segurança operacional." A automação se caracteriza pela utilização de sistemas, sensores, atuadores e controladores capazes de executar tarefas sem intervenção humana direta, o que resulta em processos mais estáveis e confiáveis.

2.1 Automação industrial e indústria 4.0

A literatura técnica define automação industrial como a aplicação de tecnologia para realizar tarefas repetitivas, críticas ou perigosas com mínima intervenção humana, aumentando a produtividade e reduzindo riscos de falhas operacionais. Esse conceito evoluiu de simples mecanismos eletromecânicos para sistemas avançados integrados com tecnologias digitais (GROOVER, 2008).

Dentro do contexto da Indústria 4.0, os sistemas automatizados ganham relevância ainda maior. Tecnologias como Internet das Coisas (IoT), comunicação em tempo real e inteligência embarcada permitem que máquinas comuniquem estados, tomem decisões autônomas e adaptem seu comportamento conforme as demandas do ambiente fabril. (BUER; STRANDHAGEN; CHAN, 2021)

2.2 Controladores lógicos programáveis (CLPs)

Os controladores lógicos programáveis (CLPs) constituem o elemento central dos sistemas de automação industrial, sendo amplamente utilizados devido à sua robustez, confiabilidade e flexibilidade de aplicação. Projetados para operar em ambientes industriais severos, os CLPs são capazes de executar lógicas de controle complexas, realizar o gerenciamento de entradas e saídas, comunicar-se com dispositivos de campo e integrar funções de segurança (GROOVER, 2008). A utilização de CLPs contribui para a padronização dos processos produtivos e para a redução de falhas operacionais, uma vez que esses dispositivos permitem o controle preciso de variáveis como velocidade, posição e estados de operação (Siemens, 2023). Em sistemas de movimentação automatizados, os CLPs desempenham papel fundamental na implementação das rotinas de deslocamento, intertravamentos, diagnósticos e estratégias de parada segura, garantindo a confiabilidade e a segurança do sistema.

A figura 1 demonstra, graficamente, o ciclo de varredura realizado em um CLP. Após a inicialização, o Controlador Lógico Programável (CLP) inicia sua operação realizando a leitura e armazenamento dos valores lógicos das variáveis de entrada provenientes dos sensores. Em seguida, o código de controle é executado, utilizando os valores de entrada armazenados para determinar os valores das variáveis de saída. Nesse estágio, também são considerados os valores de

outras variáveis utilizadas no projeto, como contadores, temporizadores e variáveis de memória.

Figura 1 – Ciclo de varredura do CLP.



Fonte:(MATEUS, 2022).

2.2.1 *Linguagem de programação ladder*

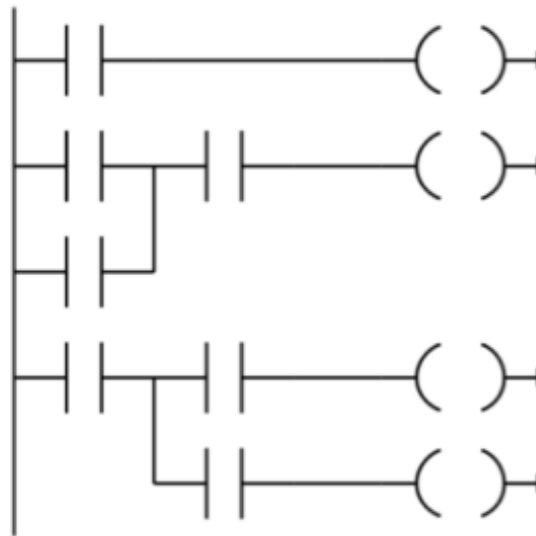
A linguagem Ladder, abreviada como LD (do inglês "Ladder Diagram"), é uma das linguagens de programação utilizadas em Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Ela é uma das cinco linguagens de programação de CLP definidas pela norma IEC (International Electrotechnical Commission, 2013), que estabelece padrões para a programação de sistemas de controle industrial

2.2.2 *Conceito básicos de diagrama ladder*

O diagrama Ladder opera essencialmente transmitindo um sinal em uma rede energizada, passando por contatos e energizando bobinas, que são capazes de gerar respostas. Seu layout segue um modelo de representação em que, alinhada à esquerda, é criada uma linha vertical da qual partem barras horizontais em direção à direita. Essas barras horizontais são responsáveis por energizar as bobinas por meio dos contatos, os quais determinam as condições para o acionamento das bobinas. Como citado no texto acima a Figura 2 ilustra o diagrama do Ladder Silva (2024).

O código Ladder segue uma ordem de prioridades, de cima para baixo e da esquerda para a direita, e seu ciclo é encerrado quando todas as barras horizontais, são concluídas. Os eventos

Figura 2 – Ilustração de um diagrama de Ladder.



Fonte:(MATEUS, 2022).

do sistema, identificados por sensores, botões ou interruptores, acionam contatos que, por sua vez, podem ativar bobinas. Isso resulta no envio de sinais lógicos para dispositivos externos específicos, indicando o estado de operação desses dispositivos (MATEUS, 2022).

2.2.3 Elementos básicos de um diagrama ladder

Os elementos citados e explorados no trabalho são eles: Contatos, bobinas, comparadores, temporizadores, movedores e executores.

Contato

- Normalmente aberto (NA): Apresentam nível lógico 0, mas quando tem sua entrada elevada para 1 vai para o nível lógico 1 na sua saída, sua representação está na Figura 3 (MATEUS, 2022).

Figura 3 – Contato normalmente aberto.



Fonte:(MATEUS, 2022).

- Normalmente fechado (NF): Apresentam nível lógico 1, mas quando tem sua entrada elevada para 1 vai para o nível lógico 0 na sua saída, sua representação está na Figura 4 (MATEUS, 2022).

Figura 4 – Contato normalmente fechado.



Fonte:(MATEUS, 2022).

- Tipo P: São usados para detectar borda de subida do sinal de entrada, isso é, quando o seu nível lógico de entrada apresenta uma mudança nível lógico de 0 para 1, seu nível lógico de saída vai para 1, sua representação está na Figura 5 (MATEUS, 2022).

Figura 5 – Contato tipo P.



Fonte:(MATEUS, 2022).

- Tipo N: São usados para detectar borda de descida do sinal de entrada, isso é, quando o seu nível lógico de entrada apresenta uma mudança nível lógico de 1 para 0, seu nível lógico de saída vai para 1, sua representação está na Figura 6 (MATEUS, 2022).

Figura 6 – Contato tipo N.



Fonte:(MATEUS, 2022).

Bobinas

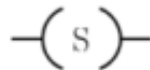
- Simples: Quando energizada, possui seu nível lógico 1. Sua representação está na Figura 7(MATEUS, 2022).
- Set: Semelhante a bobina simples, mas seu nível lógico não volta para 0 quando desenergizada, só vai para 0 quando sua saída muda para uma bobina Reset, sua representação está na Figura 8 (MATEUS, 2022).
- Bobina Reset: Coloca a saída nível lógico 0, sua representação está na Figura 9 (MATEUS, 2022).

Figura 7 – Bobina Simples.



Fonte:(MATEUS, 2022).

Figura 8 – Bobina Set.



Fonte:(MATEUS, 2022).

Figura 9 – Bobina Reset.

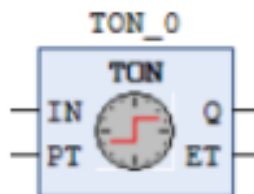


Fonte:(MATEUS, 2022).

Temporizador

- Ton: O bloco temporizador TON, adiciona um atraso previamente definido à instrução que os precede, operando através do adiamento na transmissão de informações para frente. Sua representação está na Figura 10 (MATEUS, 2022).

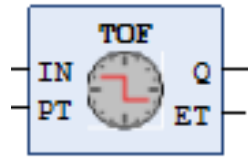
Figura 10 – Temporizador TON.



Fonte:(3S-Smart Software Solutions, 2023).

- TOF: O bloco temporizador TOF adiciona um atraso previamente definido ao desligamento da instrução que o precede, operando através do adiamento da interrupção da transmissão de informações para frente. Enquanto a entrada permanece ativa, a saída permanece ligada; após a desativação da entrada, a saída só será desligada ao término do tempo programado. Sua representação está na Figura 11

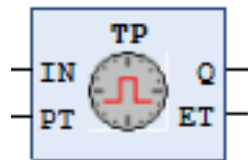
Figura 11 – Temporizador TOF.



Fonte:(3S-Smart Software Solutions, 2023).

- TP: O bloco temporizador TP gera um pulso de duração previamente definida quando detecta uma transição de subida na entrada (de 0 para 1). Ao ser acionado, a saída permanece ativa durante o tempo programado, independentemente do estado da entrada após o disparo, retornando ao estado desligado ao término da temporização. Sua representação está na Figura 12

Figura 12 – Temporizador TP.

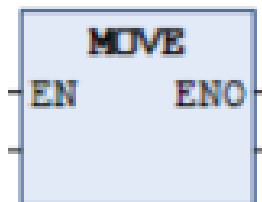


Fonte:(3S-Smart Software Solutions, 2023).

Função Especial

- Move: Essa função é usada para atribuir um valor para uma variável, podendo assumir valores Booleanos e analógicos. Sua representação está na Figura 13

Figura 13 – Função MOVE.



Fonte:(3S-Smart Software Solutions, 2023).

- F-TRIG: O bloco detector de borda de descida F_TRIG identifica a transição de um sinal do estado lógico 1 para 0, gerando um pulso na saída por apenas um ciclo de execução do programa. Sua função é detectar o instante exato em que ocorre o desligamento de um

sinal, permitindo a execução de ações pontuais associadas a esse evento. Sua representação está na Figura 14

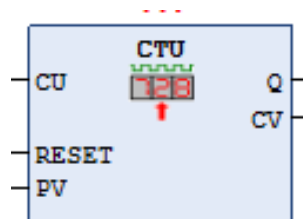
Figura 14 – Função F-TRIG.



Fonte:(3S-Smart Software Solutions, 2023).

- CTU: O bloco contador CTU (Count Up) realiza a contagem crescente de pulsos ou eventos recebidos na entrada, incrementando seu valor acumulado a cada detecção de uma borda de subida (transição de 0 para 1. Quando o valor acumulado atinge o valor pré-definido, sua saída é ativada, permitindo o acionamento de funções ou etapas subsequentes do processo. Sua representação está na Figura 15

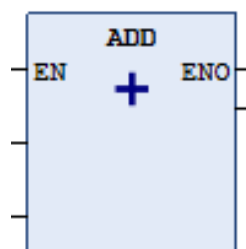
Figura 15 – Contador CTU.



Fonte:(3S-Smart Software Solutions, 2023).

- ADD: O bloco matemático ADD realiza a operação de adição entre dois ou mais valores de entrada, fornecendo como saída a soma dos operandos. É utilizado para cálculos e processamento de dados em sistemas de automação, permitindo a obtenção de valores acumulados ou resultados de operações aritméticas. Sua representação está na Figura 16

Figura 16 – Função ADD.



Fonte:(3S-Smart Software Solutions, 2023).

2.3 Ambiente de engenharia codesys

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) evoluíram de sistemas de hardware rigidamente acoplados a linguagens proprietárias para arquiteturas abertas e flexíveis. Grande parte dessa evolução se deve à padronização estabelecida pela norma internacional IEC 61131-3, que define os requisitos de software e as linguagens de programação para controladores industriais (International Electrotechnical Commission, 2013). Ao padronizar linguagens como o Diagrama de Blocos Funcionais (FBD), Texto Estruturado (ST) e o Diagrama de Contatos ou *Ladder* (LD), a norma garantiu maior portabilidade e reutilização de escopos de controle entre diferentes fabricantes de hardware.

Nesse cenário de padronização, o *Controller Development System* (CODESYS) destaca-se como uma das principais plataformas de desenvolvimento independentes de hardware do mercado mundial (3S-Smart Software Solutions, 2023). Desenvolvido pela empresa 3S-Smart Software Solutions, o ambiente integra em uma única interface virtual todas as etapas de engenharia de automação, abrangendo desde a configuração da arquitetura de rede e mapeamento de variáveis de entrada e saída (I/O) até a programação da lógica de controle e criação de telas de supervisão (3S-Smart Software Solutions, 2023).

Uma das principais vantagens técnicas da plataforma CODESYS é o seu sistema de *SoftPLC* integrado. Esse recurso permite transformar o computador de desenvolvimento em um controlador virtual funcional, eliminando a necessidade inicial de um hardware físico dedicado para a realização de testes funcionais. O uso de controladores virtuais em ambiente de engenharia reduz drasticamente o tempo de comissionamento de sistemas, permitindo que falhas de lógica, loops de controle incorretos ou problemas de intertravamento de segurança sejam mitigados de forma precoce na fase de projeto conceitual.

2.4 Validação virtual de sistemas de automação via factory I/O e modbus TCP/IP

A validação de estratégias de controle complexas, tais como as rotinas de posicionamento e desaceleração progressiva exigidas em veículos industriais autônomos e carros de transferência, demanda ambientes de simulação robustos que repliquem o comportamento físico da planta. O *software* Factory I/O atua como um ambiente de simulação fabril em três dimensões (3D), projetado especificamente para interagir com CLPs reais ou virtuais em tempo real (Real Games, 2023). O ambiente disponibiliza partes e cenários industriais predefinidos — como esteiras, sensores indutivos e sistemas de elevação — dotados de física realista, o que viabiliza a análise dinâmica de trajetos e transferências de carga antes da implementação em campo.

Para estabelecer a troca de dados entre o algoritmo de controle processado e a cena virtualizada, utilizam-se protocolos de comunicação industrial consolidados. O protocolo Modbus

TCP/IP, que encapsula a tradicional estrutura de dados Modbus dentro do modelo de redes Ethernet industrial, é amplamente utilizado devido à sua simplicidade, robustez e ampla aceitação no mercado.

Na arquitetura de simulação em ambiente virtual, o controlador configurado como escravo (*Modbus TCP Slave*) gerencia um mapa de memória composto por registradores de retenção (*Holding Registers*) e bobinas (*Coils*), os quais são lidos e escritos continuamente pelo simulador de fábrica. Essa abordagem assegura determinismo e estabilidade na sincronização de dados biológicos da cena (como sinais de sensores de fim de curso e medidores de distância a laser) com as tomadas de decisão lógicas do programa de controle executado na plataforma de engenharia (3S-Smart Software Solutions, 2023; Real Games, 2023).

2.5 Veículos guiados automatizados (AGV)

No âmbito da movimentação interna de materiais, os Veículos Guiados Automatizados (AGVs) são exemplos paradigmáticos de aplicação da automação. Esses veículos são projetados para transportar cargas de forma autônoma em ambientes industriais ou logísticos, seguindo diretrizes internacionais de segurança para transportadores de carga autopropelidos (International Organization for Standardization, 2021). AGVs utilizam uma combinação de sensores, sistemas de navegação e controladores lógicos programáveis para determinar rotas, detectar obstáculos e integrar-se com sistemas de controle fabril.

A literatura aponta que a adoção de AGVs proporciona uma série de benefícios como:

- Aumento da produtividade devido à operação contínua (24/7).
- Redução de erros por eliminação da intervenção humana.
- Melhoria da segurança ao retirar operadores de zonas perigosas.
- Flexibilidade de adaptação a diferentes fluxos logísticos.

Estudos de arquitetura e implementação reforçam a necessidade de integração entre hardware (sensores, atuadores, CLPs) e software de controle para garantir a operação autônoma e a capacidade de resposta em tempo real a eventos do ambiente industrial (RODRIGUES; BASTOS, 2020; SILVA, 2024).

2.6 Sensores e controle de navegação

A capacidade de um veículo autônomo perceber o ambiente depende da tecnologia de sensores integrada ao sistema. Sensores ultrassônicos, scanners laser, câmeras e encoders permitem localizar obstáculos, medir distâncias e fornecer informações essenciais para algoritmos de navegação.

A coordenação do movimento e a tomada de decisões em tempo real se apoiam em controladores lógicos programáveis (CLPs) ou controladores embarcados com lógica específica para roteamento, controle de velocidade e evasão de obstáculos. Normas como a IEC 61131-3 fornecem diretrizes padronizadas para programação e estruturação de CLPs usados em ambientes industriais (International Electrotechnical Commission, 2013).

2.7 Segurança em sistemas automatizados

A segurança de máquinas automatizadas é um tema crítico e amplamente discutido na literatura técnica e normativa. Diretrizes fundamentais como a norma ABNT NBR ISO 12100 estabelecem os princípios gerais de projeto para a realização da apreciação de riscos e definição de medidas de proteção adequadas logo na fase de concepção do equipamento (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013).

Complementarmente, para sistemas que envolvem a movimentação de cargas e a coexistência entre operadores humanos e equipamentos móveis, normas específicas como a IEC 61496-1 definem os requisitos rigorosos para o projeto e aplicação de dispositivos de proteção eletrossensíveis, incluindo os scanners laser e as barreiras ópticas de segurança usados para salvarguardar as zonas de deslocamento (International Electrotechnical Commission, 2020).

Além dessas, normas focadas no segmento de transporte de materiais, como a ISO 3691-6, também abordam os requisitos de segurança e verificação para veículos industriais autônomos, complementando de forma direta as análises de risco gerais (International Organization for Standardization, 2021). A literatura aplicada enfatiza que uma abordagem holística e integrada, desde a modelagem lógica do software até a distribuição física dos dispositivos de campo, é essencial para permitir que veículos automatizados e operadores compartilhem o mesmo ambiente industrial de forma segura, mitigando os riscos de acidentes severos. (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013; International Electrotechnical Commission, 2020).

2.8 Aplicações práticas e tecnologias emergentes

Estudos de caso e implementações reais, como a utilização de veículos automatizados nos setores automotivos e logísticos, fornecem evidências empíricas consolidadas sobre os benefícios e os desafios práticos da automação na movimentação de materiais. Tais estudos demonstram que a integração de sensores avançados, algoritmos de controle adaptativo e conectividade com sistemas de gestão fabril resulta em operações significativamente mais eficientes, seguras e flexíveis (SILVA, 2024).

No horizonte das tecnologias emergentes, a validação por meio de comissionamento virtual e o uso de plataformas de software independentes de hardware destacam-se como tendências irreversíveis alinhadas aos conceitos da Indústria 4.0 (3S-Smart Software Solutions, 2023; Real Games, 2023). Pesquisas recentes em controle cooperativo, gêmeos digitais (*Digital Twins*) e

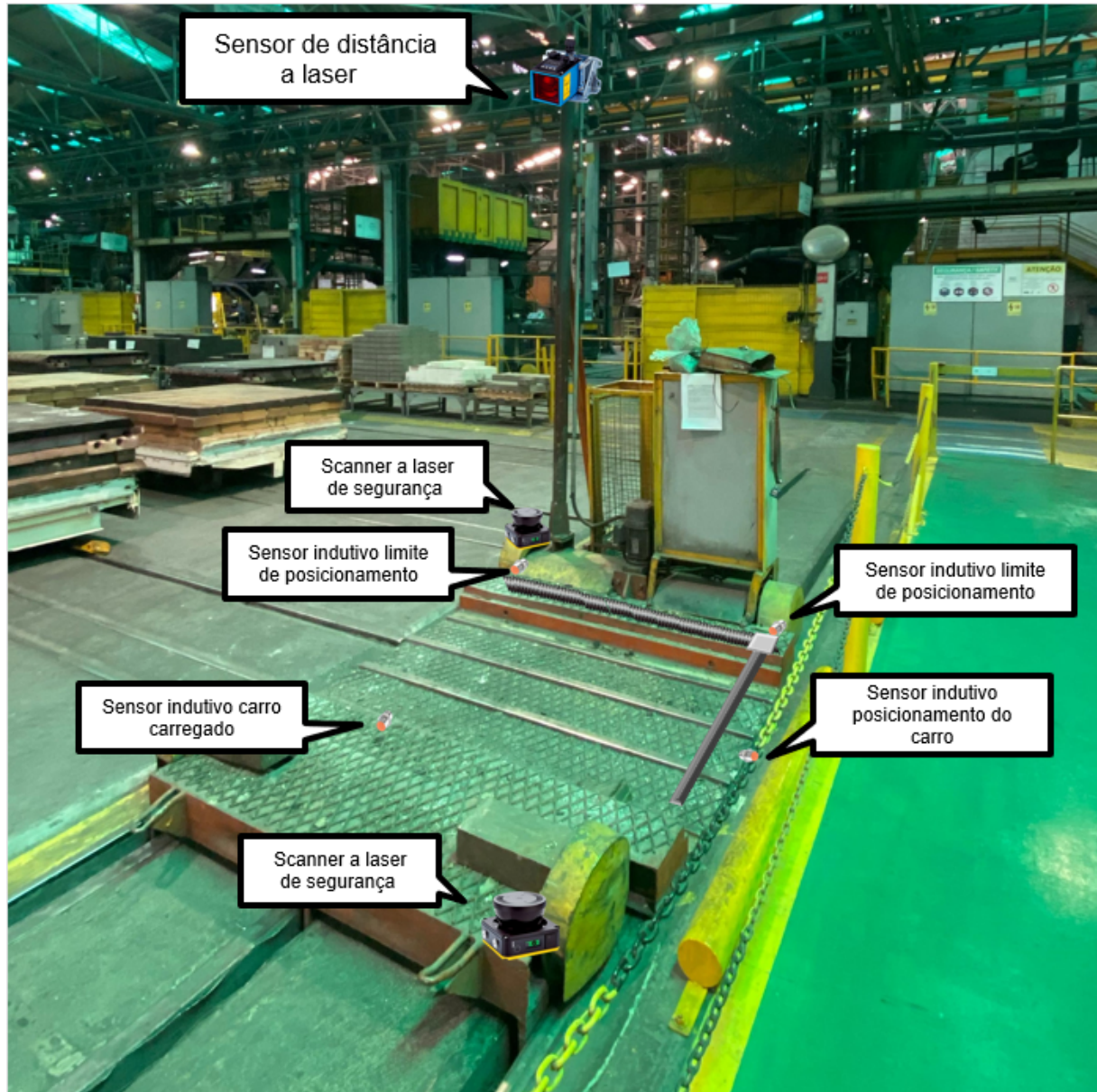
inteligência artificial aplicada à navegação indicam que os futuros sistemas industriais serão ainda mais adaptativos e resilientes (KRITZINGER *et al.*, 2018).

A utilização de ferramentas integradas de simulação em 3D permite antecipar o comportamento dinâmico de plantas complexas e validar lógicas de programação de forma robusta, estabelecendo uma ponte segura entre a teoria acadêmica e as demandas de alta produtividade do mercado manufatureiro atual (Real Games, 2023).

3 METODOLOGIA

O Capítulo 2 apresentou a revisão bibliográfica, neste capítulo será apresentada a metodologia do trabalho. Na Figura 17 pode-se ver um esquemático do projeto.

Figura 17 – Projeto.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.1 Procedimento de transferência

Atualmente, o carro de transferência utilizado no processo opera de forma totalmente manual, abrangendo as etapas de embarque, deslocamento e desembarque da carga. Esse modelo de operação exige a atuação constante do operador, o que pode resultar em variações no tempo de ciclo, maior esforço físico e exposição a riscos operacionais.

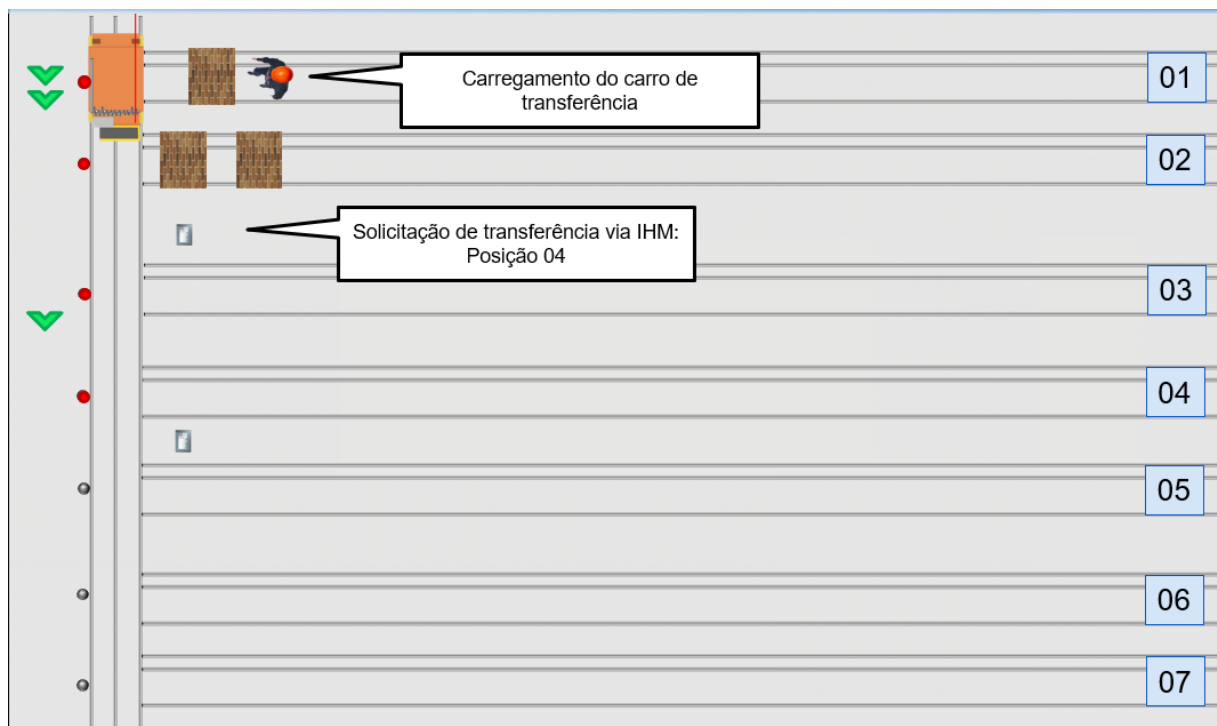
Com a proposta apresentada neste trabalho, o sistema passa a incorporar funcionalidades de automação e controle, mantendo, neste estágio do projeto, o carregamento manual do carro de transferência. Essa decisão considera as limitações atuais do ambiente externo, o qual ainda não se encontra adequado para permitir o carregamento automático, ficando essa funcionalidade condicionada a futuras adequações estruturais.

Dessa forma, o procedimento de transferência proposto busca automatizar principalmente as etapas de deslocamento e posicionamento do carro, promovendo maior padronização do processo, aumento da segurança operacional e redução da dependência da intervenção humana durante o movimento do equipamento.

3.2 Definição do trajeto

A definição do trajeto do carro de transferência é realizada pelo operador por meio da Interface Homem-Máquina (IHM). Nesse ambiente, o operador seleciona a posição de coleta e o destino desejado, a partir de rotas previamente configuradas no sistema de controle. Essa abordagem permite flexibilidade operacional, ao mesmo tempo em que mantém o controle sobre trajetos seguros e previamente validados. Conforme figura 18

Figura 18 – Funcionamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Após a seleção da rota, o operador solicita o início da movimentação, momento em que o sistema verifica as condições necessárias para a operação, como liberação de segurança, ausência

de falhas e disponibilidade do trajeto. Somente após a validação dessas condições o carro de transferência é autorizado a iniciar o deslocamento como visto na Figura 23.

Durante todo o percurso, a posição do carro é monitorada em tempo real por meio de um sensor medidor de distância a laser. Esse sensor fornece informações contínuas ao sistema de controle, permitindo o acompanhamento preciso da localização do equipamento ao longo do trajeto, bem como a execução das estratégias de controle de velocidade e posicionamento definidas no software.

3.3 Movimentação e controle de velocidade

Uma vez autorizado o início da operação, o carro de transferência inicia sua movimentação em direção à posição de coleta selecionada. Todas as posições de coleta e destino encontram-se previamente mapeadas no programa do controlador lógico programável, garantindo repetibilidade, precisão e segurança durante o deslocamento.

À medida que o carro se aproxima da posição desejada, o sistema adota uma estratégia de redução progressiva da velocidade. Ao atingir uma região denominada “janela de transferência”, Ao atingir uma região denominada ‘janela de transferência’, o sistema reduz gradativamente a velocidade de deslocamento. Para fins de validação virtual, adotou-se uma janela de desaceleração de aproximadamente 1 metro, valor definido empiricamente para permitir a observação da estratégia de redução progressiva de velocidade. antes da posição final, o controle reduz gradativamente a velocidade de deslocamento. Essa estratégia tem como objetivo minimizar impactos mecânicos, aumentar a precisão do posicionamento e evitar esforços excessivos nos componentes do sistema.

Quanto mais próximo o carro se encontra do sensor de posicionamento, menor é a velocidade aplicada, permitindo uma aproximação controlada e segura. A parada do equipamento ocorre quando o sensor de posição identifica que o carro está dentro da janela de posicionamento previamente configurada no software. Dessa forma, assegura-se uma parada precisa e repetitiva, essencial para a confiabilidade do processo de transferência e para a segurança da operação.

3.4 Carregamento

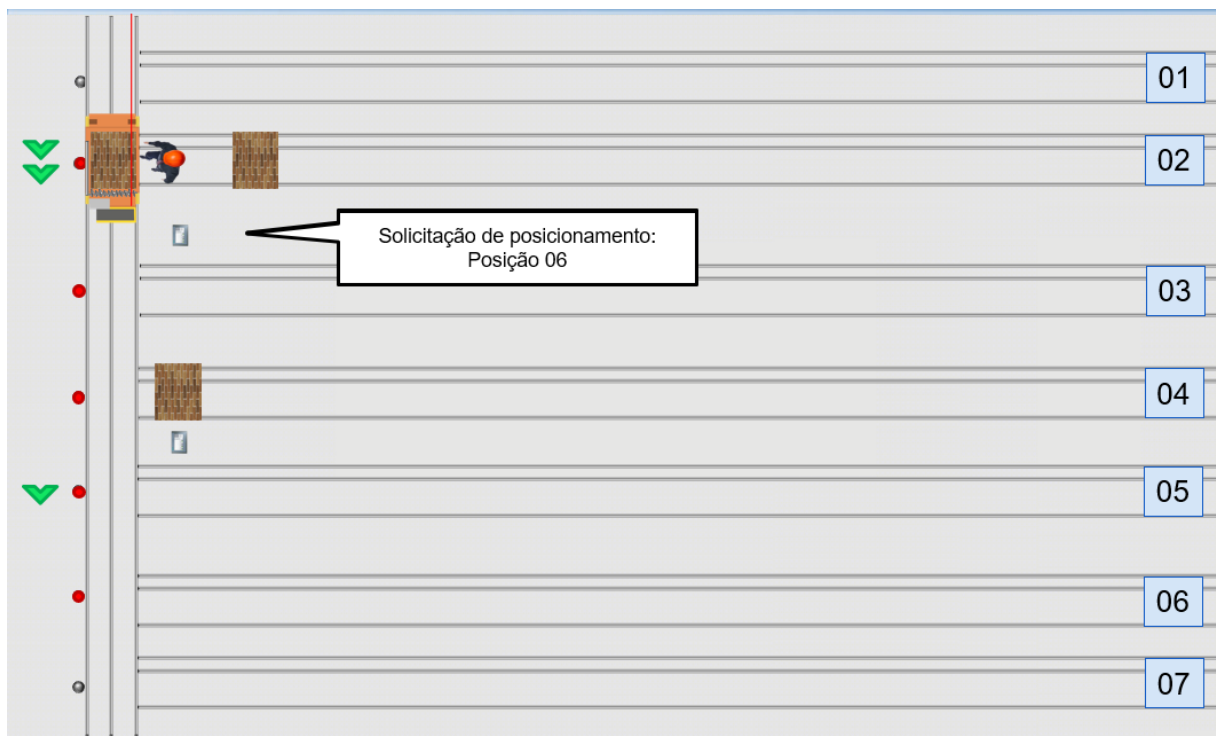
Após o carro de transferência atingir e confirmar a posição de coleta, o sistema de controle autoriza a etapa de carregamento. Essa autorização é indicada ao operador por meio de uma sinalização luminosa, a qual informa que o equipamento encontra-se corretamente posicionado e liberado para a operação. Essa sinalização atua como um elemento adicional de segurança, evitando que o carregamento seja realizado fora da posição adequada.

O carregamento do carro de transferência é executado manualmente pelo operador, respeitando as condições atuais do ambiente industrial e as limitações estruturais existentes.

Durante essa etapa, o sistema permanece em estado de monitoramento, impedindo qualquer movimentação do carro enquanto a condição de carregamento não for finalizada e confirmada.

Após a conclusão do carregamento, o operador deve confirmar, por meio da Interface Homem-Máquina (IHM), a condição de “carregado”. Essa confirmação funciona como um intertravamento lógico, assegurando que o sistema somente avance para a próxima etapa do processo quando a carga estiver corretamente posicionada e o operador tiver concluído a operação de forma segura. Conforme figura 19

Figura 19 – Carregamento.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.5 Movimentação e controle de velocidade até o destino

Com a confirmação do carregamento via IHM, o carro de transferência é autorizado a iniciar sua movimentação em direção à posição de destino previamente selecionada. Assim como nas etapas anteriores, todas as posições de transferência encontram-se previamente mapeadas no programa do controlador lógico programável, garantindo repetibilidade e padronização do processo.

Durante o deslocamento, o sistema mantém o monitoramento contínuo da posição do carro por meio dos sensores de posicionamento. À medida que o carro se aproxima do ponto de destino, é aplicada a mesma estratégia de controle de velocidade adotada na fase de coleta. Ao atingir a denominada “janela de transferência”, definida aproximadamente a um metro da posição final, o sistema reduz gradativamente a velocidade de deslocamento.

Essa redução progressiva assegura uma aproximação controlada, evitando impactos mecânicos e garantindo maior precisão no posicionamento final. A parada do carro de transferência ocorre quando o sensor de posição identifica que o equipamento se encontra dentro da janela de posicionamento configurada no software, assegurando uma parada precisa e segura.

3.6 Descarga do carro

Após a parada completa do carro de transferência na posição de destino, o sistema realiza uma verificação da área de descarga por meio de um sensor scanner de segurança. Essa verificação tem como objetivo assegurar que não haja a presença de operadores, obstáculos ou qualquer condição que possa comprometer a segurança da operação.

Somente após a confirmação de que a área de descarga encontra-se livre, o sistema autoriza o acionamento do mecanismo de descarga. Nesse momento, o mecanismo de rosca sem fim é acionado, promovendo o empurramento controlado do carro de queima para fora do carro de transferência. Todo o processo ocorre de forma automatizada e monitorada, garantindo segurança e repetibilidade da operação.

Concluída a descarga, o carro de transferência retorna ao modo de espera, permanecendo disponível para uma nova solicitação de transferência. Esse estado garante que o sistema esteja pronto para reiniciar o ciclo operacional de forma segura e organizada.

3.7 Sensoriamento e infraestrutura

Para assegurar o funcionamento adequado e seguro do sistema de carro de transferência automatizado, é necessária a definição de um conjunto robusto de dispositivos de sensoriamento e uma arquitetura de controle compatível com as exigências da automação proposta. O sistema baseia-se em sensores de posicionamento, sensores de segurança e dispositivos de monitoramento contínuo, responsáveis por fornecer informações em tempo real ao algoritmo de controle.

Em função da ampliação das funcionalidades e da complexidade do sistema, a arquitetura lógica foi projetada para interagir diretamente com uma plataforma de desenvolvimento moderna baseada na norma IEC 61131-3 (International Electrotechnical Commission, 2013). O mapeamento de variáveis e a lógica de controle foram centralizados no ambiente CODESYS V3.5, que processa de forma virtual as rotinas de movimentação, os intertravamentos e as funções de segurança (3S-Smart Software Solutions, 2023).

Para a simulação dinâmica do comportamento físico do carro, os sinais digitais e analógicos foram integrados ao ecossistema virtual do *software* Factory I/O (Real Games, 2023). As estratégias de controle de velocidade, aceleração e desaceleração atuam diretamente sobre o atuador linear do simulador, reproduzindo o comportamento esperado de um inversor de frequência em malha fechada, contribuindo para a suavidade do movimento, a precisão do posicionamento

e a redução de esforços mecânicos. Essa infraestrutura de comissionamento virtual garante que o sistema seja validado de forma confiável e alinhada às boas práticas da automação industrial.

3.7.1 *Dispositivos de sensoriamento do sistema*

O sistema de carro de transferência automatizado contará com um conjunto de dispositivos de sensoriamento responsáveis por fornecer informações precisas ao sistema de controle, garantindo o correto posicionamento, a segurança operacional e a confiabilidade do processo de transferência. Esses sensores permitem o monitoramento contínuo das condições do equipamento e do ambiente ao seu redor, possibilitando a execução das estratégias de controle e segurança definidas no projeto.

3.7.2 *Sensor de distância a laser – DL100*

O sensor de distância a laser DL100 é o principal dispositivo mapeado para o monitoramento contínuo da posição do carro de transferência ao longo de seu caminho de rolamento (SICK, 2023a). Este sensor fornece medições precisas e em tempo real da distância percorrida, enviando esses dados continuamente para os registradores de entrada do controlador (SICK, 2023a).

As informações analógicas fornecidas pelo dispositivo são fundamentais para a implementação das lógicas de controle de velocidade desenvolvidas no CODESYS, permitindo calcular a desaceleração progressiva à medida que o equipamento se aproxima da janela de posicionamento nas áreas de coleta e descarga, garantindo repetibilidade e confiabilidade operacional (3S-Smart Software Solutions, 2023; SICK, 2023a).

Figura 20 – DL100 - Sensor de distância a laser.



Fonte:(SICK, 2023a)

3.7.3 *Sensor indutivo de posição*

O sensor indutivo de posição é utilizado para identificar a posição exata do carro de transferência na área de descarga. Sua função é atuar como um elemento de confirmação final de posicionamento, assegurando que o carro se encontra corretamente alinhado antes da liberação das etapas subsequentes do processo. Esse sensor contribui para a segurança e a precisão do sistema, funcionando como redundância em relação ao sensor de distância a laser nas posições críticas do processo.

3.7.4 *Sensor indutivo de carro carregado*

O sensor indutivo de carro carregado tem a função de identificar a condição do carro de transferência, indicando se este se encontra vazio ou apto a receber o carro de queima. Esse sensor atua como um intertravamento lógico no sistema de controle, impedindo a liberação de etapas indevidas do processo caso a condição esperada não seja atendida. Dessa forma, o sensor contribui diretamente para a segurança operacional e para a integridade do processo de carregamento.

3.7.5 *Sensores indutivos do sistema de rosca sem fim*

Para o controle do mecanismo de descarga, são utilizados dois sensores indutivos que atuam como chaves de fim de curso no sistema de rosca sem fim. Esses sensores são responsáveis por identificar as posições extremas da haste de movimentação, garantindo que o deslocamento ocorra dentro dos limites mecânicos seguros. A utilização desses sensores evita sobrecursos, reduz o desgaste dos componentes mecânicos e assegura o correto posicionamento da haste durante o processo de descarga do carro de queima.

Figura 21 – Sensor indutivo.



Fonte: (MAXSA, 2025)

3.7.6 *Scanners laser de segurança – NanoScan3*

Os scanners laser de segurança NanoScan3 são especificados para instalação nas extremidades do carro de transferência e desempenham papel fundamental na proteção de operadores e equipamentos móveis (SICK, 2023b). Esses dispositivos monitoram continuamente as áreas

adjacentes ao carro, detectando a presença de pessoas ou objetos dentro do campo de proteção e aviso configurado de acordo com as diretrizes de segurança da norma IEC 61496-1 (International Electrotechnical Commission, 2020; SICK, 2023b).

Na lógica de controle simulada, caso uma intrusão seja identificada em uma das zonas de proteção durante a movimentação, o sinal de segurança (campo de proteção cortado) força uma interrupção imediata via intertravamento de *software*, comandando a parada segura do veículo. Além disso, os scanners também têm seus dados lógicos monitorados para verificar se a região de descarga encontra-se totalmente livre antes do acionamento automatizado do mecanismo de rosca sem fim.

Figura 22 – Scanners Laser de Segurança – NanoScan3.



Fonte:(SICK, 2023b)

3.7.7 Interface homem-máquina (IHM)

Para a operação e supervisão do sistema de carro de transferência, a arquitetura lógica prevê a integração de telas de Interface Homem-Máquina (IHMs) mapeadas ao sistema de controle central. No ambiente de validação virtual, essas interfaces de supervisão foram desenvolvidas diretamente através dos recursos de visualização integrados da plataforma CODESYS, permitindo o controle centralizado de variáveis de processo e comandos operacionais (3S-Smart Software Solutions, 2023).

As IHMs desenvolvidas possibilitam a interação direta entre o operador e o sistema automatizado, permitindo a visualização gráfica em tempo real do estado do processo, a seleção de rotas de transferência, a confirmação manual de etapas operacionais (como o status de carro carregado) e o diagnóstico rápido de falhas ou alarmes de segurança. A arquitetura de rede estruturada via protocolo Modbus TCP/IP garante que múltiplos pontos de acesso de supervisão possam monitorar simultaneamente o mapa de memória do controlador virtual, assegurando

a flexibilidade e a disponibilidade contínua das informações operacionais (3S-Smart Software Solutions, 2023; Real Games, 2023).

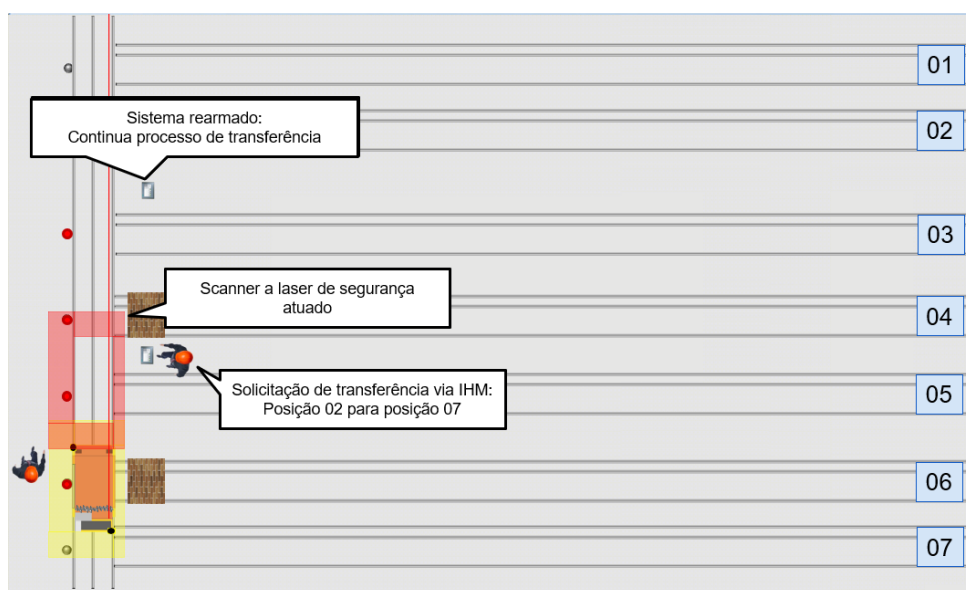
3.7.8 Sistema de segurança

O sistema de segurança do carro de transferência automatizado foi concebido como um elemento intrínseco do projeto, tendo como objetivo principal o atendimento aos princípios gerais de redução de riscos estabelecidos pela norma ABNT NBR ISO 12100 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013). Para isso, o modelo lógico integra os sinais dos dois scanners a laser instalados nas extremidades do veículo, garantindo a cobertura tridimensional das áreas críticas de deslocamento e descarga (SICK, 2023b).

Caso seja detectada alguma obstrução dentro do campo de atuação de qualquer um dos scanners virtuais durante o ciclo de simulação no Factory I/O, o sistema interrompe imediatamente o sinal de habilitação do motor (*Enable*), promovendo uma parada de emergência monitorada pelo programa em linguagem *Ladder* (Real Games, 2023). A retomada segura da operação somente é permitida após a desobstrução física da zona de risco e a execução manual de um comando de rearme (*Reset*) consciente por parte do operador através da tela de supervisão da IHM (3S-Smart Software Solutions, 2023).

Dessa forma, o sistema de segurança atua de maneira totalmente integrada às rotinas automáticas de movimentação, garantindo que todas as etapas de transferência e descarga ocorram em estrita conformidade com as diretrizes técnicas de proteção de máquinas (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2013; International Electrotechnical Commission, 2020).

Figura 23 – Sistema de segurança.

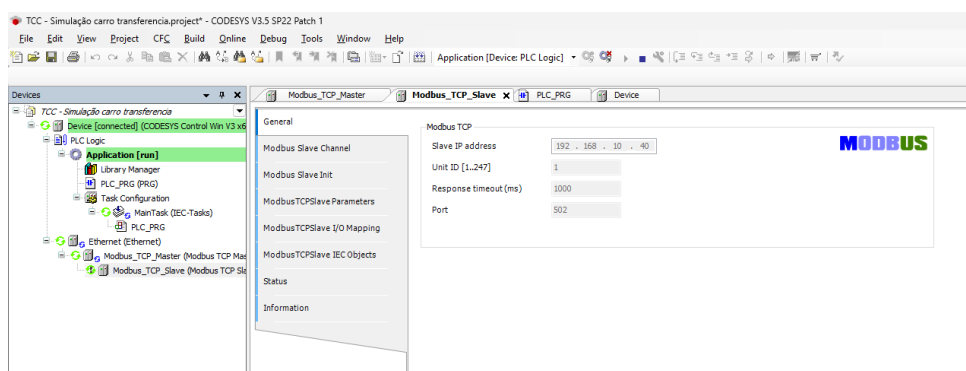


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.7.9 Comunicação entre as ferramentas utilizadas

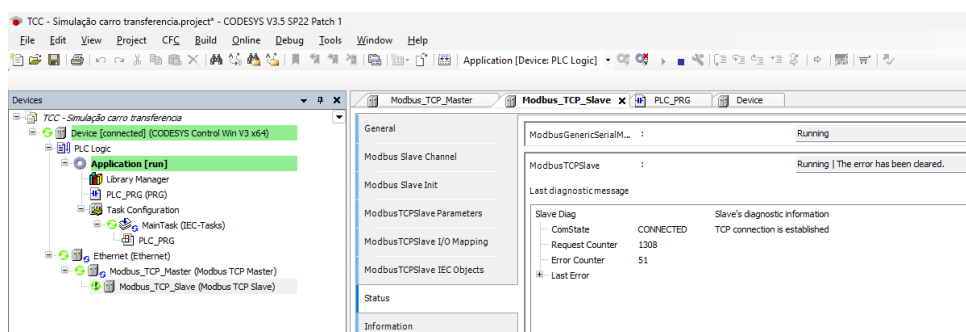
A arquitetura de comunicação entre as plataformas foi estabelecida configurando o ambiente CODESYS como um dispositivo escravo (*Modbus TCP Slave*) no endereço IP 192.168.10.40, operando através da porta padrão 502. Conforme os testes de conectividade realizados, o canal de comunicação demonstrou total estabilidade ao longo do ciclo operacional, mantendo o estado de execução contínua (*Running*) e processando com sucesso as requisições de leitura e escrita lógicas necessárias para sincronizar os sensores virtuais com as bobinas de acionamento do programa, conforme demonstrado nas figuras 24 e 25.

Figura 24 – Configuração do Modbus TCP Slave no CODESYS.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 25 – Status da comunicação Modbus TCP/IP entre CODESYS e Factory I/O.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A Figura 26 ilustra a tela de configuração do protocolo Modbus TCP/IP Server no Factory I/O. No painel à esquerda, é possível observar a lista de drivers disponíveis na plataforma, como Allen-Bradley, Siemens, OPC Client, entre outros, com o driver Modbus TCP/IP Server selecionado e destacado. À direita, os parâmetros de conexão estão definidos com o endereço de host 192.168.10.40, porta 502 e Slave ID 1, correspondendo exatamente à configuração do Modbus TCP Slave definida no CODESYS (3S-Smart Software Solutions, 2023). Na seção I/O Config, o mapeamento dos tipos de registro foi configurado da seguinte forma (Real Games, 2023):

- **Write Digital** — Inputs: os sinais digitais escritos pelo CODESYS são mapeados como entradas no Factory I/O.
- **Read Digital** — Coils: os sinais digitais lidos pelo CODESYS são mapeados como coils no Factory I/O.
- **Write Register** — Input Registers: os registros escritos pelo CODESYS são mapeados como registros de entrada.
- **Read Register** — Holding Registers: os registros lidos pelo CODESYS são mapeados como registros de retenção.
- **Scale** — fator de escala definido como 1, sem conversão de valores.

Figura 26 – Configuração do driver Modbus TCP/IP Server no Factory I/O..

Factory I/O

CONFIGURATION

Advantech USB 4704 & USB 4750

Allen-Bradley Logix5000

Allen-Bradley Micro800

Allen-Bradley MicroLogix

Allen-Bradley SLC 5/05

Automgen Server

Control I/O

MHJ

Modbus TCP/IP Client

Modbus TCP/IP Server

OPC Client DA/UA

Siemens LOGO!

Siemens S7-200/300/400

Siemens S7-1200/1500

Siemens S7-PLCSIM

Host

192.168.10.40

Port

502

Slave ID

1

Network adapter

Intel(R) Wi-Fi 6 AX201 160MHz

I/O Config

Write Digital

Inputs

Read Digital

Coils

Write Register

Input Registers

Read Register

Holding Registers

Scale

1

I/O Points

	Offset	Count
Digital Inputs	0	24
Digital Outputs	0	25
Register Inputs	0	0
Register Outputs	0	3

4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da simulação e validação do sistema de controle desenvolvido para o carro de transferência automatizado. O algoritmo de controle foi inteiramente programado no ambiente de engenharia CODESYS V3.5, com a comunicação de dados integrada em tempo real ao *software* de simulação industrial Factory I/O v2.5.10 via protocolo Modbus TCP/IP.

O propósito da dinâmica foi validar, em ambiente virtual, o comportamento funcional das rotinas de movimentação, o intertravamento das garras e as estratégias de desaceleração progressiva mapeadas para o veículo. Para a representação tridimensional da planta, utilizou-se como base operacional as cenas 7, 16 e 21 do Factory I/O conforme demonstrado na figura 27, a qual simula a seleção de matéria-prima, a movimentação de robôs junto com uma fresadora e após envia para linha de paletes para posições predefinidas em um sistema de armazenamento automatizado com a utilização do carro de transferência automatizado, reproduzindo de forma análoga o comportamento dinâmico do carro de queima no processo industrial real.

Figura 27 – Visão geral da planta no Factory I/O — ambiente de simulação.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Para a integração entre o CODESYS V3.5 e o Factory I/O, foi realizado o mapeamento completo das variáveis de entrada e saída via protocolo Modbus TCP/IP. As entradas digitais correspondem aos sinais provenientes dos sensores e elementos de supervisão do ambiente simulado, enquanto as saídas digitais correspondem aos acionamentos dos atuadores e dispositivos de sinalização controlados pelo programa Ladder. Adicionalmente, registros de retenção (Holding Registers) foram utilizados para o envio de valores inteiros ao sistema, como a posição de destino e os contadores de ciclo. A Tabela 1 e a figura 28 apresentam as entradas digitais mapeadas, com

seus respectivos endereços Modbus, endereços físicos no CODESYS e descrição funcional de cada variável.

Tabela 1 – Mapeamento das entradas digitais e analógica — CODESYS / Factory I/O.

Endereço CODESYS	Variável	Endereço Modbus	Descrição
<i>Entradas Digitais[0] — %IB0</i>			
%IX0.0	AtEntry	Input 0	Paleta na entrada
%IX0.1	AtLoad	Input 1	Paleta na posição de carga
%IX0.2	AtLeft	Input 2	Carro na posição esquerda
%IX0.3	AtMiddle	Input 3	Carro na posição central
%IX0.4	AtRight	Input 4	Carro na posição direita
%IX0.5	AtUnload	Input 5	Paleta na posição de descarga
%IX0.6	AtExit	Input 6	Paleta na saída
%IX0.7	MovingX	Input 7	Carro em movimento horizontal
<i>Entradas Digitais[1] — %IB1</i>			
%IX1.0	MovingZ	Input 8	Garras em movimento vertical
%IX1.1	Start	Input 9	Botão Start
%IX1.2	Reset	Input 10	Botão Reset
%IX1.3	Stop	Input 11	Botão Stop
%IX1.4	EmergencyStop	Input 12	Botão de emergência
%IX1.5	Auto	Input 13	Modo automático selecionado
%IX1.6	Manual	Input 14	Modo manual selecionado
%IX1.7	LidsAtEntry	Input 15	Tampas na entrada
<i>Entradas Digitais[2] — %IB2</i>			
%IX2.0	LidsCenterBusy	Input 16	Centro de tampas ocupado
%IX2.1	LidsCenterError	Input 17	Erro no centro de tampas
%IX2.2	LidsAtExit	Input 18	Tampas na saída
%IX2.3	BasesAtEntry	Input 19	Bases na entrada
%IX2.4	BasesCenterBusy	Input 20	Centro de bases ocupado
%IX2.5	BasesCenterError	Input 21	Erro no centro de bases
%IX2.6	BasesAtExit	Input 22	Bases na saída
%IX2.7	AtExitSep	Input 23	Paleta na saída separadora
<i>Entradas Digitais[3] — %IB3</i>			
%IX3.0	StartSep	Input 24	Botão Start separadora
%IX3.1	ResetSep	Input 25	Botão Reset separadora
%IX3.2	StopSep	Input 26	Botão Stop separadora
%IX3.3	EmergencyStopSep	Input 27	Emergência separadora
%IX3.4	AutoSep	Input 28	Modo automático separadora
%IX3.5	ManualSep	Input 29	Modo manual separadora
%IX3.6	FIO_Runinng	Input 30	Factory I/O em execução
<i>Entrada Analógica — %IW2</i>			
%IW2	VisionSensor	Input Reg 0	Sensor de visão (valor inteiro)

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 28 – Entradas Digitais CODESYS.

Variable	Mapping	Channel	Address	Type	Unit	Description
		Entradas Digitais	%IB0	ARRAY [0..2] OF BYTE		Read Discrete Inputs
		Entradas Digitais[0]	%IB0	BYTE		Read Discrete Inputs
AtEntry		Bit0	%IX0.0	BOOL		0x0000
AtLoad		Bit1	%IX0.1	BOOL		0x0001
AtLeft		Bit2	%IX0.2	BOOL		0x0002
AtMiddle		Bit3	%IX0.3	BOOL		0x0003
AtRight		Bit4	%IX0.4	BOOL		0x0004
AtUnload		Bit5	%IX0.5	BOOL		0x0005
AtExit		Bit6	%IX0.6	BOOL		0x0006
MovingX		Bit7	%IX0.7	BOOL		0x0007
		Entradas Digitais[1]	%IB1	BYTE		Read Discrete Inputs
MovingZ		Bit0	%IX1.0	BOOL		0x0008
Start		Bit1	%IX1.1	BOOL		0x0009
Reset		Bit2	%IX1.2	BOOL		0x000A
Stop		Bit3	%IX1.3	BOOL		0x000B
EmergencyStop		Bit4	%IX1.4	BOOL		0x000C
Auto		Bit5	%IX1.5	BOOL		0x000D
Manual		Bit6	%IX1.6	BOOL		0x000E
LidsCenterBusy		Bit7	%IX1.7	BOOL		0x000F
		Entradas Digitais[2]	%IB2	BYTE		Read Discrete Inputs
LidsAtEntry		Bit0	%IX2.0	BOOL		0x0010
LidsCenterError		Bit1	%IX2.1	BOOL		0x0011
LidsAtExit		Bit2	%IX2.2	BOOL		0x0012
BasesAtEntry		Bit3	%IX2.3	BOOL		0x0013
BasesCenterBusy		Bit4	%IX2.4	BOOL		0x0014
BasesCenterError		Bit5	%IX2.5	BOOL		0x0015
BasesAtExit		Bit6	%IX2.6	BOOL		0x0016
FIO_Runing		Bit7	%IX2.7	BOOL		0x0017

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A Tabela 2 e figura 29 apresenta as saídas digitais e os registros de retenção mapeados, responsáveis pelo acionamento dos atuadores e pelo envio de referências numéricas ao sistema simulado.

Tabela 2 – Mapeamento das saídas digitais e analógicas — CODESYS / Factory I/O.

Endereço CODESYS	Variável	Endereço Modbus	Descrição
<i>Saídas Digitais[0] — %QB0</i>			
%QX0.0	EntryConveyor	Coil 0	Esteira de entrada
%QX0.1	LoadConveyor	Coil 1	Esteira de carga
%QX0.2	ForksLeft	Coil 2	Garras — mover para esquerda
%QX0.3	ForksRight	Coil 3	Garras — mover para direita
%QX0.4	Lift	Coil 4	Elevação das garras
%QX0.5	UnloadConveyor	Coil 5	Esteira de descarga
%QX0.6	ExitConveyor	Coil 6	Esteira de saída
%QX0.7	StartLight	Coil 7	Sinalização — Start
<i>Saídas Digitais[1] — %QB1</i>			
%QX1.0	ResetLight	Coil 8	Sinalização — Reset
%QX1.1	StopLight	Coil 9	Sinalização — Stop
%QX1.2	LidsRawConveyor	Coil 10	Esteira bruta de tampas
%QX1.3	LCProduceLids	Coil 11	Produção de tampas
%QX1.4	LCStart	Coil 12	Iniciar centro de tampas

continua na próxima página

Endereço CODESYS	Variável	Endereço Modbus	Descrição
%QX1.5	LCReset	Coil 13	Resetar centro de tampas
%QX1.6	LCStop	Coil 14	Parar centro de tampas
%QX1.7	LidsExitConveyor1	Coil 15	Esteira saída tampas 1
<i>Saídas Digitais[2] — %QB2</i>			
%QX2.0	LidsExitConveyor2	Coil 16	Esteira saída tampas 2
%QX2.1	BasesRawConveyor	Coil 17	Esteira bruta de bases
%QX2.2	BCProduceLids	Coil 18	Produção de bases
%QX2.3	BCStart	Coil 19	Iniciar centro de bases
%QX2.4	BCReset	Coil 20	Resetar centro de bases
%QX2.5	BCStop	Coil 21	Parar centro de bases
%QX2.6	BasesExitConveyor1	Coil 22	Esteira saída bases 1
%QX2.7	BasesExitConveyor2	Coil 23	Esteira saída bases 2
<i>Saídas Digitais[3] — %QB3</i>			
%QX3.0	ExitConveyorROBO	Coil 24	Esteira saída robô
%QX3.1	EntryConveyorSep	Coil 25	Esteira entrada separadora
%QX3.2	StopBlade	Coil 26	Lâmina de parada
%QX3.3	ExitConveyorSep	Coil 27	Esteira saída separadora
%QX3.4	SorterTurn1	Coil 28	Giro classificador 1
%QX3.5	SorterBelt1	Coil 29	Esteira classificadora 1
%QX3.6	SorterTurn2	Coil 30	Giro classificador 2
%QX3.7	SorterBelt2	Coil 31	Esteira classificadora 2
<i>Saídas Digitais[4] — %QB4</i>			
%QX4.0	SorterTurn3	Coil 32	Giro classificador 3
%QX4.1	SorterBelt3	Coil 33	Esteira classificadora 3
%QX4.2	StartLightSep	Coil 34	Sinalização Start separadora
%QX4.3	ResetLightSep	Coil 35	Sinalização Reset separadora
%QX4.4	StopLightSep	Coil 36	Sinalização Stop separadora
<i>Saídas Analógicas — %QW3</i>			
%QW3	TargetPosition	Holding Reg 0	Posição de destino do carro
%QW4	LidsCounter	Holding Reg 1	Contador de tampas
%QW5	BasesCounter	Holding Reg 2	Contador de bases
%QW6	Counter1Sep	Holding Reg 3	Contador 1 separadora
%QW7	Counter2Sep	Holding Reg 4	Contador 2 separadora
%QW8	Counter3Sep	Holding Reg 5	Contador 3 separadora

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 29 – Saídas Digitais CODESYS.

		Saídas Digitais	%QB0	ARRAY [0..3] OF BYTE	Write Multiple Coils
		Saídas Digitais[0]	%QB0	BYTE	Write Multiple Coils
EntryConveyor		Bit0	%QX0.0	BOOL	0x0000
LoadConveyor		Bit1	%QX0.1	BOOL	0x0001
ForksLeft		Bit2	%QX0.2	BOOL	0x0002
ForksRight		Bit3	%QX0.3	BOOL	0x0003
Lift		Bit4	%QX0.4	BOOL	0x0004
UnloadConveyor		Bit5	%QX0.5	BOOL	0x0005
ExitConveyor		Bit6	%QX0.6	BOOL	0x0006
StartLight		Bit7	%QX0.7	BOOL	0x0007
		Saídas Digitais[1]	%QB1	BYTE	Write Multiple Coils
ResetLight		Bit0	%QX1.0	BOOL	0x0008
StopLight		Bit1	%QX1.1	BOOL	0x0009
LidsRawConveyor		Bit2	%QX1.2	BOOL	0x000A
LCProduceLids		Bit3	%QX1.3	BOOL	0x000B
LCStart		Bit4	%QX1.4	BOOL	0x000C
LCReset		Bit5	%QX1.5	BOOL	0x000D
LCStop		Bit6	%QX1.6	BOOL	0x000E
LidsExitConvey...		Bit7	%QX1.7	BOOL	0x000F
		Saídas Digitais[2]	%QB2	BYTE	Write Multiple Coils
LidsExitConvey...		Bit0	%QX2.0	BOOL	0x0010
BasesRawConv...		Bit1	%QX2.1	BOOL	0x0011
BCProduceLids		Bit2	%QX2.2	BOOL	0x0012
BCStart		Bit3	%QX2.3	BOOL	0x0013
BCReset		Bit4	%QX2.4	BOOL	0x0014
BCStop		Bit5	%QX2.5	BOOL	0x0015
BasesExitConv...		Bit6	%QX2.6	BOOL	0x0016
BasesExitConv...		Bit7	%QX2.7	BOOL	0x0017
		Saídas Digitais[3]	%QB3	BYTE	Write Multiple Coils
ExitConveyorR...		Bit0	%QX3.0	BOOL	0x0018
		Channel 3	%QW2	ARRAY [0..2] OF WORD	Write Multiple Registers
TargetPosition		Channel 3[0]	%QW2	WORD	0x0000
LidsCounter		Channel 3[1]	%QW3	WORD	0x0001
BasesCounter		Channel 3[2]	%QW4	WORD	0x0002

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A Figura 30 apresenta a tela de configuração do Driver do Factory I/O, com o protocolo Modbus TCP/IP Server selecionado. A interface é dividida em duas colunas laterais — Sensors (sensores) à esquerda e Actuators (atuadores) à direita — e um painel central que exibe o mapeamento Modbus entre o CODESYS e o Factory I/O, configurado no endereço IP 192.168.10.40, porta 502, Slave ID 1. Na coluna de sensores, estão listadas todas as variáveis de entrada disponíveis na cena simulada, como At Entry, At Load, Moving X, Emergency Stop, Auto, Manual, entre outras relacionadas ao controle de tampas (Lids), bases (Bases) e ao estado do próprio Factory I/O. Na coluna de atuadores, estão os dispositivos de saída, como esteiras (Entry Conveyor, Load Conveyor, Exit Conveyor), garras (Forks Left, Forks Right), elevação (Lift), sinalizações luminosas (Start light, Reset light, Stop light) e os centros de produção de tampas e bases.

No painel central, o mapeamento associa cada sensor a um Input Modbus (Input 0 a Input 30) e cada atuador a um Coil (Coil 0 a Coil 36), além de seis Holding Registers utilizados para transmissão de valores inteiros: Target Position (Holding Reg 0), Lids counter (Holding Reg 1), Bases counter (Holding Reg 2), Counter 1 Sep (Holding Reg 3), Counter 2 Sep (Holding Reg 4) e Counter 3 Sep (Holding Reg 5). Essa configuração define com precisão o canal de comunicação entre a lógica de controle desenvolvida no CODESYS e o ambiente de simulação do Factory I/O.

Figura 30 – Driver Factory IO.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Os resultados das simulações demonstraram que o sistema de posicionamento operou estritamente conforme o esperado pelo projeto conceitual. Para a validação do sistema de controle, foram utilizadas três cenas do Factory I/O integradas em um único ambiente de simulação, conforme ilustrado na Figura 27: a Cena 7, responsável pela movimentação e armazenamento automático de paletes; a Cena 16, que representa um centro de usinagem com robôs industriais; e a Cena 21, que simula um sistema separador de produtos.

A Cena 7 atuou como elemento central da simulação, reproduzindo o comportamento do carro de transferência ao longo da linha de movimentação. O palete simulado realizou o deslocamento de maneira repetitiva, com os sensores virtuais do ambiente 3D — tais como *At Middle*, *Forks Left* e *Forks Right* — sinalizando corretamente cada etapa do ciclo para a tomada de decisão do controlador. A Cena 16 complementou a simulação ao introduzir células de usinagem com robôs, ampliando a complexidade do ambiente e permitindo validar o comportamento do sistema de controle frente a múltiplos atuadores operando simultaneamente. Já a Cena 21 adicionou ao ambiente um sistema de separação de produtos, exigindo do controlador a correta gestão das saídas digitais responsáveis pelo acionamento das esteiras classificadoras e da lâmina

de parada.

A integração das três cenas em um único ambiente de simulação possibilitou uma validação mais abrangente da lógica de controle desenvolvida em linguagem Ladder no CODESYS V3.5, demonstrando a capacidade do sistema de gerenciar simultaneamente um maior volume de entradas e saídas via protocolo Modbus TCP/IP, em condições próximas às de uma aplicação industrial real.

4.1 Descrição do funcionamento da planta simulada

O ambiente de simulação desenvolvido no Factory I/O integra três sistemas distintos em uma única planta produtiva, controlada integralmente pelo programa Ladder desenvolvido no CODESYS V3.5. O fluxo produtivo tem início na etapa de separação de matéria-prima, avança para o processamento nas células de usinagem e finaliza com o armazenamento automatizado dos produtos acabados.

Na primeira etapa, os itens são inseridos na esteira principal do sistema separador, onde o sensor de visão instalado no portal central realiza a identificação automática de cada produto. Com base no valor lido pela variável, o controlador aciona a lâmina de desvio correspondente, direcionando cada item para a via classificadora correta por meio das saídas. Cada via destina os materiais separados ao centro de usinagem adequado para o seu tipo.

Na segunda etapa, os materiais classificados chegam às células de usinagem, onde os robôs industriais realizam a carga das peças para o interior das máquinas CNC. O controlador gerencia o funcionamento de cada centro por meio das saídas para o centro de bases. O estado de cada célula é monitorado continuamente pelas entradas, garantindo que o fluxo avance somente quando o processamento estiver concluído e sem falhas.

Na terceira e última etapa, os produtos processados são encaminhados ao sistema de armazenamento automatizado, onde o transelevador recebe o comando de posicionamento via registro analógico e realiza o deslocamento preciso até a posição de destino na estrutura de prateleiras.

4.1.1 Primeira etapa - Separador

O separador de matéria-prima, ilustrada na Figura 31, representa um sistema automatizado de separação de matéria-prima. O ambiente é composto por uma esteira principal de entrada, delimitada por grades de proteção, responsável pelo transporte dos itens ao longo da linha.

No trecho central, um sensor de visão instalado em um portal fixo realiza a identificação automática de cada item por meio de leitura a laser, transmitindo o valor detectado ao controlador via variável analógica *VisionSensor*. Com base nessa leitura, o sistema aciona a lâmina de desvio correspondente, direcionando o produto para uma das três esteiras classificadoras inclinadas,

cada uma destinada a um tipo específico de matéria-prima. O acionamento de cada via é realizado pelas saídas digitais *SorterTurn* e *SorterBelt*, conforme mapeamento descrito na Tabela 2

Figura 31 – Sistema automatizado de separação de matéria-prima no Factory I/O.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.1.2 Segunda etapa - Centro de usinagem

O centro de usinagem automatizado, ilustrado na Figura 32, representa um centro de usinagem automatizado composto por duas máquinas CNC e dois robôs industriais de grande porte. Cada célula de usinagem é delimitada por grades de proteção metálicas, e os robôs são responsáveis pelo manuseio das peças entre as esteiras de entrada e saída e o interior das máquinas, simulando o processo de carga e descarga automatizada.

O sistema é integrado ao controlador via saídas digitais mapeadas como *LCProduceLids*, *LCStart*, *LCReset* e *LCStop* para o centro de tampas, e *BCProduceLids*, *BCStart*, *BCReset* e *BCStop* para o centro de bases, conforme descrito na Tabela 2. O estado de cada centro é monitorado pelas entradas digitais *LidsCenterBusy*, *LidsCenterError*, *BasesCenterBusy* e *BasesCenterError*, permitindo ao controlador gerenciar o fluxo de produção de forma segura e coordenada.

Figura 32 – Centro de usinagem com robôs industriais simulado no Factory I/O.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.1.3 Terceira etapa - Sistema de armazenamento

O sistema de armazenamento automatizado, ilustrado na Figura 33, é composto por uma estrutura de prateleiras de grande porte com múltiplos níveis e colunas, responsável pelo armazenamento organizado de paletes. Um transelevador de estrutura metálica amarela percorre trilhos horizontais ao longo da base da prateleira, realizando o deslocamento preciso dos paletes entre a esteira de entrada e as posições de armazenamento predefinidas, analogamente ao comportamento do carro de transferência no processo real.

O posicionamento do transelevador é controlado pelo registro analógico *TargetPosition* — mapeado como *Holding Reg 0* — que define numericamente a posição de destino a ser alcançada. O movimento horizontal e vertical do equipamento é monitorado pelas entradas digitais *MovingX* e *MovingZ*, enquanto as garras responsáveis pela manipulação dos paletes são acionadas pelas saídas *ForksLeft*, *ForksRight* e *Lift*, conforme descrito na Tabela 2.

Figura 33 – Sistema de armazenamento automatizado com transelevador simulado no Factory I/O.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

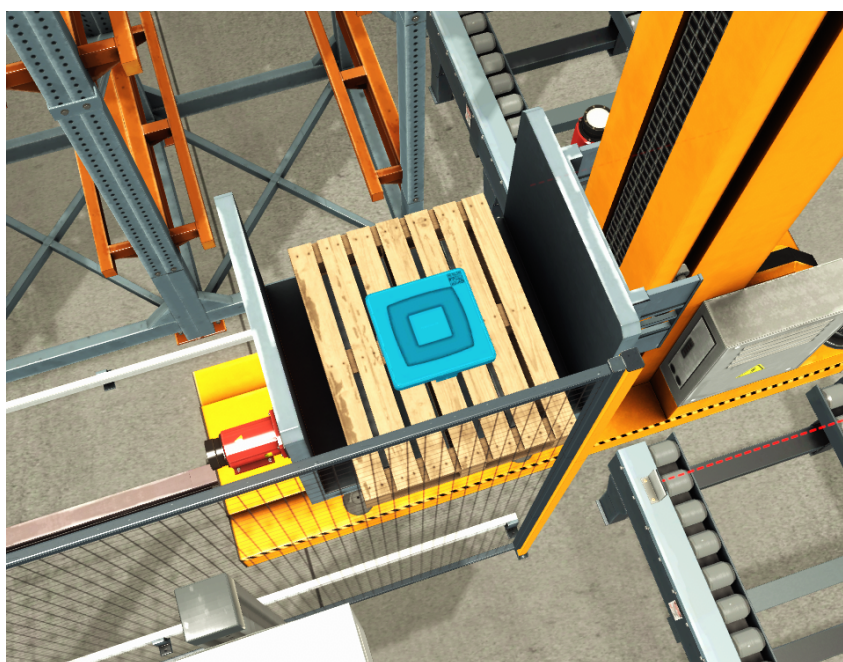
O processo de movimentação e posicionamento do paleta foi registrado por meio de capturas de tela ao longo do ciclo operacional. Conforme evidenciado nas Figuras 34, 35 e 36, ao final do ciclo o paleta encontra-se corretamente alocado na posição de destino. As simulações evidenciaram a repetibilidade das operações, com o sistema executando corretamente as rotinas de deslocamento e parada em múltiplos ciclos consecutivos, sem apresentar desvios de posicionamento ou falhas na lógica de controle implementada.

Figura 34 – Palete posicionado para coleta do carro tranferencia no Factory I/O.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 35 – Movimentação do palete durante o trajeto do carro no Factory I/O.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 36 – Palete posicionado no destino ao final do ciclo de transferência no Factory I/O.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A estratégia de desaceleração progressiva desenvolvida em lógica *Ladder* apresentou uma resposta dinâmica adequada. Ao atingir a janela de transferência configurada aproximada de um metro antes do destino, o programa reduziu gradativamente a velocidade de translação do eixo virtual, comprovando a eficácia da abordagem adotada para mitigar impactos mecânicos severos e garantir paradas com elevada precisão espacial. Durante múltiplos ciclos consecutivos de teste, o sistema manteve a repetibilidade das rotinas sem apresentar desvios de posicionamento, estouro de tempo de ciclo (*timeout*) ou falhas de intertravamento no código.

4.2 Lógica ladder do projeto

A lógica de controle desenvolvida em linguagem Ladder no ambiente CODESYS V3.5 é apresentada a seguir. O programa foi estruturado em 3 rotinas, Sistema de armazenamento, Centro de usinagem e Separador.

4.2.1 Sistema de armazenamento

O programa de controle do sistema de armazenamento foi desenvolvido em linguagem Ladder no ambiente CODESYS V3.5, estruturado em 11 rungs organizados de forma sequencial, conforme descrito a seguir.

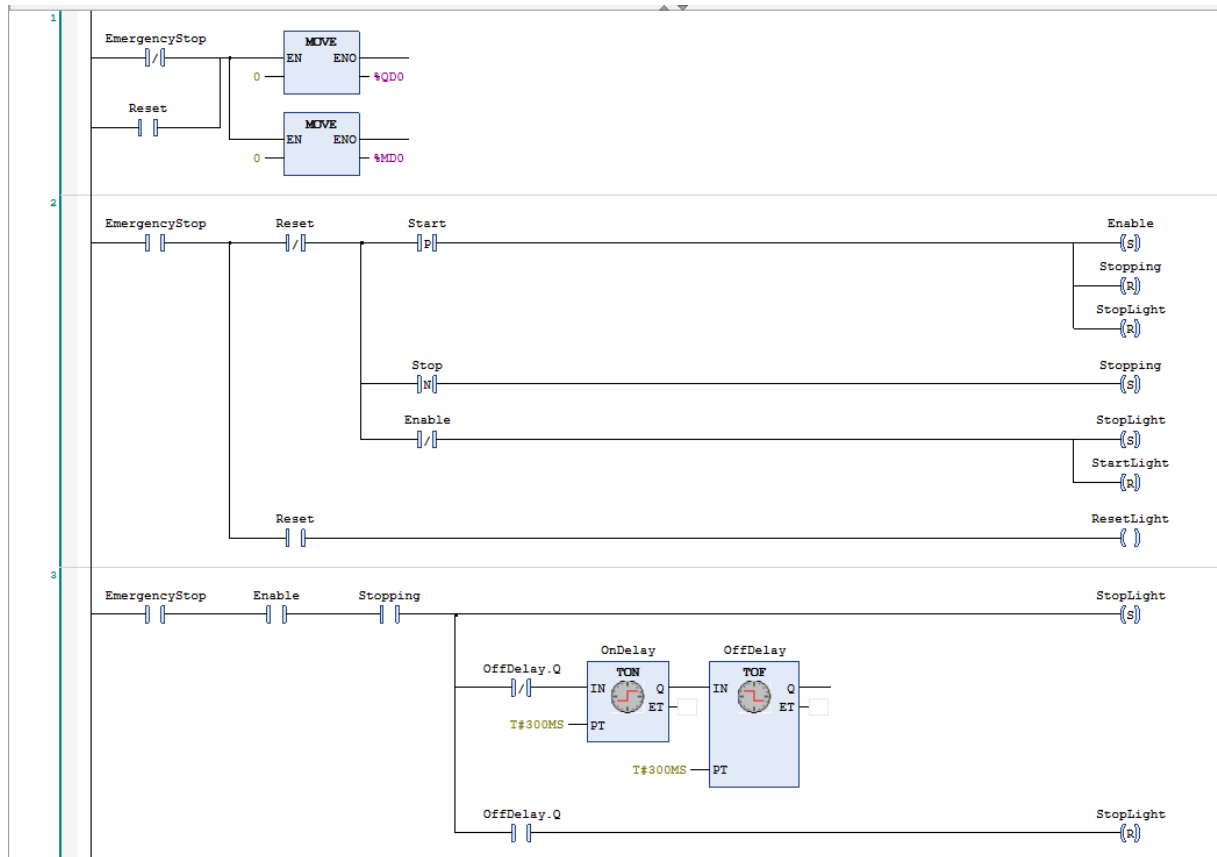
Rung 1 — Inicialização do sistema: ao acionar o botão *Reset* ou detectar o sinal de *EmergencyStop*, o bloco MOVE zera os registros %QD0 e %MD0, garantindo que todas as

saídas e variáveis internas sejam reiniciadas para um estado seguro antes do início da operação, conforme demonstrado na Figura 37.

Rung 2 — Habilitação e sinalização do sistema: a borda de subida do botão *Start*, condicionada à presença de *EmergencyStop* e *Reset*, aciona o bit *Enable* e desliga *Stopping* e *StopLight*. A borda de descida de *Stop* ativa *Stopping* e *StopLight*, enquanto desabilita *Enable*. O botão *Reset* atualiza o sinal *ResetLight*, conforme demonstrado na Figura 37.

Rung 3 — Controle da sinalização de parada com temporização: condicionado a *EmergencyStop*, *Enable* e *Stopping*, este rung implementa um pulso de sinalização utilizando os temporizadores *OnDelay* (TON) e *OffDelay* (TOF), ambos com tempo de 300 ms, ativando e desativando *StopLight* de forma intermitente para indicar o estado de parada ao operador, conforme demonstrado na Figura 37.

Figura 37 – Rung 1 a 3: inicialização, habilitação do sistema e controle da sinalização luminosa.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

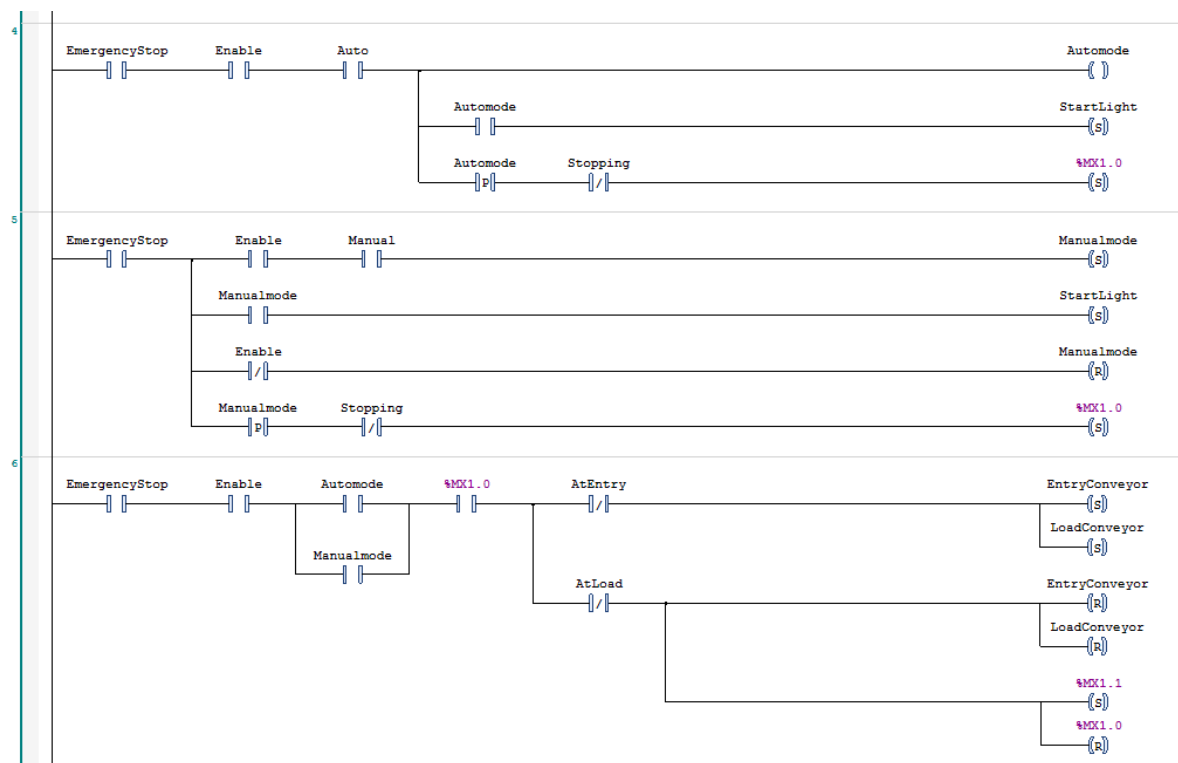
Rung 4 — Seleção do modo automático: condicionado a *EmergencyStop* e *Enable*, o contato *Auto* ativa o bit *Automode* e aciona *StartLight*. A borda de subida de *Automode*, sem *Stopping*, ativa o bit interno *%MX1.0*, dando início à sequência automática de operação, conforme demonstrado na Figura 38.

Rung 5 — Seleção do modo manual: de forma análoga ao rung anterior, o contato

Manual ativa *Manualmode* e *StartLight*. A ausência de *Enable* desativa *Manualmode*, e a borda de subida de *Manualmode* sem *Stopping* ativa o bit $\%MX1.0$, iniciando a sequência em modo manual, conforme demonstrado na Figura 38.

Rung 6 — Acionamento das esteiras de entrada: condicionado a *EmergencyStop*, *Enable* e ao modo selecionado (*Automode* ou *Manualmode*), este rung aciona *EntryConveyor* e *LoadConveyor* enquanto o paleta não estiver na posição de entrada (*AtEntry* negado). Ao detectar o paleta em *AtLoad*, as esteiras são desligadas e o bit $\%MX1.1$ é ativado para avançar à próxima etapa, conforme demonstrado na Figura 38.

Figura 38 – Rung 4 a 6: seleção de modo automático/manual e acionamento das esteiras de entrada.



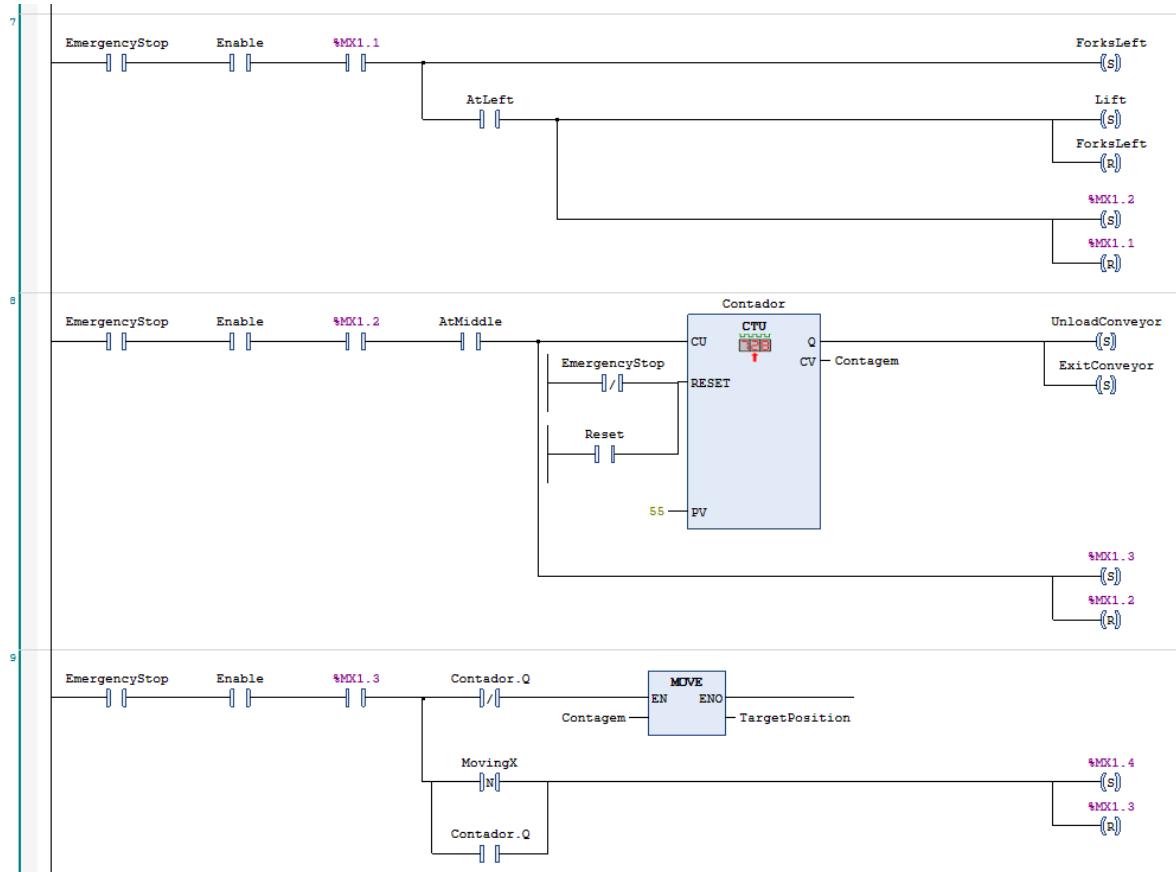
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Rung 7 — Acionamento das garras e elevação: com $\%MX1.1$ ativo, o sistema aciona *ForksLeft* e *Lift* para capturar o paleta. Ao confirmar o posicionamento em *AtLeft*, as garras são desligadas e os bits $\%MX1.2$ e $\%MX1.1$ são atualizados para prosseguir à etapa seguinte, conforme demonstrado na Figura 39.

Rung 8 — Contagem de ciclos e acionamento das esteiras de saída: com $\%MX1.2$ ativo e o paleta em *AtMiddle*, o bloco contador CTU incrementa a variável *Contagem* a cada ciclo, com valor máximo configurado em 55. Simultaneamente, *UnloadConveyor* e *ExitConveyor* são acionados, e o bit $\%MX1.3$ é ativado para avançar ao posicionamento final, conforme demonstrado na Figura 39.

Rung 9 — Envio da posição de destino: com %MX1.3 ativo, o valor acumulado em *Contagem* é transferido via bloco MOVE para o registro *TargetPosition*, definindo numericamente a posição de armazenamento no transelevador. A borda de descida de *MovingX* confirma o fim do deslocamento, ativando %MX1.4, conforme demonstrado na Figura 39.

Figura 39 – Rung 7 a 9: controle das garras, contador de ciclos e definição da posição de destino.

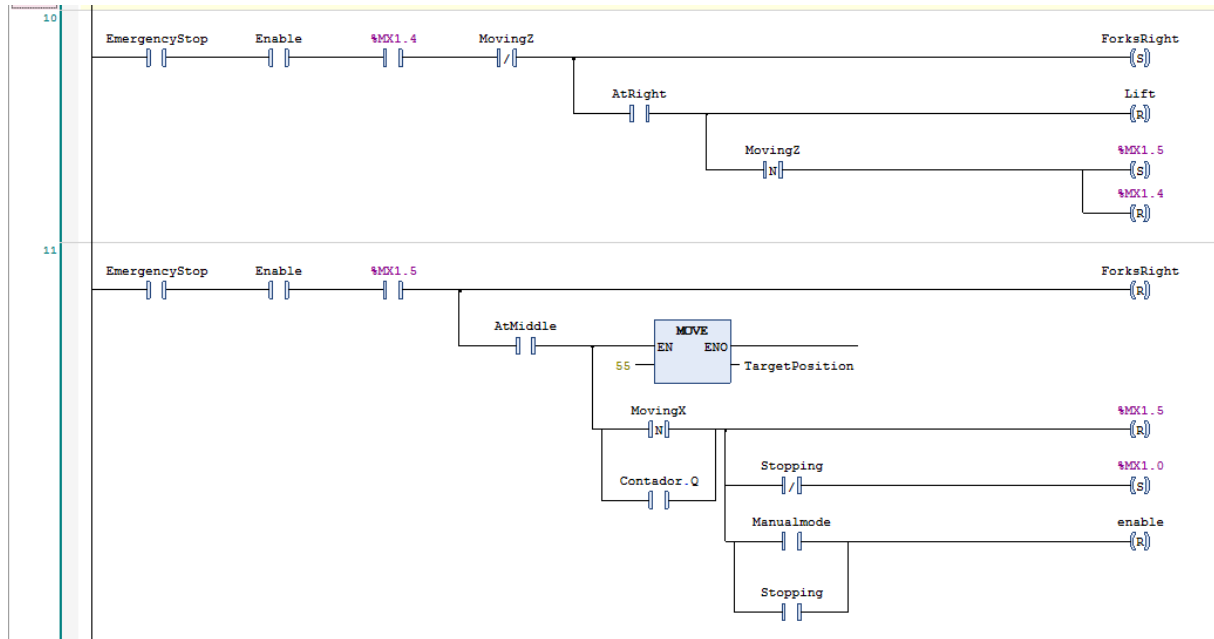


Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Rung 10 — Deposição do palete: com %MX1.4 ativo e *MovingZ* inativo, *ForksRight* é acionado para depositar o paleta na prateleira. A confirmação em *AtRight* desativa *Lift*, e a borda de descida de *MovingZ* ativa %MX1.5 para a etapa final, conforme demonstrado na Figura 40.

Rung 11 — Retorno ao estado inicial: com %MX1.5 ativo e o paleta em *AtMiddle*, o valor 55 é carregado em *TargetPosition* via MOVE para retornar o transelevador à posição inicial. A borda de descida de *MovingX* e o atingimento do limite do contador reiniciam %MX1.0, completando o ciclo de armazenamento, conforme demonstrado na Figura 40.

Figura 40 – Rung 10 a 11: movimentação horizontal, posicionamento final e retorno ao estado inicial.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.2.2 Centro de usinagem

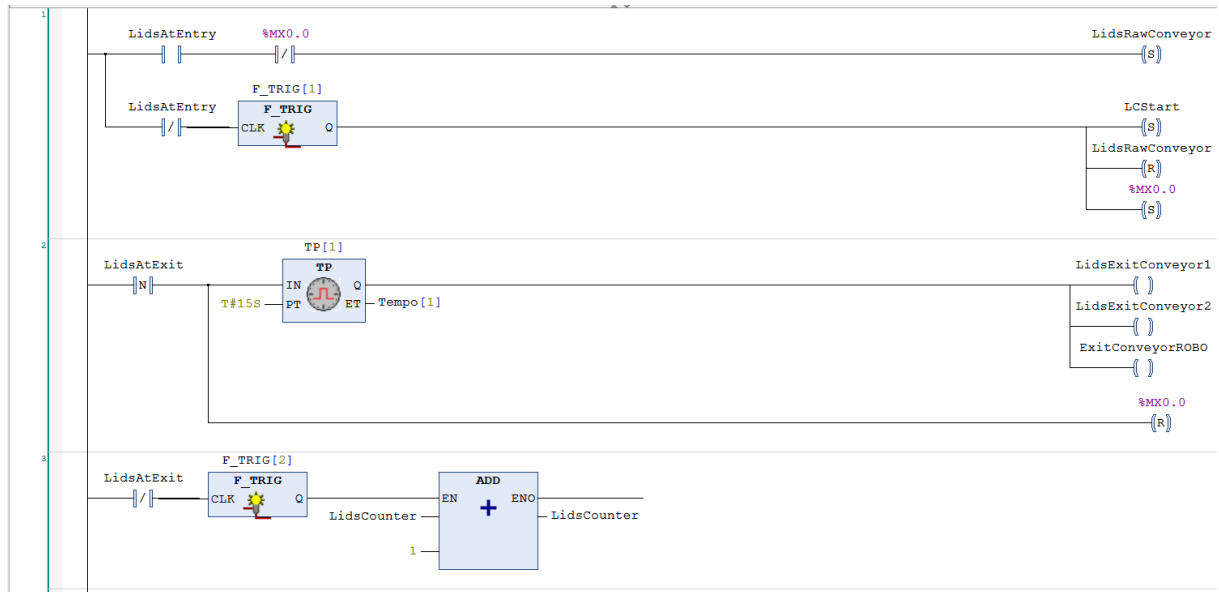
O programa de controle do centro de usinagem foi desenvolvido e estruturado em 6 rungs responsáveis pelo gerenciamento do fluxo de tampas e bases entre as células de usinagem.

Rung 1 — Acionamento do centro de tampas: enquanto *LidsAtEntry* estiver ativo e o bit %MX0.0 inativo, a esteira bruta *LidsRawConveyor* é acionada para transportar as tampas até o centro de usinagem. A borda de descida de *LidsAtEntry*, detectada pelo bloco *F_TRIG[1]*, aciona *LCStart*, desliga *LidsRawConveyor* e ativa o bit %MX0.0, sinalizando que o processo de usinagem das tampas foi iniciado, conforme demonstrado na Figura 41.

Rung 2 — Temporização e saída das tampas: a borda de descida de *LidsAtExit*, detectada pela instrução *|N|*, dispara o temporizador de pulso *TP[1]* com duração de 15 segundos. Durante esse período, as esteiras *LidsExitConveyor1*, *LidsExitConveyor2* e *ExitConveyorROBO* são acionadas para transportar as tampas processadas para fora da célula. Ao término do tempo, o bit %MX0.0 é resetado, liberando o centro para um novo ciclo, conforme demonstrado na Figura 41.

Rung 3 — Contagem de tampas produzidas: a borda de descida de *LidsAtExit*, detectada pelo bloco *F_TRIG[2]*, aciona o bloco *ADD* que incrementa em 1 unidade o registro *LidsCounter*, mantendo o rastreamento da quantidade de tampas processadas ao longo da operação, conforme demonstrado na Figura 41.

Figura 41 – Rungs 1 a 3 — Controle do centro de usinagem de tampas: acionamento, temporização de saída e contagem de produção.



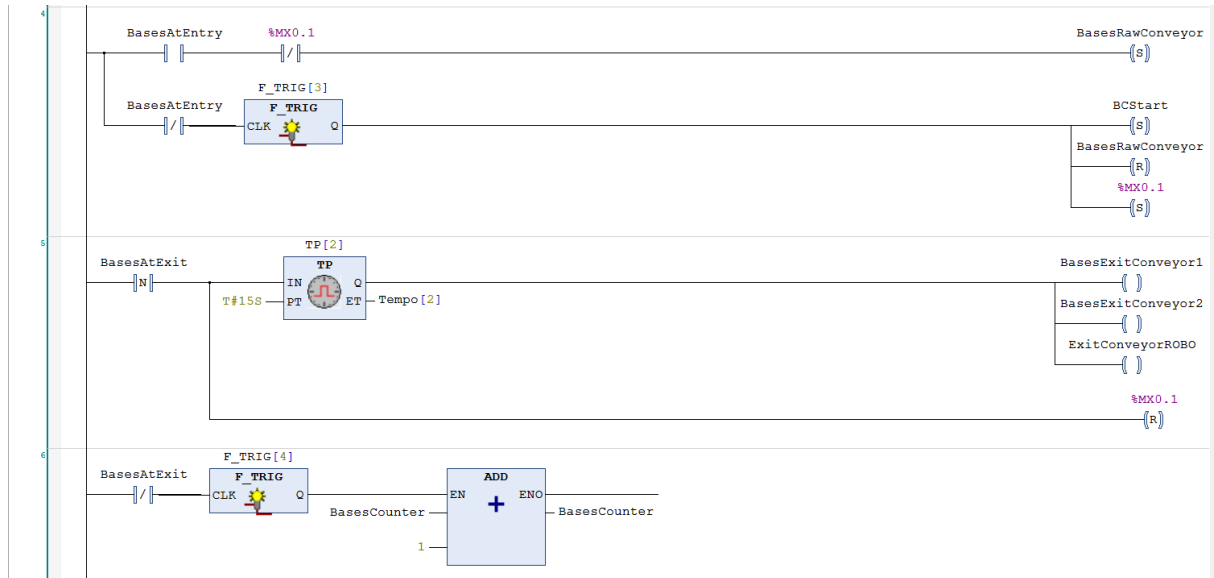
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Rung 4 — Acionamento do centro de bases: de forma análoga ao Rung 1, enquanto *BasesAtEntry* estiver ativo e o bit %MX0.1 inativo, a esteira *BasesRawConveyor* transporta as bases até o centro de usinagem. A borda de descida de *BasesAtEntry*, detectada pelo bloco *F_TRIG[3]*, aciona *BCStart*, desliga *BasesRawConveyor* e ativa o bit %MX0.1, conforme demonstrado na Figura 42.

Rung 5 — Temporização e saída das bases: a borda de descida de *BasesAtExit* dispara o temporizador *TP[2]* com duração de 15 segundos, acionando *BasesExitConveyor1*, *BasesExitConveyor2* e *ExitConveyorROBO* para o escoamento das bases processadas. Ao término, o bit %MX0.1 é resetado, conforme demonstrado na Figura 42.

Rung 6 — Contagem de bases produzidas: a borda de descida de *BasesAtExit*, detectada pelo bloco *F_TRIG[4]*, aciona o bloco ADD que incrementa em 1 unidade o registro *BasesCounter*, registrando a quantidade de bases processadas pelo centro de usinagem, conforme demonstrado na Figura 42.

Figura 42 – Rungs 4 a 6 — Controle do centro de usinagem de bases: acionamento, temporização de saída e contagem de produção.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.2.3 Separador de matéria-prima

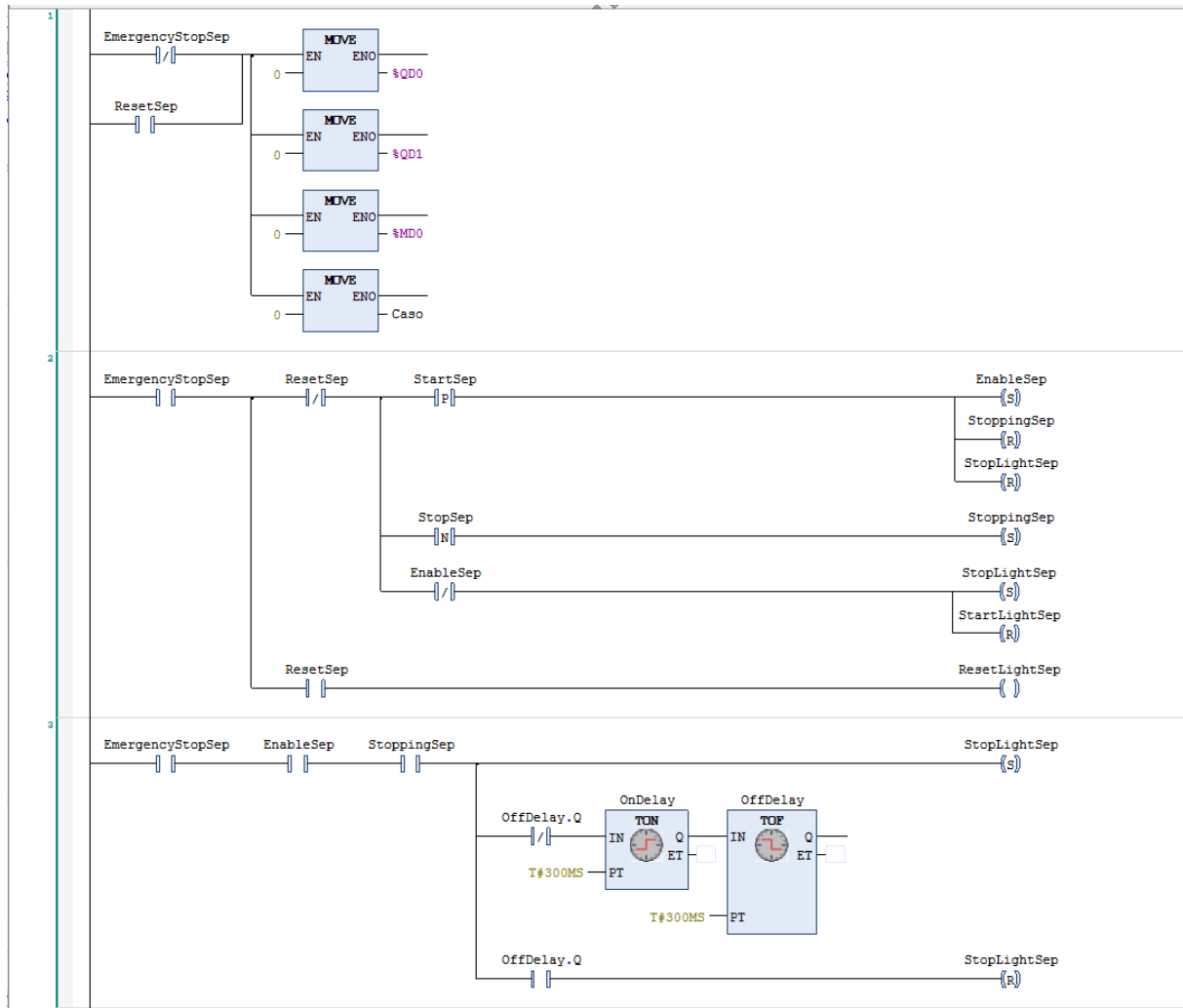
O programa de controle da Cena 21 foi desenvolvido e estruturado em 18 rungs responsáveis pelo gerenciamento do sistema de separação de produtos por sensor de visão.

Rung 1 — Inicialização do sistema: ao acionar *EmergencyStopSep* ou *ResetSep*, quatro blocos MOVE zeram simultaneamente os registros %QD0, %QD1, %MD0 e a variável *Caso*, garantindo que todas as saídas, variáveis internas e o caso de classificação sejam reiniciados para um estado seguro, conforme demonstrado na Figura 43.

Rung 2 — Habilitação e sinalização do sistema: a borda de subida de *StartSep*, condicionada a *EmergencyStopSep* e *ResetSep*, ativa *EnableSep* e desliga *StoppingSep* e *StopLightSep*. A borda de descida de *StopSep* ativa *StoppingSep* e *StopLightSep*, enquanto desabilita *EnableSep*. O botão *ResetSep* atualiza *ResetLightSep*, conforme demonstrado na Figura 43.

Rung 3 — Temporização da sinalização de parada: condicionado a *EmergencyStopSep*, *EnableSep* e *StoppingSep*, este rung implementa um pulso intermitente em *StopLightSep* utilizando os temporizadores *OnDelay* (TON) e *OffDelay* (TOF), ambos com tempo de 300 ms, sinalizando visualmente o estado de parada ao operador, conforme demonstrado na Figura 43.

Figura 43 – Rungs 1 a 3 — Inicialização, habilitação do sistema e temporização da sinalização de parada — Separador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Rung 4 — Seleção do modo automático: condicionado a *EmergencyStopSep* e *EnableSep*, o contato *AutoSep* ativa *AutomodeSep* e aciona *StartLightSep*. A borda de subida de *AutomodeSep* sem *StoppingSep* ativa o bit *%MX5.0*, iniciando a sequência automática de separação, conforme demonstrado na Figura 44.

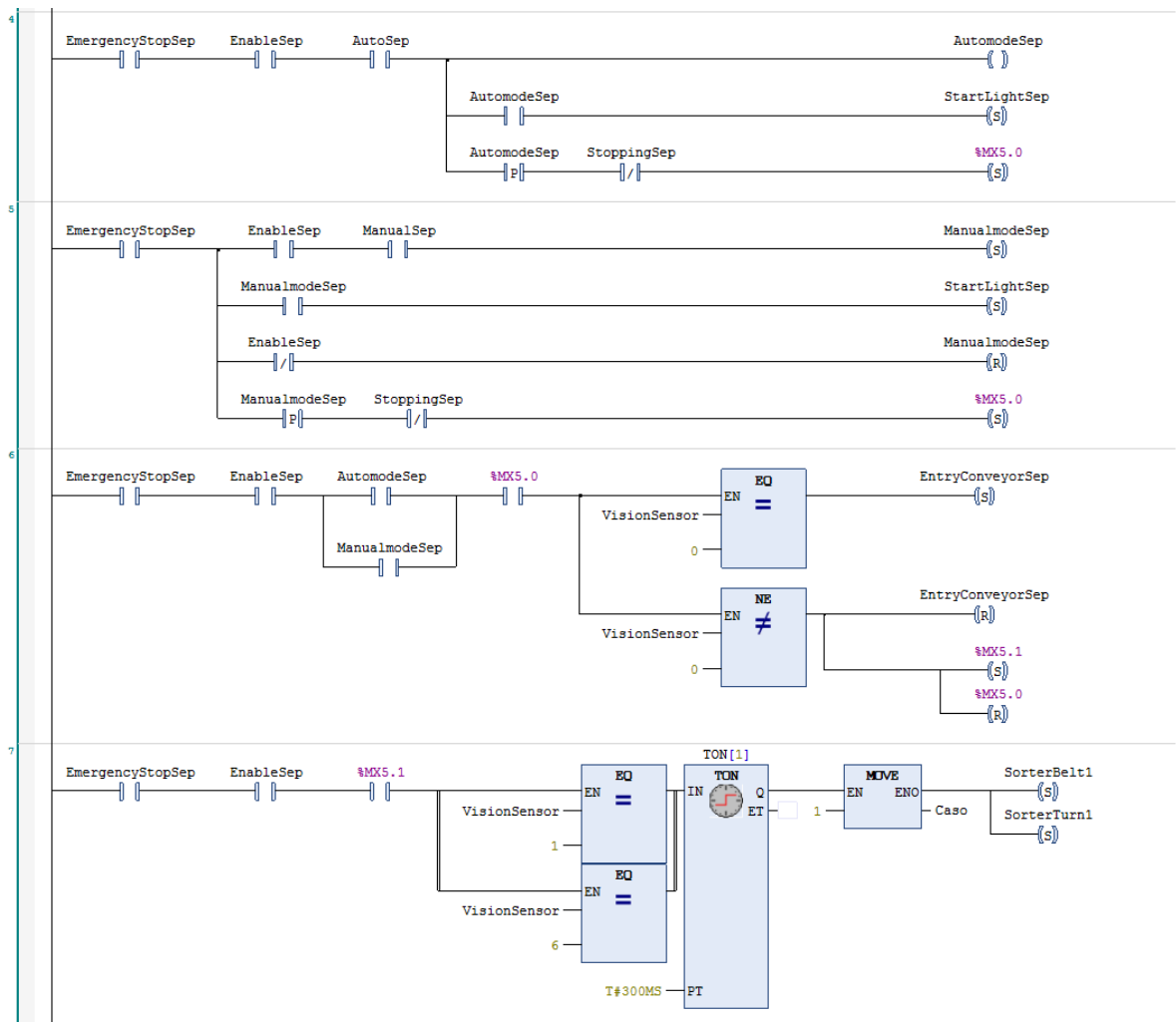
Rung 5 — Seleção do modo manual: de forma análoga, o contato *ManualSep* ativa *ManualmodeSep* e *StartLightSep*. A ausência de *EnableSep* desativa *ManualmodeSep*, e a borda de subida de *ManualmodeSep* sem *StoppingSep* ativa o bit *%MX5.0*, conforme demonstrado na Figura 44.

Rung 6 — Leitura do sensor de visão e acionamento da esteira de entrada: condicionado a *EmergencyStopSep*, *EnableSep*, modo selecionado e bit *%MX5.0* ativo, o bloco EQ verifica se *VisionSensor* é igual a zero. Caso verdadeiro, *EntryConveyorSep* é acionada para transportar o produto. Caso o sensor retorne valor diferente de zero (bloco NE), *EntryConveyorSep* é

desligada, %MX5.1 é ativado e %MX5.0 é resetado, avançando para a etapa de classificação, conforme demonstrado na Figura 44.

Rung 7 — Classificação para a via 1: com %MX5.1 ativo, o bloco EQ verifica se *VisionSensor* é igual a 1 ou 6. Caso verdadeiro, após temporização de 300 ms pelo bloco TON[1], o bloco MOVE carrega o valor 1 em *Caso* e aciona *SorterBelt1* e *SorterTurn1*, direcionando o produto para a primeira via classificadora, conforme demonstrado na Figura 44.

Figura 44 – Rungs 4 a 7 — Seleção de modo de operação, leitura do sensor de visão e classificação para a via 1 — Separador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Rung 8 — Classificação para a via 2: com %MX5.1 ativo, o bloco EQ verifica se *VisionSensor* é igual a 4 ou 5. Após temporização de 300 ms, o bloco MOVE carrega o valor 2 em *Caso* e aciona *SorterBelt2* e *SorterTurn2*, direcionando o produto para a segunda via, conforme demonstrado na Figura 45.

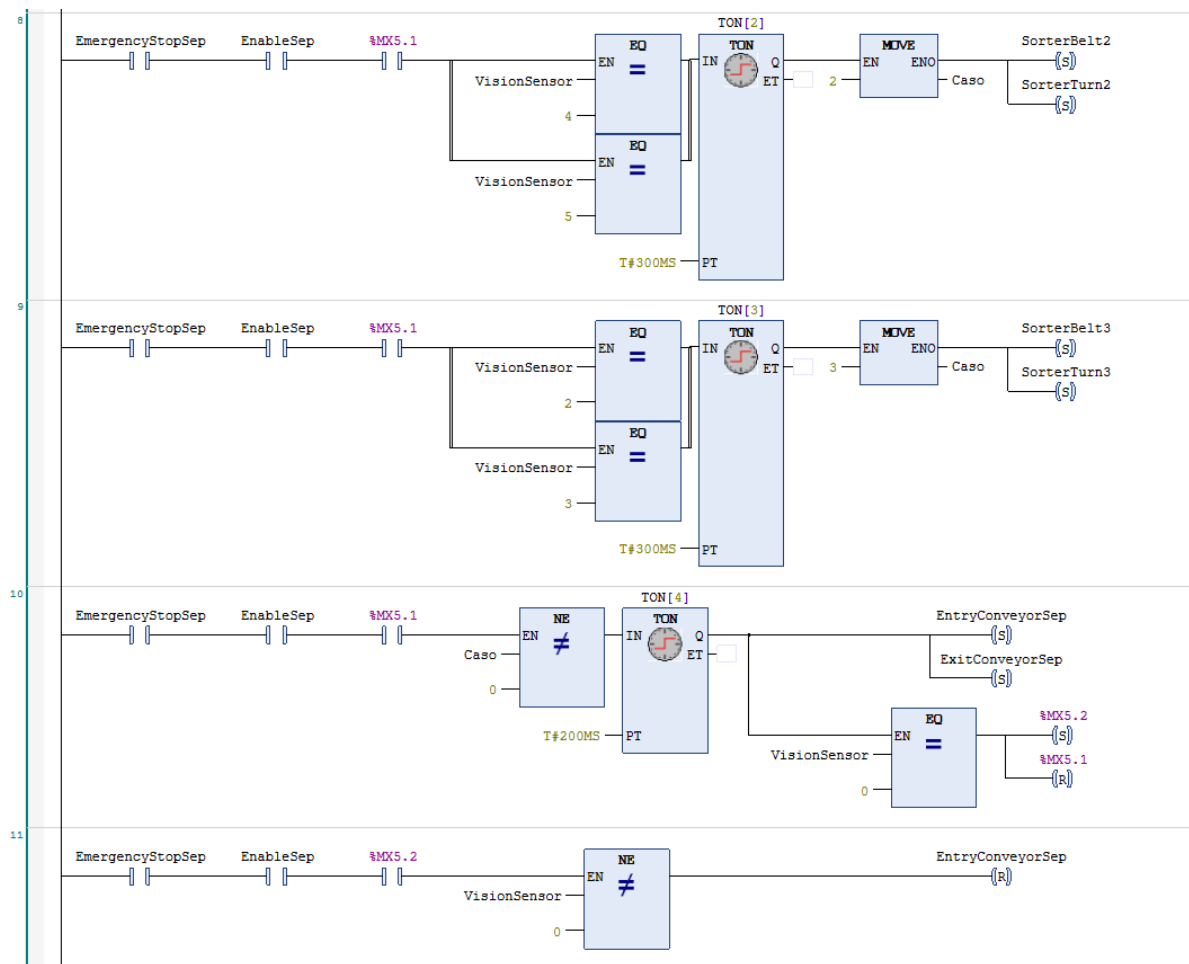
Rung 9 — Classificação para a via 3: com %MX5.1 ativo, o bloco EQ verifica se *VisionSensor* é igual a 2 ou 3. Após temporização de 300 ms, o bloco MOVE carrega o valor 3 em

Caso e aciona *SorterBelt3* e *SorterTurn3*, direcionando o produto para a terceira via, conforme demonstrado na Figura 45.

Rung 10 — Avanço após classificação: com $\%MX5.1$ ativo e *Caso* diferente de zero (bloco NE), o temporizador TON[4] com 200 ms aciona *EntryConveyorSep* e *ExitConveyorSep*. Simultaneamente, o bloco EQ verifica se *VisionSensor* é zero para ativar $\%MX5.2$ e resetar $\%MX5.1$, avançando à etapa de desligamento dos classificadores, conforme demonstrado na Figura 45.

Rung 11 — Desligamento da esteira de entrada: com $\%MX5.2$ ativo e *VisionSensor* diferente de zero (bloco NE), *EntryConveyorSep* é desligada, impedindo a entrada de novos produtos durante o escoamento do item classificado, conforme demonstrado na Figura 45.

Figura 45 – Rungs 8 a 11 — Classificação para as vias 2 e 3, avanço após classificação e desligamento da esteira de entrada — Separador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Rung 12 — Desligamento do classificador 1: com $\%MX5.2$ ativo, *Caso* igual a 1 e borda de descida de *AtExitSep* detectada pelo bloco *F_TRIG[1]*, as saídas *SorterTurn1*, *SorterBelt1* e *EntryConveyorSep* são desligadas, sinalizando que o produto foi escoado pela via 1, conforme

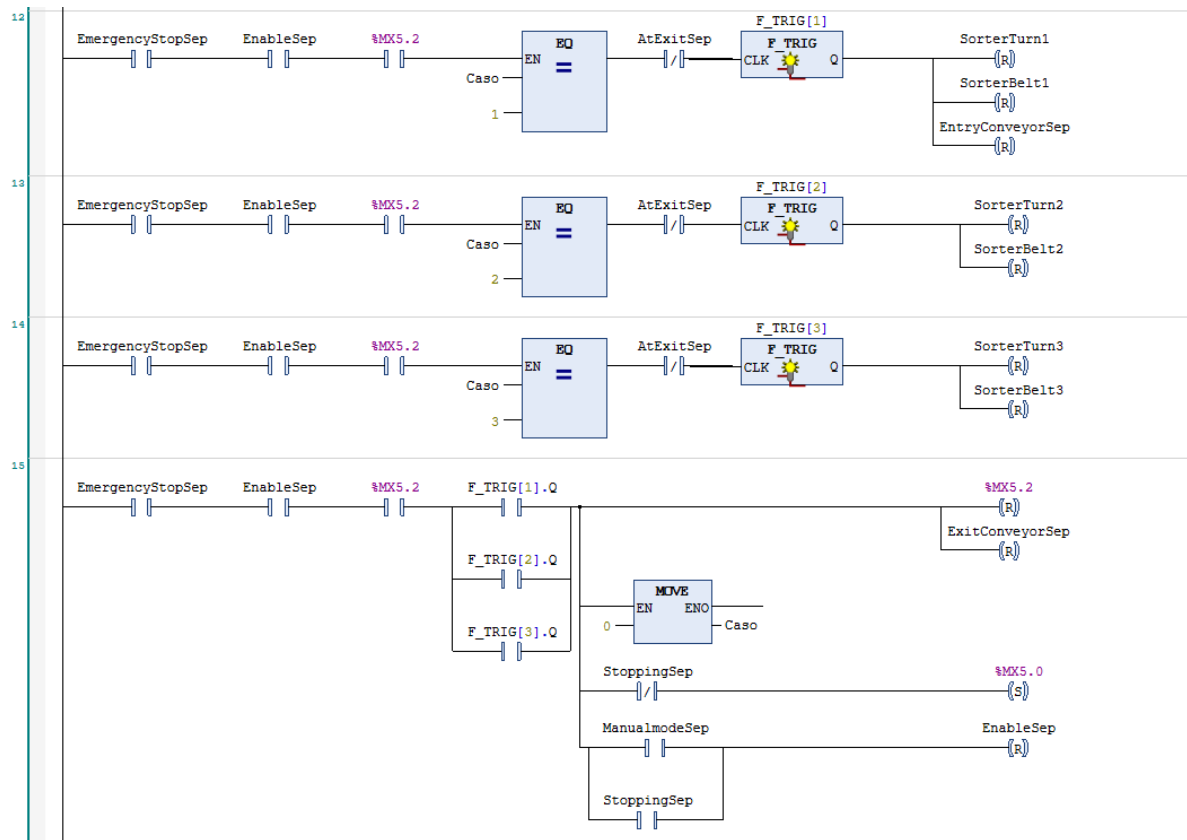
demonstrado na Figura 46.

Rung 13 — Desligamento do classificador 2: de forma análoga, com *Caso* igual a 2 e borda de descida de *AtExitSep* pelo bloco *F_TRIG[2]*, *SorterTurn2* e *SorterBelt2* são desligados, conforme demonstrado na Figura 46.

Rung 14 — Desligamento do classificador 3: com *Caso* igual a 3 e borda de descida de *AtExitSep* pelo bloco *F_TRIG[3]*, *SorterTurn3* e *SorterBelt3* são desligados, conforme demonstrado na Figura 46.

Rung 15 — Retorno ao estado inicial: após a confirmação de qualquer um dos três *F_TRIG*, o bloco MOVE zera a variável *Caso*, *%MX5.2* é resetado e *ExitConveyorSep* é desligada. Caso não haja *StoppingSep*, *%MX5.0* é reativado para iniciar um novo ciclo. Em modo manual, *EnableSep* é desligado, conforme demonstrado na Figura 46.

Figura 46 – Rungs 12 a 15 — Desligamento dos classificadores por via e retorno ao estado inicial — Separador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

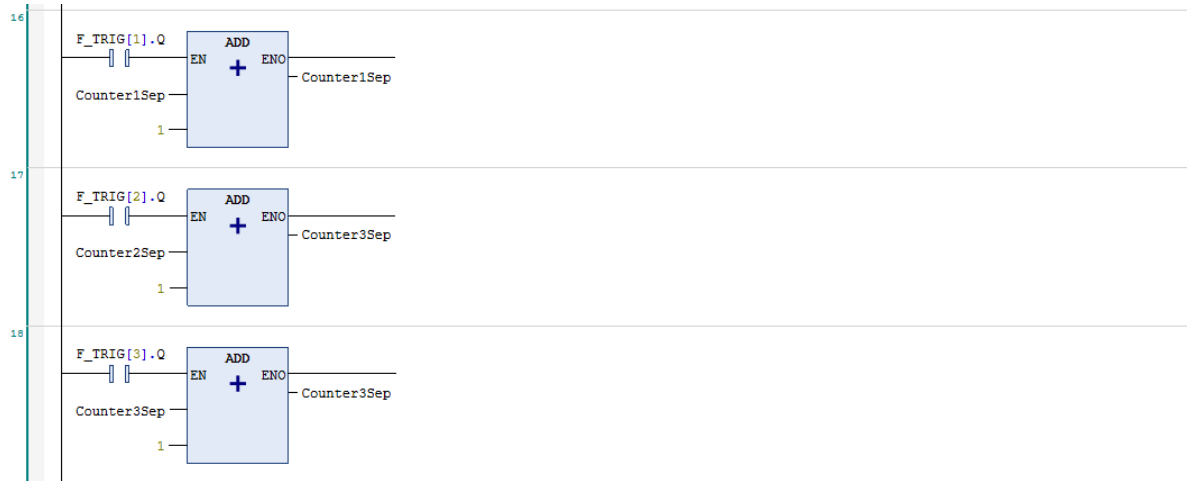
Rung 16 — Contagem de produtos pela via 1: a saída *F_TRIG[1].Q* aciona o bloco **ADD** que incrementa em 1 unidade o registro *Counter1Sep*, contabilizando os produtos separados pela primeira via, conforme demonstrado na Figura 47.

Rung 17 — Contagem de produtos pela via 2: a saída *F_TRIG[2].Q* aciona o bloco

ADD que incrementa em 1 unidade o registro *Counter2Sep*, contabilizando os produtos separados pela segunda via, conforme demonstrado na Figura 47.

Rung 18 — Contagem de produtos pela via 3: a saída $F_TRIG[3].Q$ aciona o bloco ADD que incrementa em 1 unidade o registro *Counter3Sep*, contabilizando os produtos separados pela terceira via, conforme demonstrado na Figura 47.

Figura 47 – Rungs 16 a 18 — Contagem de produtos separados por via — Separador.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

4.3 Discussão dos resultados

Os resultados obtidos por meio da simulação integrada das três cenas no Factory I/O demonstraram que a arquitetura de controle desenvolvida no CODESYS V3.5 atende satisfatoriamente aos requisitos funcionais estabelecidos no projeto conceitual do carro de transferência automatizado.

No que se refere ao sistema de movimentação e posicionamento, representado pela seção de armazenamento, a lógica de controle executou corretamente as rotinas de deslocamento, posicionamento preciso e armazenamento automatizado dos paletes, com paradas repetitivas nas posições configuradas e transferência correta do valor de destino via registro analógico *TargetPosition*. Esse comportamento é diretamente análogo ao funcionamento previsto para o carro de transferência real, onde o sensor de distância a laser DL100 desempenha papel equivalente ao monitoramento de posição realizado pelo transelevador na simulação.

Em relação ao centro de usinagem, o sistema gerenciou corretamente o fluxo de tampas e bases entre as células, com temporização adequada das etapas de entrada, processamento e saída, além do registro contínuo da produção via contadores *LidsCounter* e *BasesCounter*. Esse resultado valida a capacidade do controlador de gerenciar múltiplos atuadores e sensores simultaneamente, conforme exigido em ambientes industriais reais.

Quanto ao sistema separador, a lógica de classificação baseada na leitura analógica do *VisionSensor* operou corretamente, direcionando cada produto para a via correspondente por meio das saídas *SorterTurn* e *SorterBelt*, com contagem individualizada por via. Esse resultado demonstra a capacidade do sistema de processar sinais analógicos e tomar decisões de controle em tempo real, alinhado aos princípios da automação industrial moderna.

De forma geral, a simulação confirmou a viabilidade técnica do projeto conceitual proposto, demonstrando que a arquitetura de controle desenvolvida é capaz de atender aos requisitos de movimentação, segurança e rastreabilidade estabelecidos nos objetivos do trabalho. A integração das três cenas em um único ambiente de simulação com comunicação via Modbus TCP/IP evidenciou ainda a escalabilidade da solução, indicando que o sistema pode ser expandido para cenários industriais de maior complexidade sem necessidade de reestruturação significativa da lógica de controle.

5 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho apresentou o desenvolvimento de um projeto conceitual de um carro de transferência automatizado com inteligência embarcada, destinado à movimentação interna de materiais em ambientes industriais. A proposta foi fundamentada nos princípios da automação industrial, segurança de máquinas e Indústria 4.0, integrando tecnologias como controladores lógicos programáveis, sensores de posicionamento, scanners laser de segurança, interfaces homem-máquina e sistemas de comunicação industrial.

Ao longo do desenvolvimento, foram realizados o levantamento dos requisitos técnicos e normativos, a seleção dos principais componentes do sistema, a modelagem da arquitetura de controle e a validação funcional por meio de simulação utilizando o ambiente CODESYS V3.5 integrado ao software Factory I/O através do protocolo Modbus TCP/IP.

Os resultados obtidos demonstraram que a lógica de controle desenvolvida foi capaz de executar corretamente as rotinas de movimentação, posicionamento, classificação e armazenamento previstas no projeto. A estratégia de desaceleração progressiva apresentou comportamento adequado, garantindo paradas precisas e repetitivas, enquanto os intertravamentos implementados contribuíram para a segurança operacional do sistema. Além disso, a integração entre as diferentes cenas simuladas permitiu validar a capacidade do controlador em gerenciar múltiplos processos simultaneamente, mantendo a estabilidade da comunicação e a confiabilidade das operações.

Os objetivos propostos foram atingidos de forma satisfatória. O projeto demonstrou a viabilidade técnica da utilização de um carro de transferência automatizado com inteligência embarcada como alternativa para redução da intervenção humana em operações de movimentação de materiais, contribuindo para o aumento da segurança, da padronização dos processos e da eficiência operacional.

Sob a perspectiva acadêmica, o trabalho consolidou conhecimentos relacionados à automação industrial, programação de CLPs, sistemas de supervisão, comunicação industrial e segurança de máquinas, servindo como base para futuros desenvolvimentos experimentais e aplicações industriais. A característica modular da solução proposta possibilita sua adaptação para diferentes cenários produtivos, ampliando seu potencial de utilização.

Por fim, conclui-se que a utilização de ferramentas de comissionamento virtual e gêmeos digitais mostrou-se uma estratégia eficiente para validação de projetos de automação, reduzindo riscos de implementação e fornecendo subsídios técnicos para futuras etapas de desenvolvimento em ambiente real.

REFERÊNCIAS

- 3S-Smart Software Solutions. *CODESYS V3.5: Manual de programação*. Kempten, 2023. Acesso em: abr. 2025. Disponível em: <<https://www.codesys.com>>. Citado 11 vezes nas páginas 22, 23, 24, 25, 26, 27, 33, 34, 36, 37 e 38.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **ABNT NBR ISO 12100: Segurança de máquinas — Princípios gerais de projeto — Avaliação e redução de riscos**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 16, 27 e 37.
- BUER, S.-V.; STRANDHAGEN, J. O.; CHAN, F. T. S. The link between industry 4.0 and lean manufacturing: mapping current research and establishing a research agenda. **International Journal of Production Research**, v. 59, n. 16, p. 4969–4992, 2021. Citado na página 18.
- GROOVER, M. P. **Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing**. [S.l.]: Pearson, 2008. Citado na página 18.
- International Electrotechnical Commission. **IEC 61131-3: Programmable controllers — Part 3: Programming languages**. Geneva: IEC, 2013. Citado 4 vezes nas páginas 19, 25, 27 e 33.
- _____. **IEC 61496-1: Safety of machinery — Electro-sensitive protective equipment — Part 1: General requirements and tests**. Geneva: IEC, 2020. Citado 4 vezes nas páginas 16, 27, 36 e 37.
- International Organization for Standardization. **ISO 3691-6: Industrial trucks — Safety requirements and verification — Part 6: Burden carriers**. Geneva: ISO, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- KRITZINGER, W.; KARNER, M.; TRAUTNER, G.; THOBEN, K.-D.; HUESKE, W. Digital twin in manufacturing: A categorical literature review and classification. **IFAC-PapersOnLine**, Elsevier, v. 51, n. 11, p. 1016–1022, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 16 e 28.
- MATEUS, A. A. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia), **Desenvolvimento de interface homem-máquina para planta de manufatura virtual modelada por redes de Petri**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2022. Citado 4 vezes nas páginas 19, 20, 21 e 22.
- MAXSA. **Sensores indutivos tubular: Especificações técnicas**. 2025. Acesso em: abr. 2025. Disponível em: <<https://www.maxsa.com.br/produtos/sensores-indutivos-tubular/>>. Citado na página 35.
- Real Games. **Factory I/O v2.5.10: Manual do usuário**. Braga, 2023. Acesso em: abr. 2025. Disponível em: <<https://factoryio.com>>. Citado 8 vezes nas páginas 25, 26, 27, 28, 33, 37, 38 e 39.
- RODRIGUES, M. A.; BASTOS, P. S. **Controladores Lógicos Programáveis: fundamentos e aplicações**. São Paulo: Érica, 2020. Citado na página 26.
- SICK. **DL100: Sensor de distância a laser — Manual do produto**. Waldkirch, 2023. Acesso em: abr. 2025. Disponível em: <<https://www.sick.com/br/pt/catalog/produtos/sensores-de-distancia/sensores-de-distancia-do-laser/dx100/dl100-22ha2213/p/p653439>>. Citado na página 34.

_____. **NanoScan3: Scanner laser de segurança — Manual do produto**. Waldkirch, 2023. Acesso em: abr. 2025. Disponível em: <<https://www.sick.com/br/pt/catalog/produtos/safety/scanner-a-laser-de-seguranca/nanoscan3/c/g507056>>. Citado 3 vezes nas páginas 35, 36 e 37.

Siemens. **SIMATIC S7-1500: Manual do produto**. Munique, 2023. Acesso em: abr. 2025. Disponível em: <<https://support.industry.siemens.com>>. Citado na página 18.

SILVA, R. de O. **Projeto de controle de um sistema de paletização para linha de produção de bebidas**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2024. Projeto de Graduação (Engenharia Elétrica) — Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Orientador: Gustavo da Silva Viana. Disponível em: <<http://www.repositorio.poli.ufrj.br/monografias/projpoli10043327.pdf>>. Citado 3 vezes nas páginas 19, 26 e 27.

ANEXO A – QR CODE - ARQUIVOS DA SIMULAÇÃO GITHUB

Figura 48 – Repositório arquivos da simulação.



Fonte: <https://github.com/PedroluzSilva/TCC—PROJETO-DE-AUTOMA-O-E-SIMULA-O-DE-UM-CARRO-DE-TRANSFER-NCIA-USANDO-FACTORY-I-O/tree/main>.