



**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Centro Tecnológico**  
**Departamento de Automação e Sistemas**

**Especificação de Hardware e Desenvolvimento de Software para  
Automação de Sistema de Baias de Teste com Shuttle Cart**

Kevin Brayan Mendes Martins

Florianópolis, Julho/ 2019

Kevin Brayan Mendes Martins

**Especificação de Hardware e Desenvolvimento de Software para Automação  
de Sistema de Baias de Teste com Shuttle Cart**

Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para aprovação na disciplina ***DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*** do curso de graduação em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Max Hering de Queiroz

Florianópolis

2019

Kevin Brayan Mendes Martins

**Especificação de Hardware e Desenvolvimento de Software para Automação  
de Sistema de Baias de Teste com Shuttle Cart**

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina e APROVADA na sua forma final pelo curso de **Engenharia de Controle e Automação**

Florianópolis, \_\_\_\_\_

---

Prof. Dr. Max Hering de Queiroz (Orientador)  
Departamento de Automação e Sistemas da Universidade Federal  
de Santa Catarina

---

Eng. José Martins (Orientador na Empresa)  
Control Master Automação

Florianópolis

2019

## AGRADECIMENTOS

Agradeço aos que estiveram presente durante a toda minha jornada na faculdade, em especial para:

Ao meu pai e orientador José Martins, à minha mãe Eliane Mendes e à minha irmã Katleen pelo apoio e base familiar.

Aos meus amigos de infância com quem mantenho grandes laços de amizade independente de quão grande a distância.

Aos amigos do curso de Engenharia de Controle e Automação. Entre eles: Guilherme Laercio e Igor Benincá, vizinhos por coincidência, companheiros do início ao fim pela afinidade e meu dia-a-dia em Florianópolis; Matheus Kraemer, junto em todas as etapas mais importantes e difíceis da graduação, sempre entusiasmado e crente com o sucesso.

À Max Hering de Queiroz pela orientação deste trabalho.

Finalmente, agradeço à toda turma de Engenharia de Controle e Automação.

## RESUMO

O projeto descrito no presente relatório é parte do desenvolvimento de um sistema de *Shuttle Cart*, junto à ControlMaster Automação, em uma das linhas de montagem de refrigeradores *Whirlpool*. Este sistema consiste na utilização de um carro de deslocamento capaz de transportar produtos até posições de teste, de forma a realizar testes obrigatórios e de longa duração sem comprometer a capacidade de produção da linha de montagem. Os focos do projeto são a especificação dos componentes de hardware e o desenvolvimento do software de controle. São apresentados os requisitos gerais, propostos pelo cliente, baseados em sistemas semelhantes já existentes, bem como em melhorias esperadas. Os requisitos funcionais são considerações e detalhes de funcionamento resultantes dos requisitos gerais. A especificação do hardware levou em conta o número de sinais de entrada e saída do sistema. Já a arquitetura de implementação proposta foi restrita pelos equipamentos desejados pelo cliente. O desenvolvimento do software partiu da análise dos componentes e subsistemas integrantes, sendo então realizada uma modelagem das estruturas de dados e das lógicas de controle de cada um. Finalmente, realizou-se a implementação do modelo obtido em *Ladder Diagram*. O sistema de baias de teste desenvolvido cumpre com os requisitos do cliente e está em funcionamento na linha de produção. O sucesso de implementação decorre em boa parte da qualidade das especificações de hardware e software de CLP desenvolvidos neste projeto.

**Palavras-chave:** linha de montagem, automação fixa, controlador lógico programável.

## ABSTRACT

This project is part of a Shuttle Cart system development, together with ControlMaster Automação, in one of the fridge assembly lines from *Whirlpool* company. This system consists of a car capable of transport products to test positions. As a result, multiple products can be tested in parallel without compromise the assembly line production capacity. This project focus on hardware specification and software development. General requirements from the client, based on existing similar systems, are shown, as well as expected improvements. Functional requirements are details about how the final system must run following the general requirements. Hardware specifications took into account the input and output signals quantity. The proposed implemented architecture was restricted by the client's desirable equipment. Software development started from component and compound subsystem analysis, then a data structure and control logic model for each one was accomplished. Finally, a implementation model has been obtained as Ladder Diagram. The implementation success justifies mainly because the great hardware and PLC software specifications quality in this project.

**Keywords:** assembly line, fixed automation, programmable logic controller.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Modelo de Linha de Produção com Cinco Estações de Trabalho com Buffers Intermediários.....	19
Figura 2	Modelo de Linha de Produção com Cinco Estações de Trabalho sem Buffers Intermediários.....	19
Figura 3	Pirâmide Industrial .....	21
Figura 4	Topologia de Rede em Estrela.....	23
Figura 5	Topologia de Rede em Anel .....	23
Figura 6	Topologia de Rede Linear .....	24
Figura 7	Ciclo de Scan de CLP. ....	25
Figura 8	Etapas do Modelo de Desenvolvimento de Software em Cascata .....	26
Figura 9	Layout do Sistema.....	29
Figura 10	Baias de Teste .....	30
Figura 11	Carro de Deslocamento .....	31
Figura 12	Sistema Parasita .....	33
Figura 13	Sistema Control Logix .....	41
Figura 14	Sistema IO Remoto .....	42
Figura 15	Adaptador Point I/O responsável pelos sinais das baias de teste. ....	43
Figura 16	Adaptador Point I/O responsável pelos sinais do Carro. ....	44
Figura 17	Proposta de Arquitetura para Integração do Sistema .....	45
Figura 18	Viabilidade da Arquitetura Proposta no Software Rockwell Integrated Architecture Builder (IAB).....	46
Figura 19	Autômato modelo do reset de presença lógica .....	50
Figura 20	Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo da Baia de Entrada e Gôndola de Entrada .....	51
Figura 21	Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo da Gôndola de Entrada para uma Baia de Teste.....	53
Figura 22	Autômato modelo de uma Baia de Teste.....	54
Figura 23	Autômato modelo de inserção e remoção na Fila de Produtos Testados...	55

Figura 24	Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo de uma Baia de Teste para a Gôndola de Saída .....	56
Figura 25	Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo do Carro de Deslocamento para a Baia de Saída.....	57
Figura 26	Configuração dos nodos de rede no ambiente integrado ao RSLogix5000. .	58
Figura 27	UDT Ciclo de Movimento .....	59
Figura 28	Lógica de Controle por Ciclos em Ladder .....	60
Figura 29	Lógica de Acionamento em Ladder .....	61



## LISTA DE TABELAS

Tabela 2	Entradas do sistema para cada Baia de Teste. ....	37
Tabela 3	Saídas do sistema para cada Baia de Teste. ....	38
Tabela 4	Entradas do sistema para cada uma das baias de entrada e saída. ....	38
Tabela 5	Saída do sistema para cada uma das baias de entrada e saída. ....	38
Tabela 6	Entradas do sistema para o carro. ....	40
Tabela 7	Saídas do sistema para o carro. ....	40

## ACRÔNIMOS

CIP	Common Industrial Protocol.
CLP	Controlador Lógico Programável.
CPU	CPU.
IAB	Rockwell Integrated Architecture Builder.
IHM	Interface Homem Máquina.
IP	Internet Protocol.
LOTO	Lockout-Tagout.
NR-12	Norma Regulamentadora em Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos.
STL	Structured Text Language.

## SUMÁRIO

1	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
2	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	14
2.1	Sistemas de Produção .....	14
2.2	Sistemas de Controle Industrial .....	17
2.3	Automação Industrial.....	20
2.4	Redes Industriais.....	22
2.5	Controladores Lógicos Programáveis .....	24
2.6	Modelo de Desenvolvimento em Cascata .....	26
3	<b>REQUISITOS DO SISTEMA</b> .....	28
3.1	Requisitos Gerais.....	28
3.2	Requisitos Funcionais .....	32
4	<b>ESPECIFICAÇÃO DE HARDWARE</b> .....	36
4.1	Sinais de Entrada e Saída .....	36
4.2	Hardware de Automação Existente .....	40
4.3	Hardware Adicionado .....	42
4.4	Proposta de Arquitetura .....	44
5	<b>DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE</b> .....	47
5.1	Estruturas de Dados .....	47
5.2	Estruturas de Controle .....	49
5.3	Configuração dos Módulos de Rede .....	57
5.4	<i>User-Defined Data Types</i> .....	58
5.5	Lógicas de Controle .....	59
5.6	Lógicas de Acionamentos .....	60
6	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	62

## 1 INTRODUÇÃO

A globalização da economia em países industrializados intensifica a concorrência por espaço de mercado entre as empresas, resultando numa permanente busca por maior qualidade de produtos e menores custos com bens e serviços. A competitividade, junto à crescente valorização da mão de obra no cenário mundial, fornecem motivação suficiente para automação e otimização de sistemas de produção (Castells, 2002). Como resultado, os sistemas produtivos estão, cada vez mais, nascendo alinhados com a sequência das atividades que criam valor maior ao produto final.

Esse cenário faz nascer a necessidade de sistemas de produção cada vez de maior produtividade e eficiência, capazes de atender às altas demandas. Procurando, assim, eliminar atividades desnecessárias e intensificar aquelas que agregam valor ao produto. No entanto, atividades de teste ou inspeção em todos os equipamentos sendo produzidos num sistema de produção, ao mesmo tempo que garantem valor ao cliente final, podem comprometer a produtividade da planta de produção. A implementação desses testes em linhas de produção em fluxo contínuo apresentam um desafio à automação.

A *Whirlpool Corporation* é uma companhia norte americana líder no mercado de eletrodomésticos mundial, conta com aproximadamente 92.000 funcionários e produz marcas tais como *Whirlpool*, *Brastemp*, *Consul* e *KitchenAid*. No Brasil a *Whirlpool* possui três unidades de produção e conta com quase 11.000 colaboradores. A maior unidade de produção fica em Joinville, contém duas fábricas e produz, em sua maior parte, refrigeradores domésticos.

Nas linhas de montagem de refrigeradores da *Whirlpool*, o teste de vácuo nos sistemas térmicos de cada produto é realizado durante a produção e pode ter duração maior que o fluxo da própria linha. Produtos com falhas neste subsistema podem chegar ao cliente final sem capacidade de refrigeração. Por este motivo, é importante o teste em todos os refrigeradores fabricados. Uma das soluções existentes é a utilização de sistema de *Shuttle Cart* para distribuição dos produtos em espaços de testes, baias, que podem ocorrer em paralelo.

As aplicações industriais com *Shuttle Cart* envolvem: o próprio *Shuttle Cart*, um carro de deslocamento linear guiado por trilhos e motorizado, com capacidade de posicionamento absoluto dentro do seu curso e; posições de carga e descarga onde o carro pode

receber ou descartar produtos que estejam em produção. Cada produto tem um trajeto (uma posição de saída e outra de destino) e cabe ao sistema atender estas requisições utilizando a capacidade de deslocamento do carro.

O desenvolvimento de um sistema com *Shuttle Cart* envolve desde a concepção do layout com a disposição mecânica dos equipamentos até a sintonização da malha de controle de posicionamento do carro. A integração e funcionamento de todas as partes é fundamental. A automação discreta, neste caso, é responsável por centralizar o controle sequencial e lógico da planta.

Este projeto foi desenvolvido junto à empresa *ControlMaster* Automação, uma empresa familiar de pequeno porte que atua no desenvolvimento de sistemas de controle discretos. A empresa desenvolve o projeto elétrico, coordena a instalação e desenvolve o software de controle, principalmente de linhas de montagem e transportadores industriais. Desde 1999, dentre os projetos desenvolvidos, encontram-se clientes como *General Motors*, *Whirlpool*, *Renault*, Klabin e Electrolux.

O objetivo geral deste projeto de fim de curso é especificar o hardware e desenvolver o software de controle para um sistema de *Shuttle Cart* em alteração em uma das linhas de montagem de refrigeradores da *Whirlpool*, de forma a atender as necessidades do cliente. Os objetivos específicos e funcionais são detalhes e restrições ao hardware e ao software.

Inicialmente, são avaliados todos os requisitos gerais provenientes da equipe de engenharia da *Whirlpool*, tais como o *layout* e alguns funcionamentos básicos de operação, já existentes em outros sistemas, que deveriam ser atendidos. Os requisitos funcionais devem ser gerados em conjunto com a empresa fabricante de todos os componentes mecânicos do sistema, considerando os detalhes de realização do *layout* definido.

A especificação do hardware é um estudo sobre as entradas e saídas do sistema, bem como, de uma análise do sistema já existente para controle da linha de montagem.

Este trabalho apresenta um breve estudo sobre sistemas de produção, linhas de montagem e automação no Capítulo 2, tomados como fundamento para uma análise dos requisitos gerais e funcionais do sistema, no Capítulo 3. Na sequência, o hardware é especificado para implementação no Capítulo 4 e o desenvolvimento do software é apresentado no Capítulo 5. Por fim, considerações finais sobre o trabalho feito e expectativas para trabalhos futuros são apresentados no Capítulo 6.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Sistemas de Produção

Segundo Groover (2007), um sistema de produção é o conjunto de pessoas, equipamentos e procedimentos de forma organizada e a garantir a execução das operações de manufatura e montagem dos produtos de uma companhia ou organização. Um sistema de produção é definido pela estrutura da fábrica em que está instalado, máquinas de produção e ferramental, equipamentos de inspeção e testes, sistemas de manuseio e transporte, bem como o sistema computadorizado para controle de operação.

O *layout* de uma planta de produção, isto é, a forma como os equipamentos estão fisicamente posicionados na fábrica e a posição de trabalho de cada operador também faz parte da definição do sistema de produção e é, frequentemente, referenciado como **sistema de manufatura**. É comum imaginar um sistema de manufatura como sendo um agrupamento de máquinas e células de trabalho como, por exemplo, uma **linha de produção**. (Groover, 2007)

Os sistemas de produção são muitos e cada fábrica se organiza e se projeta de forma a suportá-los. Classificam-se estes tipos de sistemas em duas categorias: sistemas de produção **contínuos**, predominantemente presente na indústria de processos, onde os produtos são usualmente líquidos ou gases e; os sistemas **discretos**, onde o produto final são objetos contáveis.

Este trabalho foi desenvolvido em uma linha de produção discreta de refrigeradores. Na mesma fábrica existem processos químicos de caráter contínuo, mas que, seus produtos servem como suprimento e matéria-prima para a linha de produção em massa de refrigeradores.

#### 2.1.1 Produção em Massa

Sistemas com alta capacidade de produção (desde 10.000 até milhões de unidades produzidas por ano) são chamados sistemas de produção em massa. Usualmente, fábricas com este tipo de produção tem dedicação quase total ou exclusiva à manufatura de um tipo de produto, de forma a atender à alta demanda existente. Duas categorias de produção em massa podem ser identificadas: **produção em quantidade**, na qual os produtos

são pequenas partes e peças como, por exemplo, parafusos; existe também a chamada **produção em fluxo de linha**, na qual se costuma ter quantidades menores de produção mas com nível alto de trabalho em cada produto como, por exemplo, a produção de eletrodomésticos. (Groover, 2007)

Segundo Groover (2007), linhas de produção em massa que se caracterizam pelo fluxo usualmente são compostas por múltiplas estações de trabalho posicionadas em sequência, nas quais o produto é movido fisicamente. Focadas na montagem, as linhas de fluxo se caracterizam pela sequência de trabalhos aos quais o produto precisa ser submetido para ficar completo. Em cada estação de trabalho nesta sequência pode existir um trabalho manual de um operador com ferramentas especializadas ou uma máquina. Todo o processo de produção é desenvolvido e pensado no produto que ali será produzido, de forma a garantir máxima eficiência. Como resultado de um *layout* de linha pensado no produto, a variedade e diversidade de produtos ali manufaturados são pequenas.

### 2.1.2 Automação em Sistemas de Produção

Alguns elementos e atividades praticadas no processo de produção fabril são passíveis e interessantes de serem automatizados, salvo os casos em que estas atividades precisam, necessariamente, ser feitas manualmente por causa de alguma restrição. A automação em linhas de montagem com produção em massa consiste, na maioria das vezes, da aplicação de tecnologias de cunho mecânico, elétrico e de sistemas computadorizado para operacionalização e controle.

A automação do processo de manufatura e montagem atua, de forma majoritária, fisicamente no produto que se produz. Permitindo, assim, que atividades de montagem, inspeção e manuseio sejam aperfeiçoadas e sejam executadas, por exemplo, mais rapidamente ou simultaneamente em uma mesma estação de trabalho. Nos casos em que se aplica a automação, tem-se como objetivo um nível reduzido de participação humana comparado com o respectivo processo realizado manualmente. Sistemas automatizados de manufatura são, por exemplo:

- Linhas de transferência e movimentação.
- Manipulação e armazenamento automático de materiais.
- Sistemas automáticos de inspeção para controle de qualidade.
- Utilização de robôs para execução de trabalhos de montagem.

Especialmente em linhas de montagem e produção em massa, é comum a utilização de sistemas de automação pouco flexíveis, nos quais o sequenciamento de operações é pré-determinados pelo *layout* da linha. Nomeiam-se sistemas de **automação fixa**, aqueles onde qualquer alteração e readequação precisa de reengenharia e custos substanciais. Justifica-se sua utilização em sistemas que requerem alta taxa de produção e apresentam baixa variedade de produto. (MacDuffie, 1996)

Segundo Groover (2007), a **automação fixa** ainda pode ser caracterizada como um sistema composto por operações em sequência, onde cada uma é, usualmente, simples. A coordenação e integração de muitas operações deste tipo em um único equipamento é o que torna esse tipo de sistema complexo. Por isso, cada sistema é projetado e desenvolvido de forma customizada, nascendo com custo de investimento alto mas justificado pela alta taxa de produção que é capaz. Linhas de transferência e linhas de montagem são exemplos deste tipo de sistema.

Num contexto geral de automação, não apenas para produção em massa, aplicar automação em processos e sistemas de produção tem um retorno tanto para o fabricante e seu produto quanto para o cliente. A automação aumenta a repetibilidade do processo, de forma a assegurar a qualidade do produto entregue ao cliente; reduz o custo de *lead time*, consequentemente, do processo; melhora a ergonomia e reduz os esforços do operador.

### 2.1.3 Operações em Manufatura

Além de operações que contribuem diretamente para a montagem e processamento do produto, outras operações também existem em linhas de montagem: manuseio e armazenamento de material, bem como, inspeção e testes.

O transporte, posicionamento e armazenamento de materiais entre as posições da linha de montagem nas quais é submetido à alguma operação é inevitável. De acordo com Groover (2007), os materiais passam mais tempo sendo transportados do que efetivamente processados. Desta forma, parte majoritária do custo do trabalho é relacionada à manipulação e transporte. Em casos extremos, não automatizados, 95 % do tempo de produção de um produto ou peça podem ser direcionados a esse propósito ou à espera. Essa noção do tempo evidencia a importância que este tipo de operação tem em fábricas e, o problema que uma linha de montagem automatizada com transportadores se propõe a solucionar.



Inspeção e testes são atividades de controle de qualidade. O propósito de uma inspeção é determinar quando o produto manufaturado está de acordo com os requisitos e padrões desejados. Por exemplo, examinar tolerâncias dimensionais.

Já os testes são realizados, geralmente, para determinar o funcionamento do produto finalizado ou de seus subsistemas componentes. Por exemplo, um teste final verifica se o produto opera da maneira que foi especificada pelo projetista de produtos.

## 2.2 Sistemas de Controle Industrial

Ainda em relação aos dois tipos de indústrias (de processos e de manufatura discreta) e, respectivamente, seus sistemas de produção **contínuos** ou **discretos**, cada sistema tem suas particularidades em relação ao seu controle.

Sistemas de controle industriais usados na indústria de processos tendem principalmente a controlar variáveis e parâmetros contínuos (por exemplo, vazão e temperatura). Justamente por estes serem o tipo de materiais com o qual trabalham. Em contraste, a indústria de manufatura trabalha com produtos contáveis, discretos. Por esse motivo, os sistemas de controle discretos são responsáveis por controlar e restringir eventos.

Na prática, muitos sistemas de produção incluem operações de características contínuas e discretas. Consequentemente, a maior parte de controladores industriais tem suporte para receber, operar e transmitir, ambos os tipos de sinais e dados. Quando este não é o caso, costuma-se encontrar, também, dois ou mais sistemas de controle dedicados operando em conjunto.

Em controle discreto, os parâmetros e variáveis do sistema mudam em momentos discretos no tempo. Tais variáveis, denominadas discretas, envolvem, tipicamente variáveis binárias (ligadas ou desligadas). As condições para a mudança do estado dessas variáveis são definidas por meio de um programa de instruções. Tais mudanças podem acontecer seja por mudanças no estado do sistema ou por causa de intervalos de tempo. Estes dois casos podem ser nomeados, respectivamente, por **mudanças guiadas por eventos** ou **mudanças guiadas por tempo**.

Mudanças guiadas por eventos são executadas em resposta do controlador à algum evento que causou uma alteração no estado do sistema. Essas mudanças pode ser, por exemplo, o início ou fim de uma operação, partida de um motor ou abertura de uma válvula.

Mudanças guiadas por tempo são executadas pelo sistema de controle em um ponto específico no tempo ou depois de um certo intervalo de tempo. Cada tipo de mudança corresponde a tipos diferentes de controle, chamados controle por lógica combinatória e controle por lógica sequencial.

O controle discreto é de fato extensamente utilizado na indústria de manufatura, bem como na indústria de processos. Na manufatura discreta, é utilizado para controlar as operações de transportadores, de sistemas de armazenamento, sistemas de manufatura flexível e operações de montagem automática.

Todos esses sistemas operam seguindo uma sequência bem e previamente definida com ações de início e fim, tais como transferência de peças e produtos entre estações de trabalho e inspeções automáticas e semi-automáticas em linha.

### 2.2.1 Sequenciamento em Linha de Produção

Em linhas de montagem que produzem um único tipo produto ou produtos com pouca variedade, as alterações de *layout*, ferramental e posição das posições de trabalho são, em geral, pouco constantes. Por esse motivo, a automação do sistema de transportadores se torna atraente.

Linhas com produção em fluxo consistem do material (o produto), de estações de trabalho e de áreas de armazenamento (*buffers*). Idealmente, cada produto é transportado apenas uma vez por uma sequência exata e fixa de áreas de trabalho e áreas de armazenamento. Existe uma primeira estação de trabalho por onde o material entra na linha de montagem e uma última onde o produto deixa o sistema. (Dallery and Gershwin, 1992)

A única variação de tempo existente é o tempo de trabalho em cada estação, devido ao tempo de processamento, falhas aleatórias ou eventos de reparo. Os tempos de transporte, a rigor, são fixos. Estações de trabalho nunca ficam ociosas enquanto existirem produtos a serem trabalhados e espaço para colocar os produtos já processados. (Dallery and Gershwin, 1992)

Um exemplo de um modelo de linha de produção com cinco estações de trabalho pode ser visto na Figura 1. Um exemplo de linha de produção sem armazenamento intermediário podem ser visto na Figura 2.

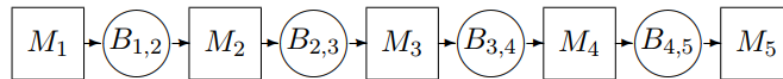


Figura 1: Modelo de Linha de Produção com Cinco Estações de Trabalho com Buffers Intermediários.

Fonte: Dallery and Gershwin (1992)

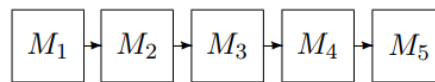


Figura 2: Modelo de Linha de Produção com Cinco Estações de Trabalho sem Buffers Intermediários.

Fonte: Dallery and Gershwin (1992)

A maior parte dos sistemas reais são não sincronizados. Ou seja, o início e fim das operações em todas estações de trabalho não estão restritos a um mesmo instante. Muitas operações em estações de trabalho são realizadas não por máquinas e sim por pessoas, de forma que não existe um tempo fixo para a operação. Outras operações, por exemplo, podem ter tempos diferentes dependendo da variação do produto de trabalho. (Dallery and Gershwin, 1992)

A função dos sistemas de transporte automatizados consiste em interligar as estações de trabalho, transferindo os produtos de uma estação à estação subsequente no fluxo da linha, de forma sequencial. Além da forma de transporte manual em linha, três tipos de transportes mecanizados também são encontrados em fábricas e linhas de montagem: transferência **contínua**, onde todos os produtos são transportados continuamente a uma velocidade compatível com as estações de trabalho; transferência **síncrona**, onde existe exatamente um produto em cada estação de trabalho e todos são transferidos simultaneamente quando todas as estações de trabalho terminaram seus respectivos processos; transferência **assíncrona**, onde os produtos são transferidos assim que não estejam bloqueados pela estação de trabalho posterior estar ocupada. (Papadopoulos and Heavey, 1996)

Segundo Groover (2007), uma linha de produção e montagem automatizada trabalha em ciclos. Cada ciclo consiste do tempo de processamento do produto em determinada estação de trabalho somado ao tempo de transferência à sua respectiva próxima estação. A estação de trabalho mais lenta determina o ritmo da linha.

### 2.3 Automação Industrial

A automação industrial pode ser estudada e estruturada utilizando-se a Pirâmide da Automação Industrial (Figura 3). A representação desta forma tem como objetivo estruturar as principais etapas do processo de produção. A forma na qual se dispõem os níveis na pirâmide foi desenvolvida como referência para ilustrar e constituir a organização de todos os procedimentos que envolvem o ciclo de produção. Utilizando essa arquitetura é possível ter um entendimento mais simples e compreender os diferentes níveis de controle e monitoramento.

A pirâmide é composta por cinco setores representados de forma hierárquica. Essa organização acontece com o objetivo de demonstrar a interdependência de cada um dos níveis. Acompanhando a estrutura, à medida que o topo vai sendo alcançado, os dados coletados sofrem um melhor tratamento, assim, no decorrer da pirâmide, as informações obtidas terão maior qualidade e significado. Nos níveis mais baixos, o tipo de informação predominante são informações do processo, de baixo nível. Nos níveis gerenciais, os dados são em maior parte, indicadores de desempenho.

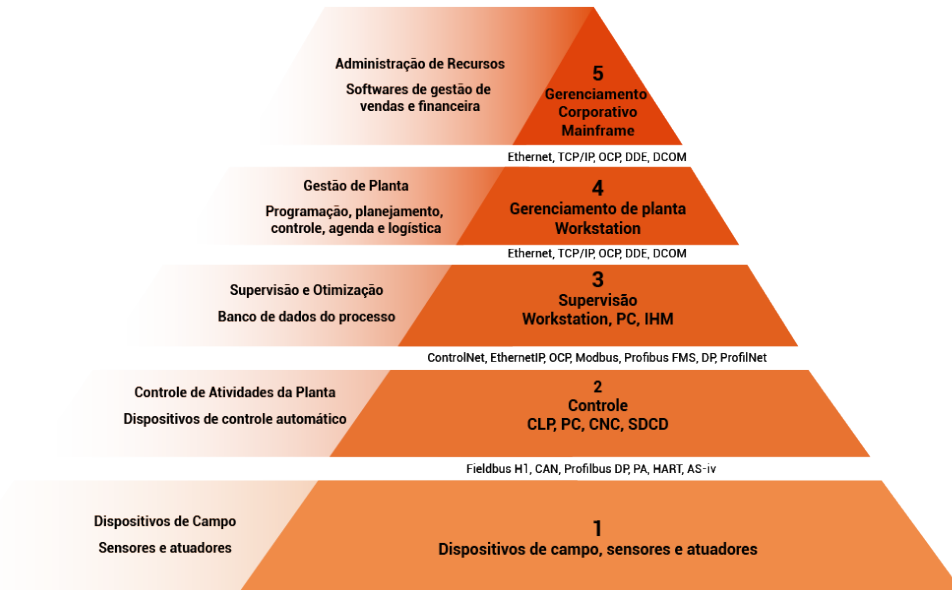


Figura 3: Pirâmide Industrial

Fonte: Instrumentação e Controle LINCE

Cada nível da hierarquia industrial trabalha com tecnologias diferentes para atender às suas necessidades. Já foram citadas as diferenças nos níveis de informação mas também se encontram diferenças nos dispositivos e tecnologias utilizadas em cada uma. Dos dispositivos de campo se espera confiabilidade e repetibilidade, garantindo-se o andamento do processo de produção sem falhas. Já em níveis gerenciais, tem-se o foco na parte administrativa e utilizam-se softwares especializados para gestão, onde se prioriza a qualidade da informação.

O primeiro nível da pirâmide é composto em sua maioria por dispositivos de campo. Encontramos neste nível os atuadores, sensores, transmissores e outros componentes presentes na planta. O segundo nível apresenta equipamentos que realizam o controle automatizado das atividades da planta. É aqui que é possível encontrar dispositivos como Controlador Lógico Programável (CLP), SDCD's (Sistema Digital de Controle Distribuído) e relés. O terceiro nível destina-se à supervisão e otimização dos processos industriais executados por uma determinada célula de trabalho em uma planta. Normalmente um banco de dados da planta dá suporte à operação com todas as informações relacionadas ao processo. O quarto nível é responsável pela parte de programação e também do planejamento da produção. O quinto e último nível da pirâmide da automação industrial é responsável pela administração dos recursos da empresa. Neste nível encontram-se softwares para gestão de venda, gestão financeira e BI (*Business Intelligence*) para ajudar na tomada de

decisões que afetam a empresa como um todo. (Santos, 2012)

## 2.4 Redes Industriais

Segundo Nogueira (2009), as redes industriais surgiram da necessidade de interligar computadores e CLPs. Representam grande importância dentro de empresas devido a quantidade de informações que são utilizadas nos mais diversos níveis organizacional. Aplicações, por exemplo, em sistemas de controle, sistemas supervisórios, sistemas de gerenciamento da produção. Assim, o ambiente industrial, a fábrica, que antigamente era isolada, hoje tem a necessidade de estar interligado com o ambiente corporativo da empresa para possibilitar o compartilhamento de informações com o intuito de aperfeiçoar o processo de produção, evitando perda de tempo, insumos e mão de obra.

Com um expressivo destaque na automação da indústria, as redes digitais de instrumentação, ou barramentos de campo, tornam-se cada vez mais uma alternativa de grande aceitação. Depois da integração de microprocessadores a instrumentos de campo, apareceram os denominados instrumentos inteligentes aptos a comunicarem através de um barramento de campo, possibilitando que estes informem seu estado, a quantidade e qualidade do sinal medido, além de outras informações. (de Lima, 2004)

As redes industriais, também chamadas de barramentos de campo, formam uma rede local para troca de dados entre instrumentos ou com um mestre (modelo cliente/servidor). Desta forma, redes industriais são redes locais (LAN) com o objetivo de reduzir e organizar a quantidade de fios na instalação elétrica, por meio de arquiteturas de rede existentes. (de Lima, 2004)

Os barramentos industriais podem ser divididos em três tipos (Guedes, 2019):

- **Redes de Sensores (*SensorBus*):** Apropriadas para interligação de sensores e atuadores discretos. Trabalham com tamanha de informações ao nível de *bit* de dados. São exemplo de SensorBus: ASI, Seriplex e CAN;
- **Redes de Dispositivos (*DeviceBus*):** Apropriadas para interligar dispositivos mais genéricos como CLP, adaptadores remotos de aquisição de dados e controle, conversores, inversores de frequência, etc. Operam com *bytes* de informações. São exemplos: EthernetIP, Profibus-DP, DeviceNet, ControlNET;
- **Redes de Instrumentação (*FieldBus*):** São redes concebidas para integrar sistemas de instrumentação analógica e processamento distribuído. Operam com blocos

de dados. Exemplos: Foundation Fieldbus, HART, Profibus-PA.

Redes de comunicação, inclusive as redes industriais, são planejadas com conexões ponto a ponto entre os dispositivos configurados. Essas conexões entre dispositivos podem ser realizadas de várias formas, tanto do ponto de vista físico quanto do ponto de vista lógico. As formas de conexão são conhecidas como topologias, e os dispositivos que compõe essa rede, conhecidos como nós ou nodos. Entre as possíveis topologias de rede, podemos destacar três (Rockwell):

- **Topologia em Estrela:** Nesta topologia, todos os dispositivos estão conectados e se comunicando via um dispositivo concentrador, por exemplo um *switch*. O nodo central, conhecido como *host*, que tem o controle supervisor do sistema da rede e através deste, os usuários podem comunicar-se entre si e com os processadores remotos ou terminais (Figura 4).

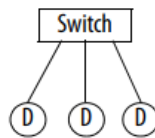


Figura 4: Topologia de Rede em Estrela

Fonte: Rockwell Automation

- **Topologia em Anel:** Nesta topologia de rede, cada estação serve como nodo repetidor para seus respectivos vizinhos. Toda mensagem é retransmitida aos vizinhos até que chegue em seu destino. Esta rede é tolerante à uma falha em uma das conexões entre nodos. (Santos, 2006)

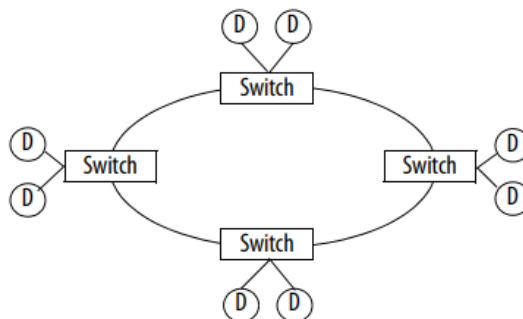


Figura 5: Topologia de Rede em Anel

Fonte: Rockwell Automation

- **Topologia Linear:**

Assim como na topologia em anel, na topologia linear os dispositivos estão conectados em cadeia. Cada nodo serve, também, como repetidor para seus respectivos vizinhos. Neste caso as duas extremidades da rede possuem apenas um vizinho. (Santos, 2006)

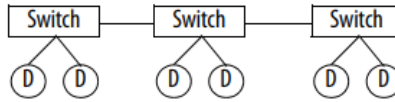


Figura 6: Topologia de Rede Linear

Fonte: Rockwell Automation

## 2.5 Controladores Lógicos Programáveis

### 2.5.1 Histórico

No final da década de 1960 e início da de 1970, os processos produtivos em fábricas automobilísticas eram controlados por armários de relés, frequentemente contendo mais que 300 destes para operacionalizar o sequenciamento e repetição das linhas de montagem. Dentro da General Motors, no final da década de 1960, o CLP surgiu e alterou a forma como os sistemas de controles industriais eram concebidos. (Zancan, 2011)

De acordo com a *National Electrical Manufacturers Association* (NEMA), o CLP é um aparelho eletrônico digital que utiliza uma memória programável para o armazenamento interno de instruções para implementações específicas, tais como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética, para controlar através de módulos de entrada e saída vários tipos de máquinas e processos. Desta forma antigos sistemas a relés com base em lógica fixa e de pouca flexibilidade para mudanças foram, pouco a pouco, sendo substituídos por CLPs, que garantiam facilidade de programação e alteração.

### 2.5.2 Funcionamento

O funcionamento do CLP baseia-se em um conjunto de instruções conhecido como programa, desenvolvido para atender às rotinas do usuário. Os sinais dos sensores ou transdutores acoplados à máquina ou equipamento são aplicados às entradas do controlador, estas junto à lógica do programa definem as saídas.



Após inicializado, o CLP executa uma série de operações pré-programadas, gravadas em seu *firmware*, para então realizar seu ciclo de operação. Em cada ciclo, denominado *scan* ou varredura, há três etapas: no início de uma varredura, o CLP lê os estados de cada uma das entradas (processo chamado de *Scan*), verificando se alguma foi acionada. Os resultados são armazenados em uma região de memória chamada de Memória Imagem das Entradas e, então, utilizados para executar o programa do usuário, onde são atualizados os estados da Memória Imagem das Saídas. As saídas físicas são então atualizadas com a escrita dos valores contidos na Memória das Saídas no *hardware* (interfaces ou módulos de saída). (Antonelli, 2011)

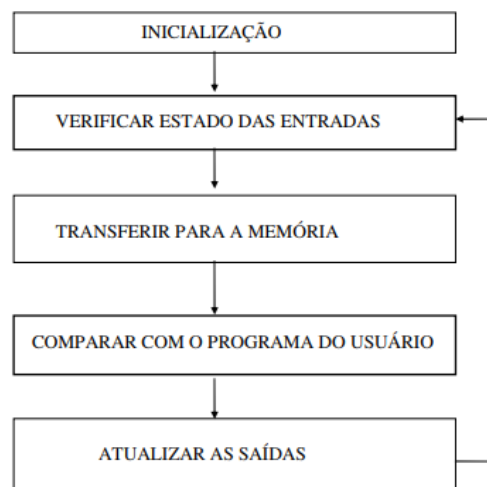


Figura 7: Ciclo de Scan de CLP.

Fonte: Antonelli (2011)

### 2.5.3 Norma IEC 1131

No início de sua utilização, diferentes técnicas de programação foram utilizadas para escrever programas para aplicações de controle industriais e para Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Aplicações de controle eram desenvolvidas em BASIC, FORTH, em C, no Inglês Estruturado, na Lista de Instruções e em outras numerosas linguagens proprietárias incluindo vários dialetos da programação LADDER.

Diante deste cenário, a comunidade industrial internacional reconheceu que um novo padrão para controladores lógicos programáveis foi requerido. O grupo *International Electrotechnical Commission* (IEC Comissão Eletrotécnica Internacional) foi organizado em 1979 para estudar e avaliar o projeto completo dos controladores lógicos programáveis,

incluindo o projeto do hardware, a instalação, os testes, a documentação, a programação e as comunicações.

Um dos resultados deste grupo foi a norma IEC 1131-3, onde são definidas as linguagens padrões que os CLPs suportam para a concepção de programas de usuário como *Sequential Function Chart* (SFC) (equivalente ao GRAFCET), *Ladder Diagram* (LD) e *Function Block Diagram* (FB). Além disso, suporta linguagens textuais como *Instruction List* (IL) e *Structured Text* (ST).

## 2.6 Modelo de Desenvolvimento em Cascata

A metodologia de desenvolvimento em cascata foi desenvolvida pela marinha norte americana nos anos 60, para permitir o desenvolvimento de softwares militares complexos (Pressman, 2009). No modelo em cascata, o projeto segue uma série DE passos ordenados e ao final de cada fase, a equipe de projeto finaliza uma revisão. A Figura 8 ilustra as etapas da metodologia em cascata. As fases do modelo são executadas de maneira sequencial e sistemática, ou seja, uma após a outra, sendo que uma nova fase só é iniciada após a conclusão de sua antecessora (Sommerville, 2011).

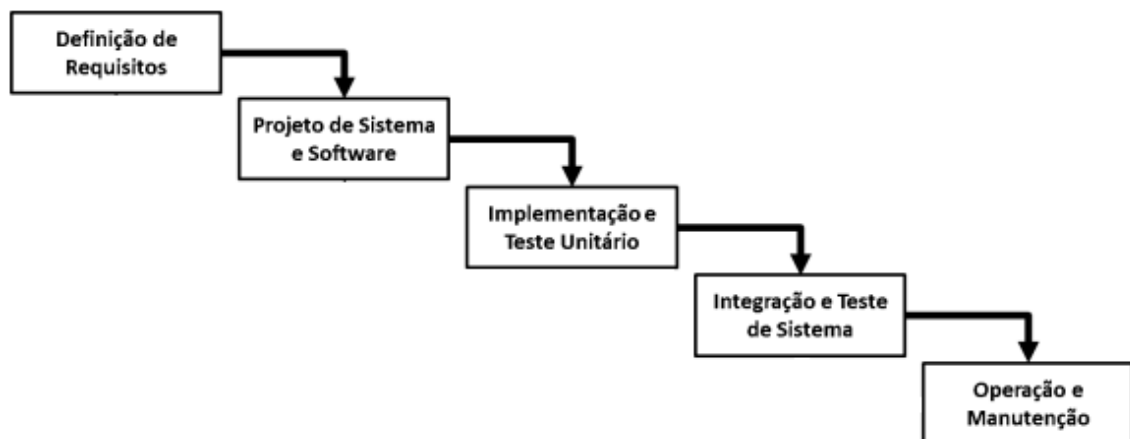


Figura 8: Etapas do Modelo de Desenvolvimento de Software em Cascata

Fonte: Adaptado (Sommerville, 2011)

- **Análise de requisitos:** Nesta etapa são definidas todas as funcionalidades e restrições do sistema. Ocorre a comunicação entre o cliente e os responsáveis pelo projeto. São definidos o foco, objetivos e necessidades do sistema. Em geral, são elaborados documentos, resultantes de reuniões entre cliente e fornecedor.

- **Projeto:** Nesta etapa procura-se busca representar os requisitos do software por meio de abstrações, visando facilitar a criação do código fonte e sua respectiva implementação. Nesta etapa também são especificados todos os componentes e tecnologias que o novo sistema necessita.
- **Codificação:** Nesta etapa o projeto é implementado, ou seja, o código-fonte é gerado através de uma linguagem de programação e colocado em operação. Um bom planejamento realizado na etapa anterior minimiza drasticamente os problemas encontrados na etapa de implementação e teste.
- **Testes:** Após a implementação, é necessário testar o software ou sistema, esta verificação visa o cumprimento dos requisitos determinados pelo cliente na fase de definição de requisitos. Após toda a conferência o sistema é entregue ao cliente.
- **Manutenção:** Na etapa de manutenção ocorrem as correções dos erros e anomalias encontrados no sistema.

Este capítulo apresentou os principais conceitos existentes em sistemas de automação. A produção em massa de produtos em linhas de montagem é um caso particular de um sistema discreto. O sistema de transporte é parte integrante e fundamental quando no contexto da automação fixa, sendo responsável por garantir o fluxo de produção. Ter conhecimento do tipos de transportes existentes em linhas de montagem - síncrono, assíncrono e contínuo - é fundamental para entender o funcionamento da automação de transportadores industriais. Os conceitos de *buffer* e espaço de trabalho são apresentados junto a modelos teóricos de linha de montagem. Por fim, uma revisão sobre automação, topologias de rede, programação de CLPs e do modelo cascata de desenvolvimento de software fundamentam teoricamente o desenvolvimento do projeto.

### 3 REQUISITOS DO SISTEMA

O sistema de automação desenvolvido é um sistema de *Shuttle Cart* (também chamado de Carro de Deslocamento) para para gerenciamento do transporte de produtos em baias de testes. Nesta etapa da linha de produção, são realizados testes funcionais de cada produto. Pelo fato da duração do teste ser maior que a capacidade de produção da linha, se faz necessária a realização do testes em produtos simultaneamente, em paralelo, e não um-a-um como maior parte dos trabalhos realizados em linha de produção.

Neste capítulo são especificados os requisitos gerais e os requisitos funcionais do sistema. Os requisitos gerais foram obtidos junto à equipe de engenharia da *Whirlpool* e com análise do funcionamento de sistemas menores, semelhantes, existentes em linhas de produções na mesma fábrica. Os requisitos funcionais foram definidos junto à equipe de produção, manutenção e à empresa que desenvolveu a parte mecânica.

#### 3.1 Requisitos Gerais

Para a entrada de um novo produto no sistema de baias de teste com *Shuttle Cart*, um produto proveniente de uma fase anterior da linha de produção, não testado ainda pelo sistema, é posicionado em um *buffer* que chamamos de Baia de Entrada. Este produto é retirado pelo carro de deslocamento na posição da gôndola de entrada, transportado e posicionado em uma das baias de testes disponíveis no sistema. Por fim, quando o teste é finalizado, o produto é retirado da baia de teste em que está posicionado, pelo carro, na gôndola de saída, é transportado e posicionado em um *buffer* de saída do sistema que chamamos de Baia de Saída. Uma vez posicionado na Baia de Saída, o produto está pronto para ser transportado para a fase posterior da linha de produção.

Para se discutir detalhes do funcionamento do sistema e tomar decisões quanto aos equipamentos necessários para a automação, é preciso ter conhecimento sobre a estrutura mecânica, restrições de movimentação e transporte, bem como limitações. A partir do *layout* preliminar do sistema fornecido (Figura 9), separou-se os equipamentos em módulos independentes para alvo de discussão de estudo dos requisitos: Baias de Teste, Baia de Entrada, Baia de Saída e Carro de Deslocamento.

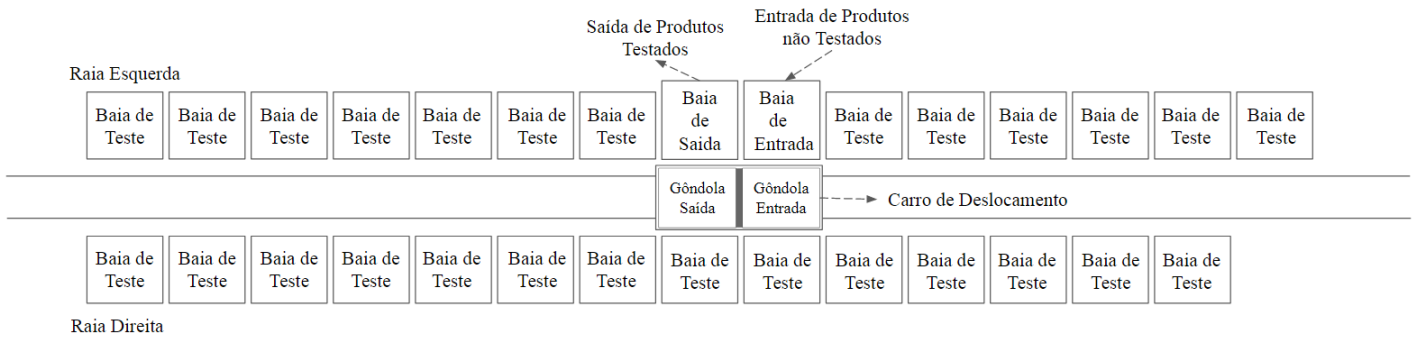


Figura 9: Layout do Sistema.

Fonte: autoria própria

### 3.1.1 Baias de Teste

As baias de teste são componentes modulares, num total de vinte e sete, com espaço físico para acomodar um produto, onde é realizado o teste funcional do equipamento. Estão dispostas no sistema em duas raia, uma raia do mesmo lado dos módulos de entrada e saída (Raia Esquerda), e outra no lado oposto (Raia Direita). Cada baia de teste é composta por uma série de roletes livres, não motorizados, onde fica apoiado o produto e um suporte metálico para manter o produto na altura do operador. Cada baia de teste possui um controlador para o teste funcional e uma botoeira de comando para intervenção do operador.

Cada controlador de teste é um sistema independente e possui uma interface para comunicação com o sistema de transporte a ser desenvolvido. A interface é utilizada de forma que o controlador do sistema de transporte envia o sinal de início de teste ao sistema de teste e, também, recebe o sinal de aprovado ou reprovado.

Cada baia de teste contém uma botoeira, usada como interface entre operador e a máquina. Sua função é aceitar intervenções do operador para forçar o resultado de um teste, liberar um produto da baia para busca do carro, bloquear a baia ou resetar a lógica de controle para determinada baia. Além disso, as lampadas indicam se o teste foi inicializado e, depois de finalizado, sinalizam se o produto presente está reprovado ou aprovado.



(a) Baia de Teste



(b) Botoeiras das Baias de Teste

Figura 10: Baias de Teste

Fonte: autoria própria

### 3.1.2 Baias de Entrada e Saída

Módulos mecanicamente semelhantes aos das baias de testes, diferenciando-se que, neste, existe tracionamento nos roletes para movimentação. O módulo de entrada é responsável por receber o produto proveniente da linha de montagem e, também, por transportar o produto para cima do carro. De forma semelhante, o módulo de saída recebe o produto do carro e o transporta de volta para a linha de montagem.

### 3.1.3 Carro de Deslocamento

É o componente fundamental para o deslocamento de produtos entre as baias de teste no sistema e sua movimentação é definida pela lógica de gerenciamento de baias de teste no sistema. O carro de deslocamento é um módulo mecânico único com capacidade para transportar até dois produtos simultaneamente em suas duas posições (Gôndola de Entrada e Gôndola de Saída).

O carro é capaz de alcançar qualquer uma das baias de teste e alinhar qualquer um dos dois produtos que possa estar carregando com a mesma. Desta forma, o carro tem um limite de curso máximo de 20 metros, entre as baias posicionadas nos extremos do sistema. O deslocamento é feito em linha reta, guiado por trilhos e com tração em suas rodas.

Com a capacidade de transportar até dois produtos, posicionados lado a lado, sobre roletes com tracionamento independente para cada. Um produto posicionado em cima do carro pode ser transportado, pelos roletes sobre o qual está, para uma baia de teste que esteja alinhada com sua posição no carro. Considerando-se os dois ramais e levando-se em conta que o produto, quando alinhado, pode ser transportado para qualquer baia de teste presente no sistema, os motores de tracionamento dos roletes precisam acionar tanto no sentido direto quanto reverso.



(a) Carro de Deslocamento



(b) Carro de Deslocamento entre as duas raias

Figura 11: Carro de Deslocamento

Fonte: autoria própria

## 3.2 Requisitos Funcionais

Discutidos os requisitos base do sistema e garantindo que, a nível de *layout* mecânico, qualquer produto pode ser colocado e retirado em qualquer uma das baias de teste, pode-se partir para uma análise mais detalhada do funcionamento do sistema.

### 3.2.1 Interface com Linha de Montagem

A saída de produtos e retorno à linha de montagem acontecem na baia de entrada e saída, respectivamente. Ambas tem seus roletes tracionados por motores de corrente alternada para realizar o transporte de produtos.

A baia de entrada de produtos tem seus roletes tracionados em duas situações: durante o transporte do módulo de uma fase anterior da linha de montagem para este e; deste módulo para o posterior, neste caso, para a gôndola de entrada do carro de deslocamento. Nomeia-se o transporte de um módulo ao outro de "ciclo de transporte", neste caso, respectivamente, ciclo de transporte para a baia de entrada e ciclo de transporte para a gôndola de entrada. De forma semelhante, a baia de saída tem seus rolos tracionados no ciclo de transporte para a baia de saída (onde acontece o transporte do produto partindo da gôndola de saída do carro de deslocamento e chegando na baia de saída) e no ciclo de transferência seguinte, onde o produto é transferido para a fase posterior linha de montagem.

Com a finalidade de manter a rastreabilidade e, também, de evitar colisão entre produtos, ciclos que envolvam um mesmo transportador não acontecem simultaneamente. Desta forma, por exemplo, um produto nunca é transportado da linha de montagem até o módulo de entrada se um outro produto, anteriormente em cima do módulo de entrada, não tenha completado seu ciclo de transferência até os roletes do carro. A colisão entre produtos é evitada, desta forma, acionando-se os roletes apenas dos transportadores envolvidos em cada ciclo.

### 3.2.2 Testes e Comando Manual nas Baias de Teste

O teste funcional de um equipamento é realizado em uma das baias de teste disponíveis no sistema, ou seja, uma baia que não tenha seu funcionamento inibido pela seletora de bloqueio presente na sua botoeira. Os produtos são transportados e posicio-



nados nas baias de testes não bloqueadas, onde, com intervenção de um operador, o teste é realizado. O trabalho do operador consiste em acoplar o sistema de testes no produto e liberar o início de teste. Quando o teste é concluído, o operador desacopla o sistema e libera o produto para ser retirado da baia pelo carro.

Os roletes das baias de teste não são tracionados por motor elétrico e, por esse motivo, durante os ciclos de transferências que as envolvem (ciclos de carga e descarga), um acoplamento mecânico temporário acontece entre os roletes do carro e os roletes da baia. Esse acoplamento, chamado de parasita, acontece pelo avanço de um cilindro pneumático que força mecanicamente um rolete acoplador entre os roletes motorizados do carro de deslocamento e os roletes livres da baia de teste (Figura 12a e Figura 12b).

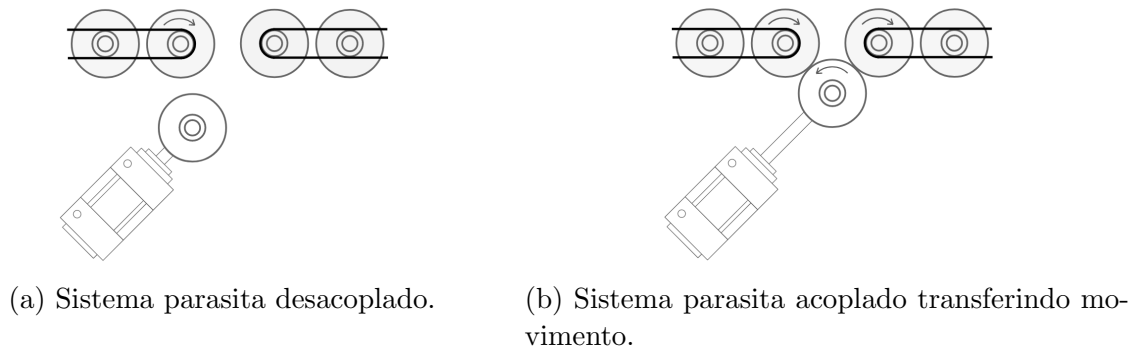


Figura 12: Sistema Parasita

Fonte: autoria própria

Quando um produto não testado é posicionado na baia de testes, uma lâmpada pisca de forma intermitente indicando ao operador que ele deve acoplar o sistema de testes no produto e iniciar o teste, apertando o botão de início de teste naquela baia. Neste momento, o sistema a ser desenvolvido deve enviar um sinal ao sistema de teste para início de teste.

O sistema de testes, ao finalizar, envia um sinal ao controlador do sistema de transporte indicando a aprovação ou reprovação daquele produto. De acordo com o resultado final do teste, aprovado ou reprovado, o controlador acende uma lâmpada verde ou vermelha, respectivamente, indicando ao operador o fim do teste. Por fim, fica sob responsabilidade do operador desacoplar o sistema de testes e apertar o botão de liberação de produto, permitindo assim, que o carro possa se alinhar com essa baia e que o ciclo de retirada de produto ocorra.

### 3.2.3 Sequenciamento de Movimentos do Carro de Deslocamento

O sequenciamento de movimentos do carro é responsável por duas tarefas. A primeira é determinar e transferir para uma baia de testes vazia não bloqueada o produto posicionado na baia de entrada do sistema. A segunda é garantir a busca e retirada de produtos com teste finalizado nas baias de testes e transferi-los para a baia de saída.

Para cada baia de teste existente, o sistema é capaz de identificar a presença de produtos em cima da mesma e de manter em memória se o produto já foi liberado pelo operador ou não. Desta forma, um produto presente na baia de entrada terá seu ciclo de transporte para o carro realizado e, por seguinte, deslocado até uma baia pelo carro apenas quando for identificada uma baia de teste disponível e sem produtos.

A liberação de produtos testados é feita pelo operador na botoeira de cada baia e não se sabe a ordem e o momento em que esses eventos ocorrem. O sistema deve, no entanto, garantir que os produtos sejam retirados de suas baias na mesma sequencia em que foram liberados, garantindo, assim, que todos os produtos serão retirados e que nenhum produto exceda um tempo limite desde o fim do seu teste e sua retirada do sistema. Vale notar, no entanto, que fica a cargo do operador liberar os produtos na mesma ordem que finalizaram os testes.

Determinou-se que, das duas posições para produtos no carro: a primeira, chamada "Gôndola de Entrada", é limitada a transportar apenas os produtos entrando no sistema com destino à uma baia de teste; a segunda, chamada "Gôndola de Saída", é limitada a transportar apenas os produtos já testados com destino à baia de saída. Desta forma, uma situação com dois produtos testados ou dois produtos não testados em cima do carro, não se torna possível. Tal restrição foi aplicada como forma a restringir que o sistema entre em estados bloqueantes.

Neste capítulo o sistema foi decomposto em seus principais componentes: Baias de Teste, Baias de Entrada e Saída e Carro de Deslocamento. Os requisitos gerais descritos são resultados de conversas e visitas ao cliente e descrevem características gerais do *layout* mecânico desejado e restrições e requisições sobre funcionamento. Os requisitos funcionais descrevem os subsistemas existentes e a interface entre eles. Detalhes de funcionamento de software, para atender aos requisitos gerais propostos pelo cliente, também foram considerados requisitos funcionais neste capítulo.

## 4 ESPECIFICAÇÃO DE HARDWARE

Neste capítulo é descrita a escolha do hardware para implementação do sistema. Inicialmente, é feito um levantamento dos sinais de entrada e saída para cada módulo, de forma a determinar as quantidades e distribuição dos pontos na planta. Em seguida, é apresentada a arquitetura do sistema de automação já existente e uma alteração proposta, contando com uma adição de equipamentos de forma a suportar o sistema de *Shuttle Cart*.

### 4.1 Sinais de Entrada e Saída

A relação de entradas e saídas do sistema foi levantada assim que completou-se o estudo do funcionamento do sistema. Essa etapa foi realizada antes da especificação de hardware e alguns pontos aqui definidos servem como requisitos na escolha dos equipamentos para que se tenha acesso aos sinais desejados. A definição das entradas e saídas do sistema leva em conta não apenas o funcionamento do processo descrito no Capítulo 3 mas, também, sinais que permitam os diagnósticos de hardware e *time-out de ciclos*.

Para o funcionamento do processo, foram considerados: sensores fotoelétricos para identificar a presença de produto em cima dos módulos; botões pulsantes iluminados para botoeiras de comando; contadores para acionamento de motores elétricos; válvulas solenoides para acionamento pneumático.

Os motores elétricos alimentados com partida direta presentes no sistema possuem um sistema de acionamento com disjuntor, contator e, quando necessário rotacionar em dois sentidos, um segundo contator de reversão para troca de fases. Neste caso, o motor é acionado utilizando uma, ou duas, saídas para energizar a bobina do seu contator; cada contator possui um sinal auxiliar para confirmação de seu chaveamento; o disjuntor de cada motor possui um contato auxiliar para indicar sua inibição por sobrecorrente. Além disso, todo motor tem, em campo, uma chave comutadora (LOTO) capaz de cortar sua alimentação trifásica, sendo que um contato auxiliar é utilizado para receber o sinal que indica sua comutação.

#### 4.1.1 Baias de Teste

A definição dos sinais das baias de teste considerou a identificação de presença do produto, a botoeira de comando manual e a interface com o sistema de testes. Cada botoeira de comando possui dois botões pulsantes iluminados para início de teste e liberação de produto; uma seletora para bloqueio da baia de teste; duas lâmpadas para indicar se o produto está aprovado ou reprovado; uma lâmpada para identificar se a baia está bloqueada.

Em cada baia, a interface com o sistema de teste é feita por relés. A requisição para início de um novo teste é feita por uma saída do controlador que aciona a bobina de um relé. Os sinais de teste aprovado e teste reprovado provêm do contato de dois relés cujas bobinas são acionadas pelo sistema de teste. Para assegurar que o produto não seja retirado da baia com o sistema de teste ainda acoplado, um sensor indutivo identifica o sistema de testes quando está desacoplado produto.

As entradas e saídas para cada uma das baias estão listadas na Tabela 2 e na Tabela 3.

Sinal	Descrição
INICIO_TESTE	Botão de Pulso
LIBERA_PRODUTO	Botão de Pulso
BLOQUEIA_BAIA	Seletora de duas posições
CONT_BOMBA_VACUO	Contato Auxiliar de Contator NA
IF_TESTE_APROVADO	Interface Relé
IF_TESTE_REPROVADO	Interface Relé
PRESENCA_PRODUTO	Sensor Fotoelétrico
TESTE_DESACOPLADO	Sensor Indutivo

Tabela 2: Entradas do sistema para cada Baia de Teste.

Sinal	Descrição
INICIO_TESTE_LAMP	Iluminação de Botão
PRODUTO_LIBERADO	Iluminação de Botão

PRODUTO_APROVADO	Lampada Verde
PRODUTO_REPROVADO	Lampada Vermelha
BAIA_BLOQUEADA	Lampada Vermelha
IF_INICIAR_TESTE	Interface Relé

Tabela 3: Saídas do sistema para cada Baia de Teste.

#### 4.1.2 Baias de Entrada e Saída

Os sinais de entradas e saídas para esses dois módulos são os necessários para acionamento de seus motores sem reversão e identificação de presença de produto. As entradas e saída para cada um destes módulos estão listadas na Tabela 4 e na Tabela 5.

Sinal	Descrição
PRESENCA_PRODUTO	Sensor Fotoelétrico
LOTO_MOTOR	Chave Comutadora
RETORNO_CONTATOR	Contato NA
RETORNO_DISJUNTOR_VACUO	Contato NA

Tabela 4: Entradas do sistema para cada uma das baias de entrada e saída.

Sinal	Descrição
LIGA_ROLETES	Bobina de Contator

Tabela 5: Saída do sistema para cada uma das baias de entrada e saída.

#### 4.1.3 Carro

Os sinais que garantem o funcionamento do carro são os responsáveis pela identificação de produtos em cada uma das duas posições do carro, pelo acionamento dos motores dos roletes e pelo funcionamento do sistema de acoplamento parasita.

São necessários dois pares de sinais de presença de produto, um para a identificação de produtos na posição de carga e outro para os produtos na posição de descarga. Os sensores de presença determinam onde termina o transporte do produto quando este é movimentado para cima do carro, por isso se faz necessário um par de sensor em cada posição; um sensor identifica o fim da transferência para produtos provenientes das baias da esquerda e outro para produtos provenientes das baias da direita.

As baias de teste não possuem motorização e, por este motivo, quatro sistemas de acoplamento parasitas são instalados no carro. Para cada sistema foi considerada uma saída para acionar a válvula solenoide do pistão acoplador e duas entradas para os sinais de dois sensores magnéticos que identificam o pistão avançado e recuado.

O motor responsável pelo deslocamento do carro utilizará hardware dedicado e apenas o sinal da chave Lockout-Tagout (LOTO) será utilizado o controlador. A interface com esse sistema foi realizada pela rede local Ethernet/IP.

As entradas e saídas mapeadas para o carro estão listadas na Tabela 6 e na Tabela 7.

<b>Sinal</b>	<b>Descrição</b>
PRESENCA_PRODUTO_CARGA_DIREITA	Sensor Fotoelétrico
PRESENCA_PRODUTO_CARGA_ESQUERDA	Sensor Fotoelétrico
PRESENCA_PRODUTO_DESCARGA_DIREITA	Sensor Fotoelétrico
PRESENCA_PRODUTO_DESCARGA_ESQUERDA	Sensor Fotoelétrico
PARASITA_ELEVADO_CARGA_DIREITA	Sensor Magnético
PARASITA_BAIXO_CARGA_DIREITA	Sensor Magnético
PARASITA_ELEVADO_CARGA_ESQUERDA	Sensor Magnético
PARASITA_BAIXO_CARGA_ESQUERDA	Sensor Magnético
PARASITA_ELEVADO_DESCARGA_DIREITA	Sensor Magnético
PARASITA_BAIXO_DESCARGA_DIREITA	Sensor Magnético
PARASITA_ELEVADO_DESCARGA_ESQUERDA	Sensor Magnético
PARASITA_BAIXO_DESCARGA_ESQUERDA	Sensor Magnético
LOTO_MOTOR_CARGA	Chave Comutadora
RETORNO_CONTATOR_CARGA_A	Contato NA
RETORNO_CONTATOR_CARGA_R	Contato NA

RETORNO_DISJUNTOR_CARGA	Contato NA
LOTO_MOTOR_DESCARGA	Chave Comutadora
RETORNO_CONTATOR_DESCARGA_A	Contato NA
RETORNO_CONTATOR_DESCARGA_R	Contato NA
RETORNO_DISJUNTOR_DESCARGA	Contato NA
LOTO_MOTOR_CARRO	Chave Comutadora

Tabela 6: Entradas do sistema para o carro.

Sinal	Descrição
LIGA_ROLETES_CARGA_A	Bobina de Contator
LIGA_ROLETES_CARGA_R	Bobina de Contator
LIGA_ROLETES_DESCARGA_A	Bobina de Contator
LIGA_ROLETES_DESCARGA_R	Bobina de Contator
SOBE_PARASITA_CARGA_DIREITA	Válvula Solenoide
SOBE_PARASITA_CARGA_ESQUERDA	Válvula Solenoide
SOBE_PARASITA_DESCARGA_DIREITA	Válvula Solenoide
SOBE_PARASITA_DESCARGA_ESQUERDA	Válvula Solenoide

Tabela 7: Saídas do sistema para o carro.

## 4.2 Hardware de Automação Existente

O sistema de automação atualmente em operação na fábrica é responsável pelo controle da mesma linha de produção em que será instalado o sistema de teste, desde a montagem até a etapa de embalagem do produto. O sistema de controle é baseado na solução Rockwell Sistemas de Controle ControlLogix, que oferece uma plataforma de desenvolvimento de software, controladores e módulos integrados, proporcionando alto desempenho, baixo custo de comissionamento, baixo tempo de desenvolvimento e baixo custo durante operação. Além disso, os controles padrão e de segurança podem ser execu-



tados no mesmo *rack* para obter um sistema verdadeiramente integrado.(Rockwell, 2019)

Para o controle da linha de montagem, atualmente, são utilizados dois controladores ControlLogix 1756-L61 e ControlLogix 1756-L61S (Figura 13b), instalado em um mesmo chassi(Figura Figura 13a), sendo que o último é um controlador *Safety*, responsável pelas lógicas de controle de segurança. Além dos módulos de I/O locais, instalados no mesmo chassi em que os controladores(Figura 13c), a solução ainda conta com *links* de I/O endereçados na rede local Ethernet/IP. O controlador instalado possui 2 MB de capacidade para memória de usuário; 478 KB de memória para endereçamento de I/O, 128 MB de memória não volátil, e capacidade para até 128.000 pontos de I/O. O controlador possui porta de conexão Ethernet e permite uma arquitetura com até 256 pontos Ethernet/IP (Rockwell, 2018). Atualmente utiliza-se uma arquitetura em estrela para a CPU (CPU), adaptadores I/O de rede, inversores de frequência e Interface Homem Máquina (IHM).



(a) Chassi ControlLogix (b) CPU ControlLogix e (c) Módulos ControlLogix Partner Safety

Figura 13: Sistema Control Logix

Fonte: Rockwell Automation

Adaptadores de rede com os pontos de I/O (Figura 14c) são distribuídos, em um total de sete, ao longo da planta de produção em painéis menores, de forma que os sinais de campo interligados em seus módulos fiquem próximos. Todos fazem parte da família de Módulos POINT I/O Rockwell Rockwell (2015). Cada adaptador ( Figura 14a) pode suportar módulos de entradas e saídas digitais, analógicas e especializadas, além de módulos com classificação de segurança denominados POINT Guard. No sistema já instalado, encontram-se módulos de entrada e saídas digitais simples e de segurança com oito pontos (Figura 14b).



Figura 14: Sistema IO Remoto

Fonte: Rockwell Automation

### 4.3 Hardware Adicionado

O sistema de controle e todo o hardware ficam instalados em um novo painel, exclusivo para os equipamentos necessários para o sistema do carro de testes. De forma a atender todo os sinais do sistema como descritos na Seção 4.1 e, levando em consideração o sistema já instalado na linha de produção, o cliente final, junto à empresa, optou por estender a arquitetura e projeto já existente de forma a suportar o novo sistema.

Para o desenvolvimento deste trabalho, foi importante a tarefa de especificação do sistema de aquisição e controle, de forma a garantir compatibilidade com o sistema já existente; e especificação do hardware dedicado para controle de posicionamento do carro, garantindo interoperabilidade com a atual arquitetura. A especificação dos equipamentos elétricos tais como disjuntores, contadores, chaves seccionadoras, fiação elétrica e equipamentos para interligações ficou à cargo da empresa responsável pelo projeto elétrico, ainda que submetida aos requisitos levantados na Seção 4.1 e por recomendações da Control-Master.

Para atender aos sinais definidos em 4.1, optou-se por adquirir dois novos adaptadores de rede Ethernet/IP do sistema Rockwell Point I/O, de forma a acomodar os módulos de entrada e saída. Desta forma, dividiram-se os sinais das baias de teste e do restante do sistema em módulos diferentes, de forma a garantir mais agilidade na instalação e manutenção do sistema. Os adaptadores utilizados foram o 1734-AENT com capacidade de suportar até 2000 pontos nos seus módulos montados. Os módulos de entrada e saída utilizados foram, respectivamente, IB8 e OB8, cada um com oito pontos de

sinal. Sendo que ambos possuem suas versões para sistemas de segurança, IB8S e OB8S, também utilizados.

A escolha e definição dos módulos entre os disponíveis no sistema Point I/O levou em conta, majoritariamente, a faixa de tensão de trabalho, sendo ela de 24 V. Todos os módulos foram selecionados com essa faixa de tensão de forma a seguir um padrão já existente nos sistemas de automação industriais e por se adequar às normas de segurança prevista pela Norma Regulamentadora em Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos (NR-12), quando o operador tem acesso à botoeiras e painéis de comando (FIEMG, 2013). Desta forma, descartou-se a utilização de módulos com maior faixa de tensão.

#### 4.3.1 Adaptador de Rede para as Baias de Teste

O adaptador de rede possui cinquenta e oito módulos de entrada e saída suficientes para atender a todas as vinte e sete baias de teste no sistema e, eventualmente, módulos reservas garantem o atendimento de mais três baias adicionais. Foi previsto que, para cada baia do sistema, um módulo IB8 agrupa seus sete pontos de sinais de entrada e um ponto de entrada reserva adicional. De forma semelhante, para cada baia de teste, um módulo OB8 foi previsto para seus seis sinais de saída e dois pontos de saídas reservas. Neste adaptador estão acoplados trinta e um módulos de entrada IB8 e vinte e sete módulos de saída OB8. (Figura 15).

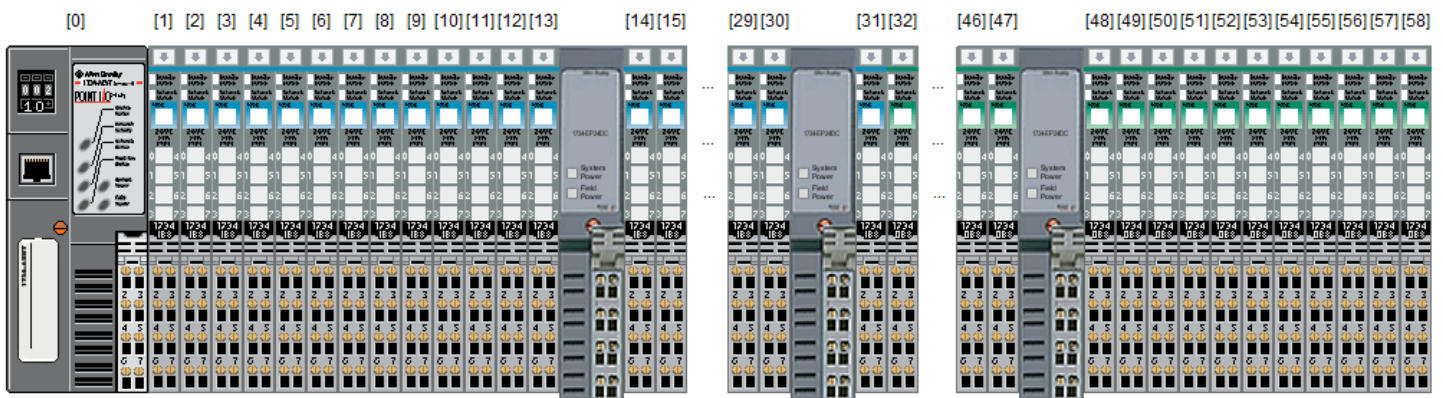


Figura 15: Adaptador Point I/O responsável pelos sinais das baias de teste.

Fonte: autoria própria

### 4.3.2 Adaptador de Rede para o Carro

O adaptador de rede possui vinte e três módulos de entrada e saída convencionais e de segurança suficientes para atender a todo restante do sistema, bem como pontos de reserva para futuras alterações. Além dos pontos já previstos na Seção 4.1.3, referentes aos sinais que garantem o funcionamento do carro de deslocamento, levaram-se em conta sinais para comando e operação do painel do sistema, botoeira de comando manual do carro e o sistema de segurança de forma a atender às exigências da norma NR-12. Estes últimos sinais, não descritos na Seção 4.1.3 contemplam um projeto paralelo e ficam fora do escopo deste documento. Neste adaptador estão acoplados quatro módulos de entrada de segurança IB8S; um módulo de saída de segurança OB8S; doze módulos de entrada convencional IB8 e seis módulos de saída convencional OB8 (Figura Figura 16).

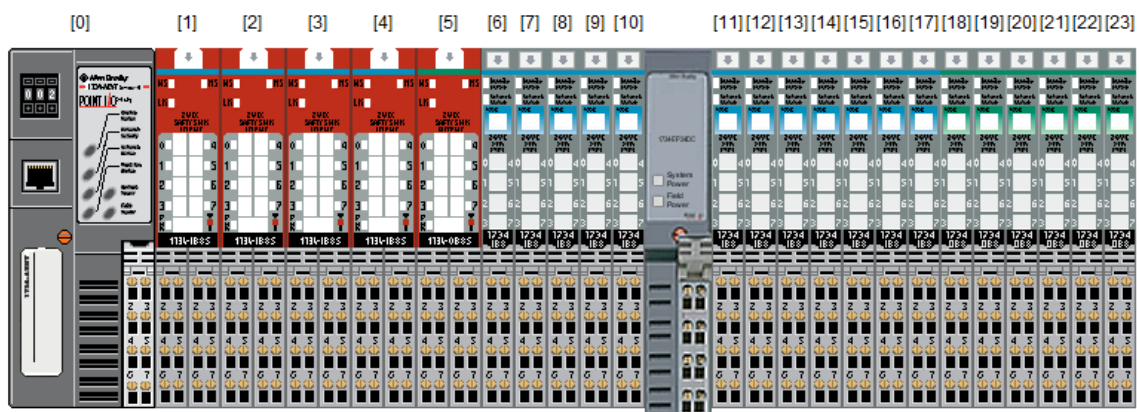


Figura 16: Adaptador Point I/O responsável pelos sinais do Carro.

Fonte: autoria própria

### 4.4 Proposta de Arquitetura

A arquitetura proposta buscou integrar os novos adaptadores descritos na Seção 4.3 de forma a manter a integridade da rede Ethernet/IP já existente e garantir que o CLP existente tenha capacidade para processar o código de controle do sistema resultante. No painel da linha de montagem, o CLP é utilizado como *Backpane* da rede Ethernet/IP e está conectado a um *switch* onde também estão conectados os adaptadores já existentes. Foi proposto então utilizar um novo *switch* no painel para interconectar os dois painéis e conectar os novos adaptadores (Figura 17)

O software IAB é a ferramenta disponibilizada pela Rockwell para projeto e validação de sistemas de controle composto por seus produtos. Dadas requisições técnicas para os sinais do sistema, o IAB gera propostas para desenvolvimento utilizando linhas de produtos Rockwell, desta forma elimina-se a necessidade do desenvolvedor conhecer toda a suíte de produtos e as limitações de compatibilidade. Para usuários mais experientes ou que já tem pré-definido o seu sistema de controle, a ferramenta provê uma biblioteca para seleção de componentes e uma interface gráfica para configuração personalizada da arquitetura IAB.

No caso deste trabalho, o sistema já existente na linha de montagem foi reproduzido no IAB e foi adicionado a ele os novos adaptadores de rede, interconectados ao novo *Switch*, com a intenção de analisar a viabilidade com relação à estrutura e capacidade da rede Ethernet/IP. Como resultado, a performance da arquitetura proposta respeitou os limites da rede, de forma que os novos adaptadores de rede, o módulo de comunicação Ethernet/IP do CLP e ele mesmo, servindo como *Backplane* não ficaram sobrecarregados com *Common Industrial Protocol (CIP) Connections*, *Rack Optimized Connections*, *Direct Connections* e *Packets per Second*. Por último, a rede Ethernet performou bem, tendo apenas 6,6% da capacidade do meio utilizada Figura 18.

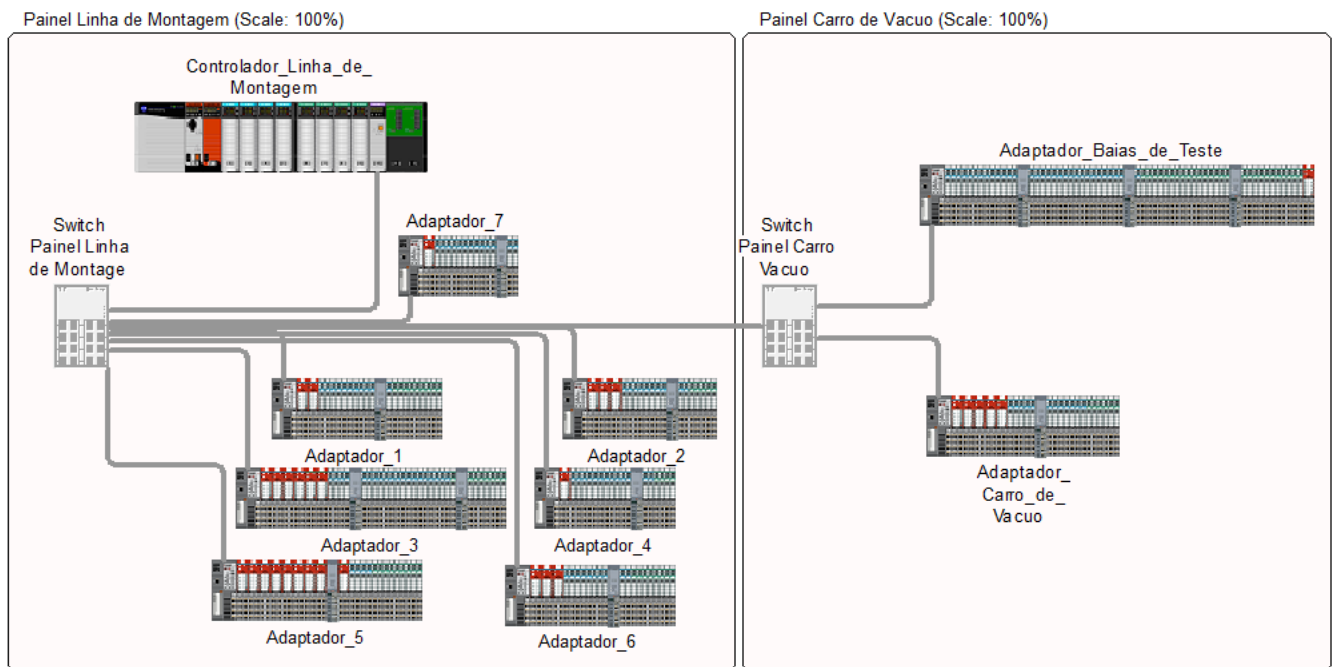


Figura 17: Proposta de Arquitetura para Integração do Sistema

Fonte: autoria própria



Figura 18: Viabilidade da Arquitetura Proposta no Software IAB

Fonte: autoria própria

Por decisão do cliente final, o sistema do carro e baias de teste foi desenvolvido utilizando o mesmo sistema já presente na linha de montagem. Desta forma, o controlador utilizado foi o mesmo já instalado para controle da linha de montagem e optou-se por adicionar módulos de entradas e saídas para suprir os sinais definidos na Seção 4.1. Todo o hardware de controle e acionamento foi instalado em um novo painel elétrico contendo: o circuito de alimentação dedicado para interligação com o cofre de energia; todos os módulos de entradas e saídas; os circuitos de acionamento dos motores; o circuito e hardware dedicado para controle de posicionamento do carro e os bornes de interconexões com os equipamentos em campo.

## 5 DESENVOLVIMENTO DO SOFTWARE

O desenvolvimento do software foi dividido na definição das estruturas de dados existentes e nas estruturas de controle que descrevem o comportamento entre elas. Este capítulo apresenta as principais estruturas de dados e lógicas de controle, bem como um exemplo de implementação no ambiente de desenvolvimento Logix5000.

### 5.1 Estruturas de Dados

Para armazenar as informações que caracterizam o estado do sistema, foram definidas estruturas de dados coerentes com o funcionamento previsto. Foram criadas estruturas para as baias de teste, para o carro de deslocamento, para armazenamento das baias em que os produtos já estiverem testados e prontos para serem buscados, bem como, para os ciclos de transferência de produtos. Abaixo se apresentam as estruturas criadas e, na Seção 5.4, a forma como foram implementadas.

**Baia de Entrada e Saída:** Definiu-se uma estrutura de dados para armazenar as informações da baia de entrada e da baia de saída. Desta forma, todas as informações de uma baia de teste estão estruturadas de forma padronizada, facilitando a sua replicação para as duas baias. Cada instância da estrutura contém as seguintes informações:

*PresencaProduto:* Contém o sinal proveniente do sensor fotoelétrico da baia.

*PresencaLogica:* É sempre atualizado, para cada baia, de acordo com regras descritas adiante.

*Posicao\_Absoluta:* Constante que especifica o valor lido pelo *encoder* absoluto quando a gôndola de entrada ou saída está alinhada, respectivamente, com a baia de entrada ou saída.

*Carro\_Alinhado:* Indica quando a gôndola de entrada ou saída está alinhada, respectivamente, com a baia de entrada ou saída.

**Baia de Testes:** De forma semelhante às baias de entrada e saída, definiu-se uma estrutura de dados especialmente para armazenar as informações de uma baia de testes. Cada instância da estrutura de baia contém as seguintes informações:

*Raia\_Direita:* Constante que indica quando a baia é posicionada fisicamente na raia direita.

*Raia\_Esquerda:* Constante que indica quando a baia é posicionada fisicamente

na raia esquerda.

*PresencaProduto*: Contém o sinal proveniente do sensor fotoelétrico da baia de teste.

*PresencaLogica*: É sempre atualizado, para cada baia de teste, de acordo com regras descritas adiante.

*Posicao\_Absoluta\_Carga*: Constante que especifica o valor lido pelo encoder absoluto quando a gôndola de entrada está alinhada com a baia de teste.

*Carro\_Alinhado\_Carga*: Indica quando a gôndola de entrada está alinhada com a baia de teste.

*Posicao\_Absoluta\_Descarga*: Constante que especifica o valor lido pelo encoder absoluto quando a gôndola de saída está alinhada com a baia de teste.

*Carro\_Alinhado\_Descarga*: Indica quando a gôndola de saída está alinhada com a baia de teste.

*Baia\_no\_Fifo*: É sempre atualizado, indicando quando uma baia de teste já está presente na fila de baias com produtos testados.

*Baia\_em\_Carregamento*: Indica quando o produto da baia está sendo retirado.

*Bloqueio*: Contém o sinal proveniente da seccionadora de bloqueio da baia de teste.

*Teste\_Desacoplado*: Contém o sinal proveniente do sensor indutivo indicando que o sistema de testes está desacoplado do produto na baia.

*Botao\_Inicio\_Testes*: Contém o sinal proveniente do botão de início de teste da baia.

*Baia\_em\_Testes*: Memoriza quando a baia está em teste ou não.

*Sinal\_Pulso\_Aprovado*: Contém o sinal proveniente do sistema de testes para a baia quando o produto aprovou no teste.

*Aprovado*: Memoriza o sinal recebido pelo sistema de testes, indicando o estado aprovado do produto que está na baia.

*Sinal\_Pulso\_Reprovado*: Contém o sinal proveniente do sistema de testes para a baia quando o produto reprovou no teste.

*Reprovado*: Memoriza o sinal recebido pelo sistema de testes, indicando o estado reprovado do produto que está na baia.

*FimDeTestes*: Memoriza quando já foi recebido o sinal de aprovado ou reprovado.



Indica que baia está com o teste finalizado no produto.

**Conjunto de Baias de Testes:** É o conjunto de todas as instâncias da estrutura de dados definida anteriormente, para cada baia de teste. Todas as instâncias devem ter suas variáveis devidamente atualizadas e calculadas.

**Fila de Baias com Produtos Testados:** Esta estrutura armazena as baias em que os produtos já estão testados e prontos para serem retirados pelo Carro de Deslocamento. Quando uma baia tem seu teste finalizado, ela é colocada na fila. A baia apenas é retirada da fila quando seu produto é retirado pelo *Shuttle Cart*, na gôndola de saída.

**Ciclo de Transferência de Produto:** Esta estrutura de dados define as fases de um ciclo de movimentação do sistema; usualmente, de uma baia até a outra. Um booleano "Cic" armazena a informação de quando um ciclo de movimentação está acontecendo, sendo que, nesse caso, uma de suas fases (F1, F2, F3, F4) também está acionada. As fases do ciclo de transferência devem ser utilizadas de forma que as fases determinem uma estrutura de estados sequencial, não podendo ocorrer simultaneamente.

## 5.2 Estruturas de Controle

Nesta seção, cada estrutura de controle tem seu modelo de dinâmica a eventos discretos representado por autômatos estendidos. Este tipo de representação consiste em uma estrutura de controle finita e um conjunto de variáveis, também finito (Jéron, 2006). Cada estado é representado por um nodo e as transições são denotadas por setas. Cada transição pode conter uma condição sobre as variáveis do sistema (guarda) e pode desencadear alterações sobre as mesmas (ações). (Harel, 1987)

**Presença Lógica:** Tanto nas baias de entrada e saída, de testes e nas duas posições em cima do carro, a presença de um produto é definida pelo acionamento do sensor fotoelétrico na respectiva posição. Um bit de presença lógica é definido para cada posição com o objetivo de evitar o mal funcionamento do sistema para condições em que o sensor possa indicar um sinal incoerente ao esperado (caso em que o operador acidentalmente aciona o sensor por um curto momento, ou no caso em que um produto está em cima do sensor mas por causa de algum balanço o desativa, por exemplo).

O bit de presença lógica é sempre ativado quando um ciclo de transferência para a

respectiva posição é finalizado, e resetado quando um ciclo partindo da posição é finalizado (pode ser visualizado, como exemplo, na Figura 20). Desta forma, a informação do sensor só se torna relevante para o funcionamento do sistema quando combinada com a presença lógica. Como resultado, o sistema deve ignorar situações em que um produto se torna presente numa posição em que não foi transferido ou a ausência quando ainda não foi transferido para uma posição posterior.

Considerando-se as situações indevidas em que um produto pode ser colocado ou retirado com a mão pelo operador, foi implementado uma lógica para atualizar o estado do bit de presença lógica quando o estado do sensor e da presença lógica ficam incoerentes por um determinado tempo limite e, neste caso, o bit se atualiza com o mesmo valor que o sensor de presença.

Na Figura 19 esse comportamento é modelado em um autômato estendido. O estado inicial, representado por um círculo duplo, considera a situação em que a presença lógica tem o mesmo estado que a presença do produto. A única transição possível partindo desse estado tem como guarda a condição de desigualdade entre a presença lógica e a presença física de produto. Caso satisfeita a condição, é tomada a ação de iniciar um novo temporizador e a transição ocorre. No novo estado alcançado, a transição de retorno para o estado inicial tem duas condições de guarda: o temporizador atingir 5 segundos e, nesse caso, é tomada a ação de alterar o valor da presença lógica para o mesmo que a presença física do produto; ou a condição de igualdade voltar a ser satisfeita.

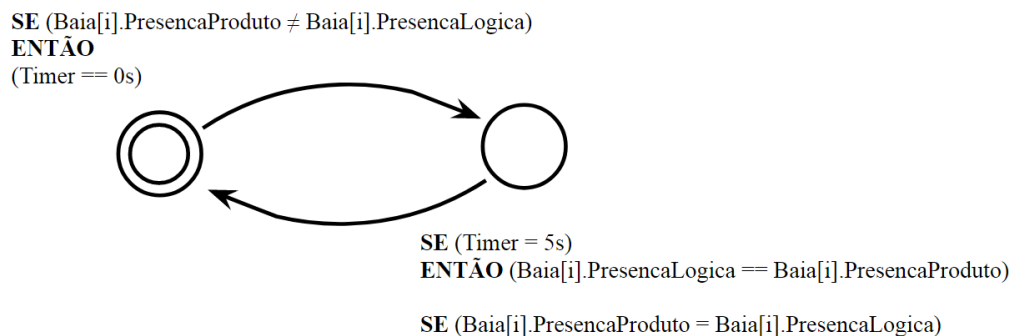


Figura 19: Autômato modelo do reset de presença lógica

Fonte: autoria própria

**Ciclo de Movimento da Baia de Entrada para a Gôndola de Entrada:** O ciclo para transporte de um produto partindo da baia de entrada e em direção à gôndola

de entrada no carro de deslocamento, modelado pelo autômato apresentado na Figura 20, só acontece quando existe presença lógica e física no transportador da baia de entrada, não existe presença lógica e nem física na gôndola de carga do carro e, ainda, não existe nenhum outro ciclo de movimento que envolva o carro ou a baia de entrada. Uma vez ativo o ciclo, sua primeira fase é ativada e nela o sistema se mantém até que a variável que indica que o carro está alinhado seja verdadeiro (`BaiaEntrada.Carro_Alinhado`). Na sequência, a primeira fase é desativada e a segunda é ativada, a qual se encerra quando o sensor indique presença de produto no carro. No final da fase dois, o ciclo de movimentação e ela mesma são desativados. A presença lógica na posição de carga do carro é ativado, enquanto na baia de entrada é desativado.

Enquanto o ciclo não está ativo nenhuma saída é acionada. Na primeira fase, o setpoint de posição para o hardware dedicado de posicionamento é setado como sendo a posição absoluta da baia de entrada. Na segunda fase, os motores dos roletes da baia de entrada e da gôndola de entrada são acionados.

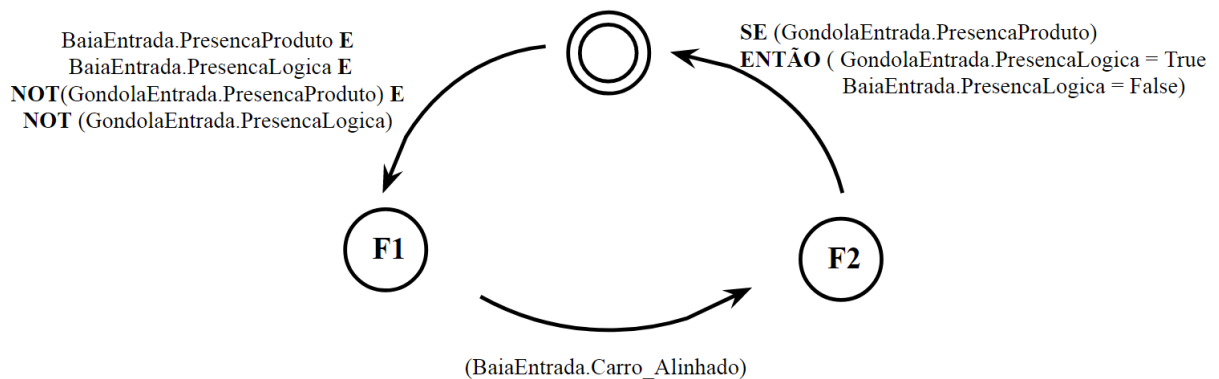


Figura 20: Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo da Baia de Entrada e Gôndola de Entrada

Fonte: autoria própria

**Procura de Gôndola Disponível:** Sempre que um novo produto se posicionar na baia de entrada e uma baia de destino ainda não foi definida (a variável `EntradaIndexada` está com valor zero), o programa realiza uma verificação em todas as baias do sistema no conjunto de baias de teste, identificando uma que esteja disponível e dando preferência para as baias mais próximas às baias de entrada e saída. Uma baia que não esteja bloqueada, não tenha presença, não tenha presença lógica, não esteja em teste, não esteja sendo carregada nem descarregada, é apta para receber um novo produto a ser

testado e pode ser armazenada na variável `EntradaIndexada`, identificando-a como baia destino para o próximo produto a entrar no carro.

### **Ciclo de Movimento do Carro de Deslocamento para uma Baia de Teste:**

O ciclo para transporte para entrada de um produto para dentro de uma das baias de teste, modelado pelo autômato apresentado na Figura 21 se inicia quando existe presença lógica e física na gôndola de entrada do carro de deslocamento, existe uma baia de teste já indexada na variável `EntradaIndexada`, não existe presença lógica e nem física na baia de teste indexada e, ainda, não existe nenhum outro ciclo de movimento que envolva a gôndola de entrada.

Uma vez ativo o ciclo, sua primeira fase é ativada e nela o sistema se mantém até que a gôndola de entrada esteja alinhada à baia indexada (a variável `Baia[EntradaIndexada].Carro_Alinhado.Carga` está ativa). Satisfeitas estas condições, a primeira fase é desativada e a segunda fase fica em espera até que o acoplamento parasita do lado esquerdo ou direito, dependendo da baia indexada, esteja em cima. Ativada a terceira fase, o sistema encerra o ciclo no momento em que o sensor da baia indexada identifique presença. Por fim, ativa a presença lógica na baia de teste.

Enquanto o ciclo não está ativo nenhuma saída é acionada. Na primeira fase, o *setpoint* de posição para o hardware dedicado de posicionamento é setado como sendo a posição absoluta para carga da baia de teste indexada na variável `EntradaIndexada`. Na segunda fase, o sistema parasita da gôndola de entrada referente à raia da baia de teste indexada é acionado. Na terceira fase, roletes da gôndola de entrada são acionados no sentido direto ou reverso, de acordo com a raia da baia de testes indexada.

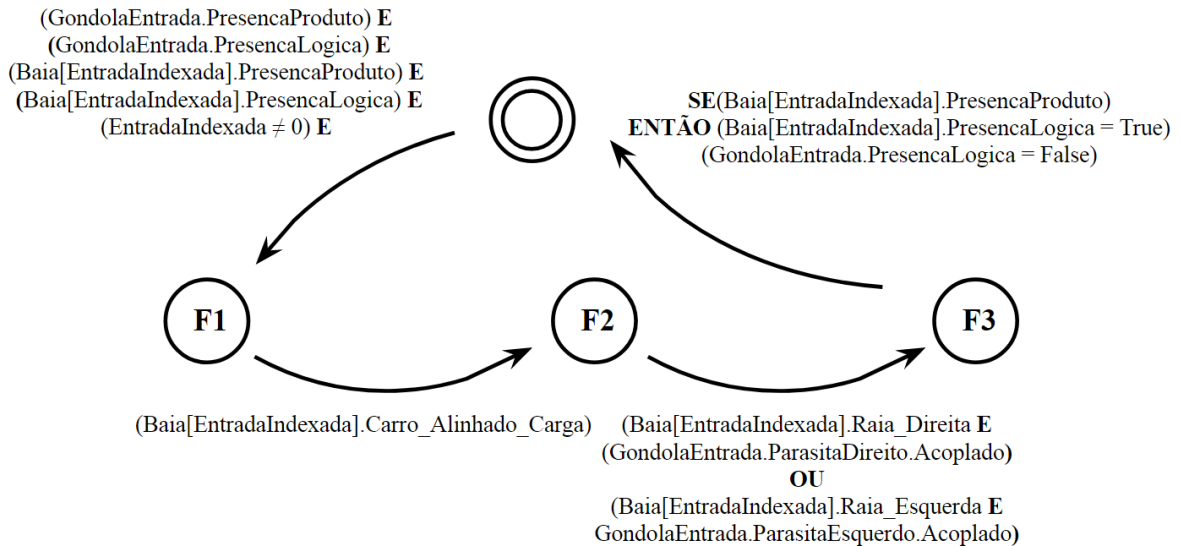


Figura 21: Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo da Gôndola de Entrada para uma Baia de Teste

Fonte: autoria própria

**Baia de Testes:** No seu estado inicial, uma baia de teste se encontra vazia, podendo estar ou não bloqueada. Quando um produto é posicionado, sua presença lógica confirmada, o sistema está acoplado ao produto e o operador comanda o início de teste pela botoeira, o teste é inicializado. Uma vez em teste, a lógica de controle espera pelo sinal de aprovado ou de reprovado pelo sistema de testes, em seguida memorizando a situação do produto na respectiva baia. Ao se desacoplar o sistema de testes e apertar o botão de liberação de produto, é memorizado o fim do teste na gôndola, o qual só é resetado quando o produto é retirado e a lógica retorna ao estado inicial.

As saídas do sistema são acionadas de acordo com o estado em que se encontra a lógica da respectiva baia. Para o acionamento das luzes sinalizadoras do resultado de teste na botoeira, são utilizadas as informações de aprovado ou reprovado pelo sistema de testes e a informação de fim de teste, de forma que a lâmpada sinalize, também, que o produto precisa ser liberado pelo operador. A lâmpada indicadora do bloqueio da baia é acionada de acordo com o estado da entrada de bloqueio. A Figura 22 modela este comportamento utilizando autômato.

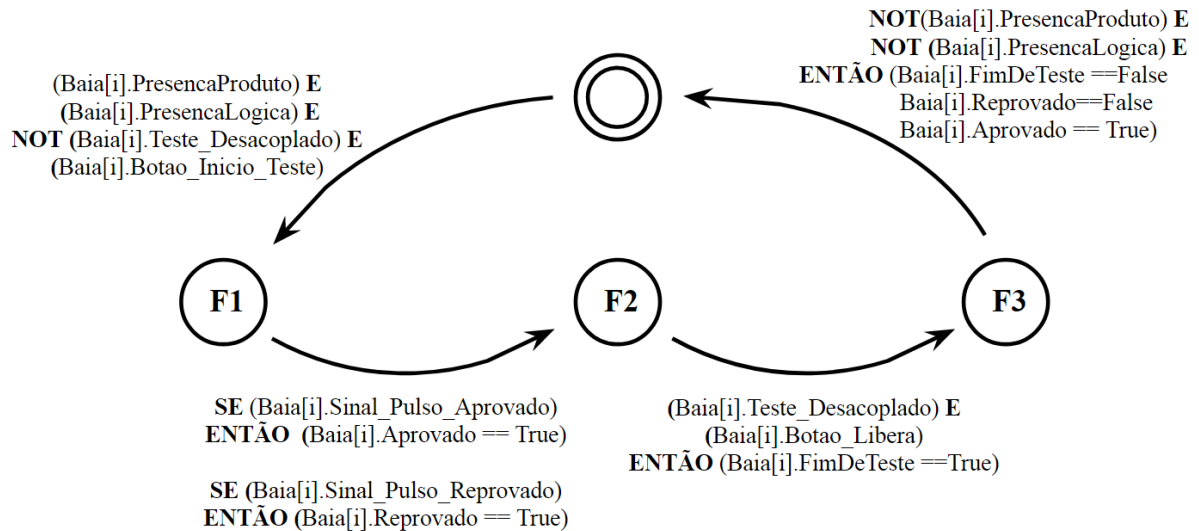


Figura 22: Autômato modelo de uma Baia de Teste

Fonte: autoria própria

**Inserção e Remoção de Baias com Produtos Testados na Fila:** Toda baia de teste que tenha presença de produto, presença lógica e esteja com teste seu finalizado é inserida no fila de baias com produtos já testados.

Uma nova baia é retirada da fila de baias com produtos já testados quando a fila não está vazia e sempre que a posição de descarga do carro está sem uma baia definida (a variável SaidaIndexada está com valor zero). Ao ser retirada da fila, a baia é armazenada na variável SaidaIndexada, indicando essa ser a próxima baia a ter seu produto retirado, a variável Baia[SaidaIndexada].Baia\_na\_Fila é desativado, desta forma, liberando a baia para receber um novo produto. A Figura 23 modela este comportamento utilizando autômato.

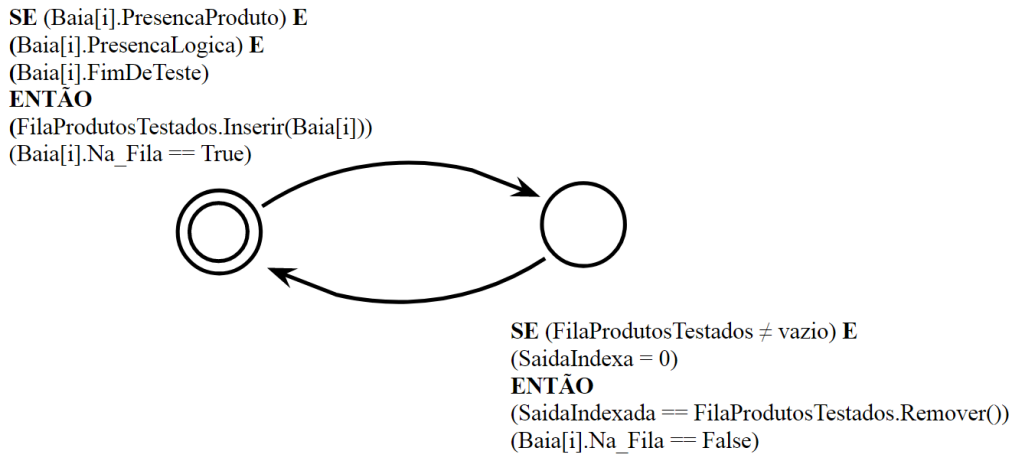


Figura 23: Autômato modelo de inserção e remoção na Fila de Produtos Testados

Fonte: autoria própria

### Ciclo de Movimento de uma Baia de Teste para a Gôndola de Saída:

O ciclo de transporte para retirada de um produto de uma das baias de teste, modelado pelo autômato apresentado na Figura 24, se inicia quando existe uma baia já indexada para retirada na variável *SaidaIndexada*, a baia indexada tem seu bit de status indicando que está na fila de produtos testados, existe presença lógica e física na baia de testes, não existe presença lógica e nem física na posição de descarga no carro de deslocamento e, ainda, não existe nenhum outro ciclo de movimento que envolva a posição de carga do carro.

Uma vez ativo o ciclo, sua primeira fase é ativada e nela o sistema se mantém até que o carro esteja alinhado à baia indexada para retirada (neste caso, a variável *Baias[SaidaIndexada].Carro\_Alinhado\_Descarga* está ativo). Satisfeitas estas condições, a primeira fase é desativada e a segunda fase fica em espera até que o acoplamento parasita do lado esquerdo ou direito, dependendo da baia indexada, esteja em cima. Ativada a terceira fase, o sistema encerra o ciclo no momento em que um dos sensores da posição de descarga do carro de deslocamento identifique presença. Por fim, é ativada a presença lógica na posição de descarga do carro e desativada na baia de teste indexada. Os bits de status com o resultado do teste (Aprovado, Reprovado) são comparados para ativar o *tracking* do produto até a saída do sistema e em seguida são desativados.

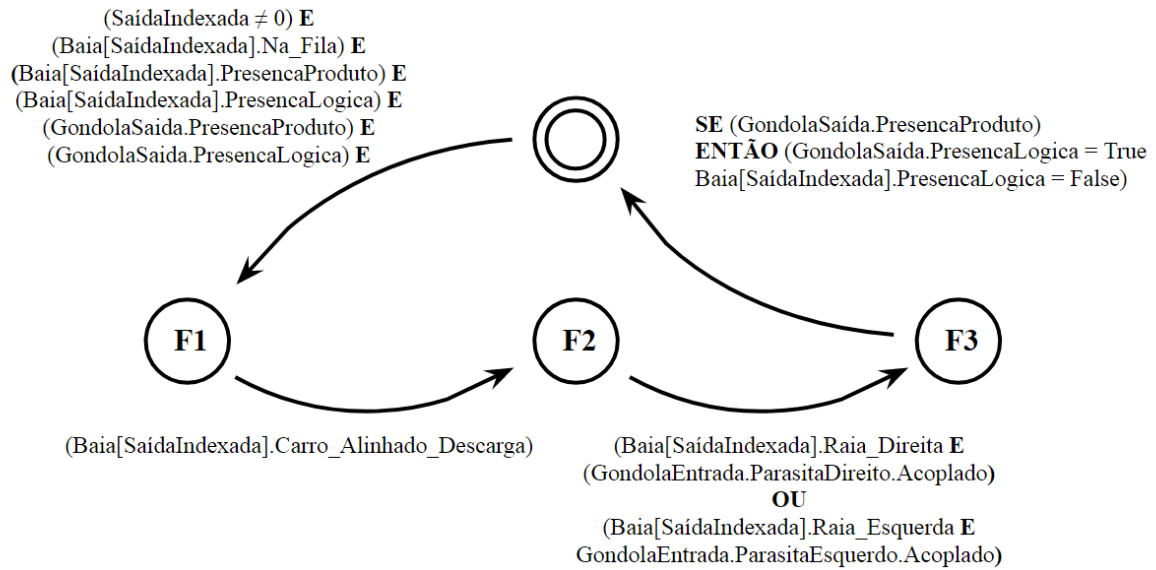


Figura 24: Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo de uma Baia de Teste para a Gôndola de Saída

Fonte: autoria própria

### Ciclo de Movimento do Carro de Deslocamento para a Baia de Saída:

O ciclo de transporte para retirada de um produto para a baia de saída, modelado pelo autômato apresentado na Figura 25 se inicia quando existe presença lógica e física na gôndola de saída do carro de deslocamento, não existe presença lógica e nem física na baia indexada e, ainda, não existe nenhum outro ciclo de movimento que envolva a posição de carga do carro.

Uma vez ativo o ciclo, sua primeira fase é ativada e nela o sistema se mantém até que o carro está alinhado à baia de saída (neste caso, quando a variável BaiaSaída.Carro\_Alinhado.Carga estiver ativo). Na sequência, a primeira fase é desativada e a segunda é ativada, a qual se encerra quando o sensor de saída indique presença de produto. No final da fase dois, o ciclo de movimentação e ela mesma são desativados. A presença lógica na posição de descarga do carro é desativado, enquanto na baia de saída é ativado. O *tracking* do produto que estava na posição de descarga do carro é copiado para o *tracking* na posição da baia de saída e, depois, é apagado.



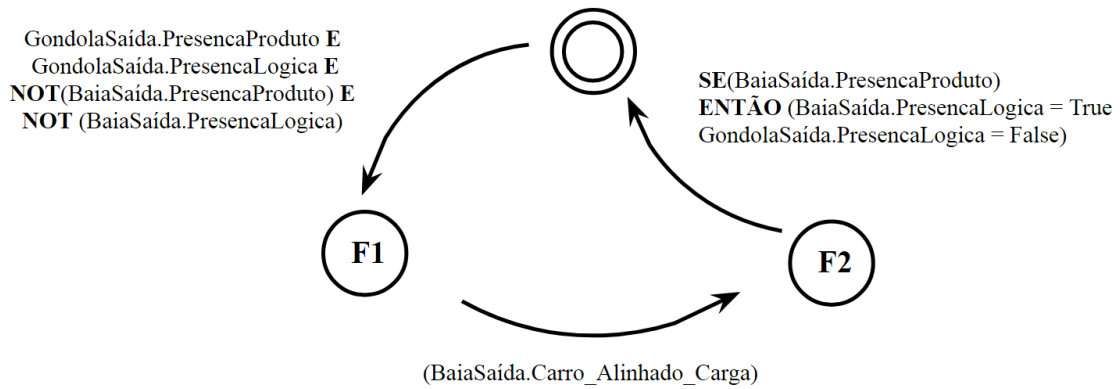


Figura 25: Autômato modelo do Ciclo de Movimento partindo do Carro de Deslocamento para a Baía de Saída

Fonte: autoria própria

O software utilizado para desenvolvimento da lógica do sistema foi o RSLogix 5000, disponibilizado pela Rockwell Automation para sistemas baseados em controladores da suíte Logix5000 (ControlLogix®, CompactLogix®, FlexLogix®, SoftLogix5800® e DriveLogix®). Neste software, todo o sistema físico é configurado; tags são gerenciadas; lógicas e funções de controle discreto são programadas; e o download e upload do programa aos dispositivos é realizado.

O software é compatível à norma IEC-1131 e, desta forma, tem suporte à programação nas linguagens: Ladder Diagram, Sequential Function Charts, Function Block Diagram, Structured Text. A programação pode ser feita offline, sem necessidade de conexão com a CPU do CLP; ou online, disponibilizando recursos a partir da conexão da CPU do CLP utilizando para isto uma conexão Ethernet.

### 5.3 Configuração dos Módulos de Rede

A integração dos novos adaptadores de rede e módulos de entrada e saída à rede já instalada também foi feita utilizando-se o software RSLogix5000. Este, por sua vez, dispõe de um ambiente integrado ao RSLinx Classic Gateway, software para configuração, gerenciamento e diagnóstico de redes de comunicação da plataforma Rockwell. Uma rede Ethernet/IP já havia sido configurada no software do CLP em execução. Nesta rede, o *Backplane* fica instalado no CLP, que controla uma rede local e tem Internet Protocol (IP) definido por *192.168.1.10*.

Os novos adaptadores de rede (*1734-AENRTR 1734 Ethernet Adapter, 2-Port,*

*Twisted Pair Media*) foram configurados para também compor a rede privada controlada pelo CLP, utilizando os IPs *192.168.1.67* e *192.168.1.68*, respectivamente para o *Adaptador\_Carro\_De\_Vacuo* e *Adaptador\_Baias\_De\_Testes*. Os módulos componentes de cada adaptador também foram configurados, bem como a quantidade e ordem de cada um no chassi (Figura 26).

Após a configuração de um novo dispositivo na rede, novas tag's de comunicação são geradas no RSLogix5000 e ficam prontas para uso na lógica de programação. Neste caso, para cada módulo de entrada e saída foi criada uma tag do tipo SINT(8 bits), contendo o estado de seus pontos. Para acessar o valor, por exemplo, do sétimo ponto de entrada do décimo módulo do adaptador responsável pelos sinais do carro, a respectiva tag de acesso é: *Adaptador\_Baias\_De\_Testes:10:I.6*

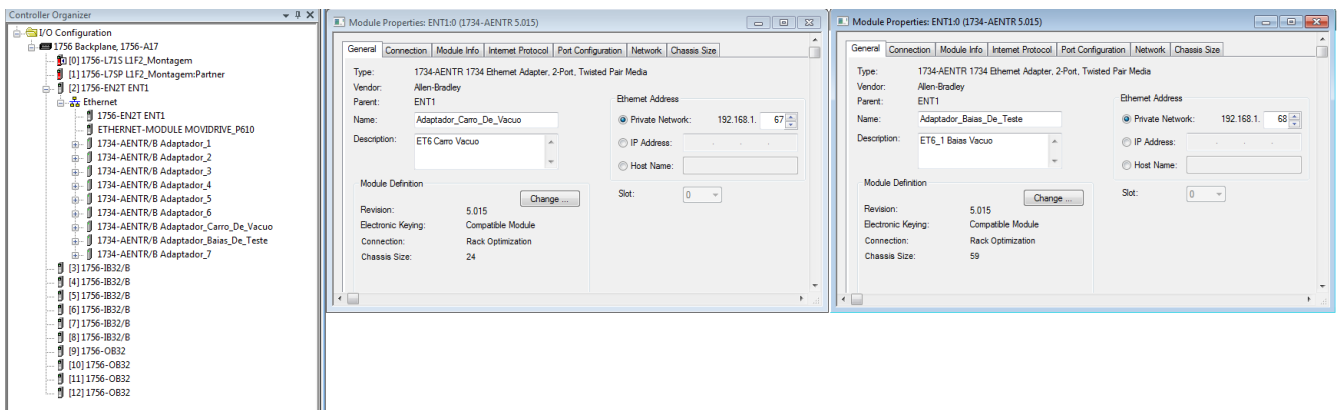


Figura 26: Configuração dos nodos de rede no ambiente integrado ao RSLogix5000.

Fonte: autoria própria

#### 5.4 User-Defined Data Types

Para implementar as estruturas de dados descritas em 5.1, foi utilizada a funcionalidade do Logix5000 para definição de tipos: User-Defined Data Types (UDTs). Desta forma, cada variável interna das estruturas foi definida como um novo membro na UDT. Na Figura 27, por exemplo, está representada a UDT que implementa a estrutura de dados para um ciclo de movimento.

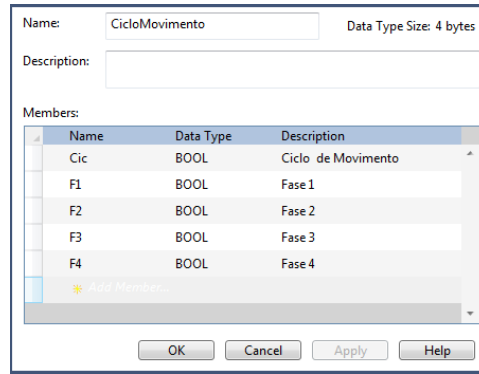


Figura 27: UDT Ciclo de Movimento

Fonte: autoria própria

**Conjunto de Baias de Testes:** Foi implementado como um *array* com vinte e sete componentes da UDT que implementa a estrutura da BaiaTeste, onde cada item contém as informações de uma das baias do sistema. Cada baia de teste é identificada por um número entre um e vinte e sete, de forma que este também seja seu index de acesso no array. Em cada ciclo de scan do CLP todas as vinte e sete baias instanciadas tem o valor referente aos seus membros atualizados. O membro "PresencaProduto", por exemplo, é sempre atualizado com o valor da entrada em que está conectado o sensor fotoelétrico da respectiva baia de testes.

**Fila de Baias com Produtos Testados:** Esta estrutura foi implementada utilizando um array de inteiros com vinte e sete posições, no qual as operações de inserção e remoção são realizadas com instruções FIFO Load(FFL) e FIFO Unload(FFU), garantindo que o primeiros produtos a finalizarem os testes, sejam os primeiros a ser retirados. Neste array são armazenados apenas os índices das baias.

## 5.5 Lógicas de Controle

As estruturas lógicas de controle apresentadas em 5.2 foram implementadas em linguagem Ladder e em Structured Text Language (STL). Os estados dos autômatos foram implementados como tags booleanas. A transição entre os estados ocorre quando a condição é satisfeita e, neste caso, a tag do estado anterior é desativada e a tag que representa o estado para o qual se transferiu é ativada.

Como exemplo, o autômato demonstrado para o ciclo de movimentação partindo da baía de entrada até a gôndola de entrada (Figura 20) foi implementado em Ladder, como pode ser visto na Figura 28.

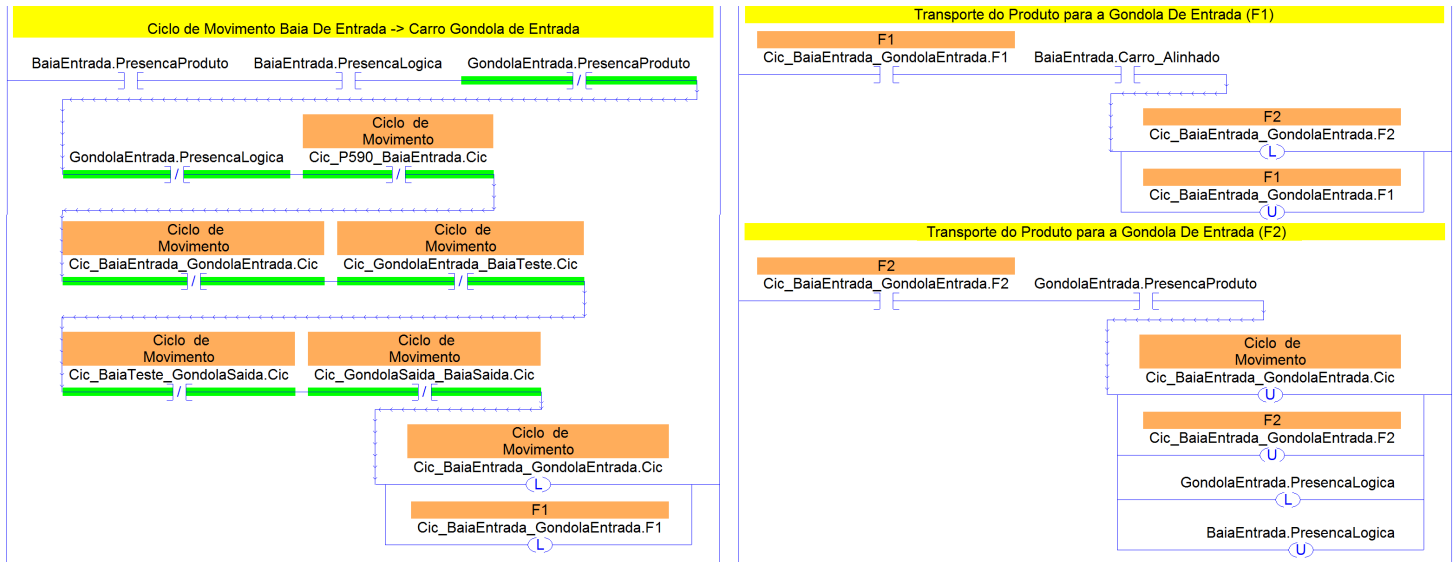


Figura 28: Lógica de Controle por Ciclos em Ladder

Fonte: autoria própria

## 5.6 Lógicas de Acionamentos

As lógicas de acionamento das saídas do sistema foram montadas com condições sobre o estado do sistema. Para o acionamento no sentido de avanço dos roletes motorizados da gôndola de entrada, por exemplo, suas condições de acionamento estão relacionadas com o ciclo de transferência da baía de entrada para a gôndola de entrada e com o ciclo de transferência da gôndola de entrada para uma baía de testes. Nos dois casos, o carro deve estar alinhado e, no caso da transferência para uma das baias de teste, a baía deve estar posicionada na raia da direita. A Figura 29 demonstra o código em Ladder que implementa esta lógica.

O mesmo processo foi realizado, de forma semelhante, para todas as saídas do sistema, incluindo as lâmpadas das baias de teste e o *setpoint* de posicionamento para o carro.

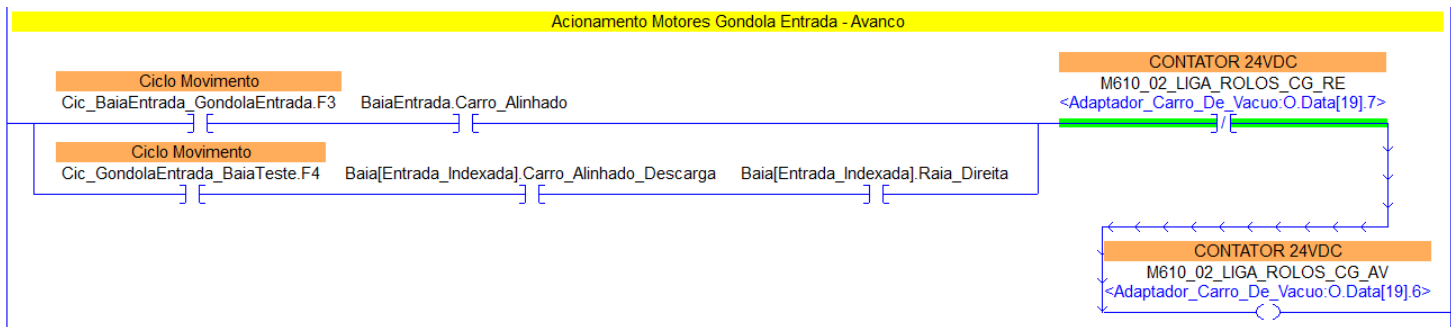


Figura 29: Lógica de Acionamento em Ladder

Fonte: autoria própria

Neste capítulo apresentou-se a modelagem da estrutura de dados e da lógica de controle, baseadas nos componentes do sistema e utilizando o conceito de ciclo de transporte. As estruturas foram modeladas como conjuntos de variáveis representando o estado de cada uma de suas instâncias. Autômatos estendidos foram utilizados para descrever a lógica de controle, suas guardas foram definidas como condições sobre as estruturas de dados, bem como suas respectivas ações. Por fim, utilizando o ambiente Logix5000, foi apresentado um exemplo de implementação das estruturas de dados utilizando UDTs e a implementação de um modelo da lógica de controle e de acionamento em *Ladder Diagram*.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este projeto nasceu da necessidade de automatizar um processo de testes paralelos na totalidade dos produtos produzidos em uma linha de montagem, para isso, utilizando um sistema de Shuttle Cart. O trabalho se baseou em fundamentos sobre os principais modos e modelos de transporte de produtos existentes na literatura para propor uma lógica de controle. A implementação envolveu tanto a especificação dos equipamentos, de forma que tivessem interoperabilidade e fosse familiar à equipe interna da fábrica, bem como a implementação das lógicas de controle propostas em *Ladder Diagram* no ambiente de desenvolvimento disponível.

O sistema desenvolvido está em funcionamento, cumpre com os requisitos do cliente e resolve o problema apresentado. O resultado mostrou que as estratégias propostas e especificações para implementação são viáveis. O projeto desenvolvido foi multidisciplinar com relação ao curso de Engenharia de Controle e Automação. De forma direta ou indireta, temas estudados na graduação, tais como: Modelagem e Controle de Sistemas a Eventos Discretos, Redes de Computadores para Automação e Eletrotécnica para Automação serviram como fundamento para a concepção da solução.

A validade da lógica de controle utilizada foi conferida, neste caso, com a planta em funcionamento durante produção real. Apesar do controle desenvolvido ser baseado em metodologia de desenvolvimento de sistemas e no uso de autômatos para modelagem da lógica de controle, ainda assim, foi concebido pela criatividade e experiência do programador. Este tipo de abordagem, apesar de comum no meio industrial, carece de verificação formal. A síntese utilizando o método de controle supervisorio poderia gerar, neste caso, controladores com garantia de funcionamento e possibilitaria a validação utilizando métodos formais.

## REFERÊNCIAS

- Pedro Luis Antonelli. Introdução aos Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), 2011. Disponível em: <http://www.ejm.com.br/download/Introducao%20CLP.pdf>. Acesso em: 2019.
- M. Castells. A Sociedade em rede. Fundação Calouste Gulbenkian, 2002.
- Yves Dallery and Stanley B. Gershwin. Manufacturing flow line systems: a review of models and analytical results. Queueing Systems, 12(1):3–94, Mar 1992. ISSN 1572-9443. doi: 10.1007/BF01158636. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF01158636>. Acesso em 2019.
- Fábio Soares de Lima. Estratégia de escalonamento de controladores pid baseado em regras fuzzy para redes industriais foundation fieldbus usando blocos padrões, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/bitstream/123456789/15418/1/FabioSL.pdf>. Acesso em: 2019.
- SINDINOVA FIEMG. Projeto de Adequação à NR-12, 2013. Disponível em: <http://www.sindinova.com.br/novo/wp-content/uploads/2013/12/APRESENTA%C3%87%C3%830-NR12-SENAI-rev.052.pdf> Acesso em: 2019.
- Mikell P. Groover. Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing, volume 5 of 5. Prentice Hall, 2007.
- Luiz Affonso Guedes. Classificação das redes para automação industrial, 2019. Disponível em: [https://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA0447/aulas/rai\\_cap3\\_part1.pdf](https://www.dca.ufrn.br/~affonso/DCA0447/aulas/rai_cap3_part1.pdf). Acesso em: 2019.
- David Harel. Statecharts: A visual formalism for complex systems. Sci. Comput. Program., 8(3):231–274, June 1987. ISSN 0167-6423. doi: 10.1016/0167-6423(87)90035-9. URL [http://dx.doi.org/10.1016/0167-6423\(87\)90035-9](http://dx.doi.org/10.1016/0167-6423(87)90035-9).
- Jéron. Symbolic determinisation of extended automata. Technical Report 1176, IRISA, February 2006.

John Paul MacDuffie. From Fixed to Flexible: Automation and Work Organization Trends from the International Assembly Plant Survey. MIT Sociotechnical Systems Research Center (SSRC), 1996.

Thiago Augusto Nogueira. Redes de comunicação para sistemas de automação industrial, 2009. Disponível em: <http://www.em.ufop.br/cecau/monografias/2009/THIAG00AUGUSTO.pdf>. Acesso em: 2019.

H.T. Papadopoulos and Cathal Heavey. Queueing theory in manufacturing systems analysis and design: A classification of models for production and transfer lines. European Journal of Operational Research, 92:1-27, 02 1996. doi: 10.1016/0377-2217(95)00378-9.

R.S. Pressman. Engenharia de Software - 7.ed. McGraw Hill Brasil, 2009. ISBN 9788580550443. URL <https://books.google.com.br/books?id=y0rH9wuXe68C>.

Automation Rockwell. Ethernet design considerations reference manual. Disponível em: [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/enet-rm002\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/rm/enet-rm002_-en-p.pdf). Acesso em: 2019.

Automation Rockwell. 1734 POINT I/O™, 2015. Disponível em: [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/1734-pp001\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/1734-pp001_-en-p.pdf). Acesso em: 2019.

Automation Rockwell. 1756 ControlLogix and GuardLogix Controllers, 2018. Disponível em: [https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/1756-td001\\_-en-p.pdf](https://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/td/1756-td001_-en-p.pdf). Acesso em: 2019.

Automation Rockwell. Sistemas de controle ControlLogix, 2019. Disponível em: <https://ab.rockwellautomation.com/pt/Programmable-Controllers/ControlLogix>. Acesso em: 2019.

Guilherme Santos. A pirâmide da automação industrial, 2012. Disponível em: <https://www.automacaoindustrial.info/a-piramide-da-automacao-industria>. Acesso em: 2019.



José Mauricio Santos. Topologias de redes de comunicação, 2006. Disponível em: [https://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo\\_topologias\\_de\\_rede.php](https://www.projetoderedes.com.br/artigos/artigo_topologias_de_rede.php). Acesso em: 2019.

I. Sommerville. Engenharia de software. PEARSON BRASIL, 2011. ISBN 9788579361081. URL <https://books.google.com.br/books?id=H4u5ygAACAAJ>.

Marcos Daniel Zancan. Contorladores Programáveis, 2011. Disponível em: [http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo\\_ctrl\\_proc\\_indust/tec\\_autom\\_ind/ctrl\\_program/161012\\_control\\_progr.pdf](http://redeetec.mec.gov.br/images/stories/pdf/eixo_ctrl_proc_indust/tec_autom_ind/ctrl_program/161012_control_progr.pdf) Acesso em: 2019.