

Sandro Azevedo da Mota

Desenvolvimento de um Protótipo de Inspeção Inteligente para PCBs com Componentes THT.

Brasil

2024

Sandro Azevedo da Mota

Desenvolvimento de um Protótipo de Inspeção Inteligente para PCBs com Componentes THT.

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

Universidade do Estado do Amazonas – UEA

Escola Superior de Tecnologia – EST

Engenharia de Controle e Automação

Orientador: Almir Kimura Junior

Coorientador: Vitor Fernando De Souza Gadelha

Brasil

2024

Ficha Catalográfica

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

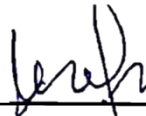
M917d	<p>Mota, Sandro Azevedo da Desenvolvimento de um Protótipo de Inspeção Inteligente para PCBs com Componentes THT / Sandro Azevedo da Mota . Manaus : [s.n], 2024. 76 f.: color.; 21,0 cm.</p> <p>TCC - Graduação em Engenharia de Controle e Automação- Universidade do Estado do Amazonas, Manaus, 2024. Inclui Bibliografia. Inclui Apêndice. Orientador: Almir Kimura Junior. Coorientador: Vitor Fernando De Souza Gadelha.</p> <p>1. Automação industrial. 2. Detecção de falhas. 3. Sistema cartesiano. 4. SMEMA. 5. Qualidade de produção. I. Almir Kimura Junior (Orient.) II . Vitor Fernando De Souza Gadelha (Coorient.) III. Universidade do Estado do Amazonas. IV. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU(1997)681.5</p>
-------	--

Sandro Azevedo da Mota

Desenvolvimento de um Protótipo de Inspeção Inteligente para PCBs com Componentes THT.

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

Trabalho aprovado. Brasil, 18 de dezembro de 2024:



Prof. Dr. Israel Mazaira Morales
Universidade do Estado do Amazonas
(UEA)



**Prof. Dr. Luiz Alberto Queiroz
Cordovil Júnior**
Universidade do Estado do Amazonas
(UEA)



Prof. Dr. Rodrigo Farias Araújo
Universidade do Estado do Amazonas
(UEA)

Brasil
2024

Agradecimentos

Gostaria de expressar minha gratidão à minha família, por todo apoio e incentivo, não apenas durante minha graduação, mas em cada etapa da minha vida.

À kaylane, pelo suporte constante e pelo companheirismo que fez toda a diferença nessa caminhada.

Ao meu orientador, professor Almir Kimura Junior, pela paciência e pelos valiosos conselhos que iluminaram meu caminho ao longo do curso.

Ao meu coorientador, professor Victor Fernando de Souza Gadelha, pela cuidadosa revisão textual e pela dedicação em contribuir com este trabalho.

Aos meus amigos próximos Henrique, João, Marcos, Eduardo, Kaue, Airton, Victor e Vitoriano. Por estarem ao meu lado desde o início da graduação, tornando os momentos felizes ainda mais memoráveis e aliviando os desafios nos dias difíceis. A amizade e o apoio de vocês foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

A todos os amigos que fiz ao longo da graduação, que trouxeram alegria e aprendizado para essa trajetória.

Em especial, agradece à empresa Digiboard, por todo o suporte essencial no desenvolvimento deste projeto, fornecendo não apenas recursos, mas também o incentivo necessário para superar desafios.

À Universidade do Estado do Amazonas, que foi minha segunda casa e um espaço de crescimento e aprendizado ao longo desses anos.

E a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, meu mais sincero agradecimento.

Por fim, que este trabalho, embora seja intitulado como conclusão, represente não um fim, mas o início de uma jornada ainda maior e repleta de novos desafios e conquistas.

“O único lugar onde sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.” (Albert Einstein)

Resumo

A automação industrial tem se mostrado fundamental para otimizar processos e garantir maior precisão na fabricação de produtos eletrônicos. Neste contexto, este trabalho apresenta o desenvolvimento e a implementação de sistema de inspeção inteligente voltado para a inspeção de componentes *THT (Through Hole Technology)*. O sistema consiste em um sistema cartesiano automatizado, que utiliza eixos X e Y controlados com alta precisão para movimentar uma câmera industrial sobre a superfície das placas eletrônicas, capturando imagens detalhadas de cada componente. O projeto envolveu a integração de um sistema de controle automatizado, baseado em um Controlador Lógico Programável (CLP), responsável pela movimentação coordenada dos eixos e pela sincronização com a operação da câmera. Isso garante maior repetibilidade e confiabilidade no processo de inspeção, além de reduzir significativamente a interferência de erros humanos, melhorando a qualidade e a consistência das inspeções realizadas na linha de produção. Entre os principais resultados obtidos, destaca-se a capacidade do módulo em identificar componentes inseridos de forma incorreta, invertida ou ausente, bem como reconhecer peças pertencentes a diferentes modelos. Esse processo é realizado por meio da comparação com uma imagem mestre, configurada previamente no sistema, que define os padrões ideais para cada componente e modelo de placa, permitindo a detecção precisa de falhas. Além disso, o sistema foi integrado à rede de comunicação *SMEMA (Surface Mount Equipment Manufacturers Association)*, possibilitando a automatização da transição das placas entre os postos de trabalho. Dessa forma, a placa só avança para a próxima etapa do processo após ser validada pelo módulo de inspeção, garantindo maior segurança e consistência na linha de produção. O sistema desenvolvido demonstrou ser robusto e escalável, otimizando processos e proporcionando ganhos significativos em termos de custo-benefício, assegurando produtos finais de alta qualidade e adaptando-se facilmente a diferentes modelos de placas e componentes.

Palavras-chave: Automação industrial, Detecção de falhas, Sistema cartesiano, Controle de eixos, Qualidade de produção, Rede *SMEMA*.

Abstract

Industrial automation has proven to be fundamental for optimizing processes and ensuring greater precision in the manufacturing of electronic products. In this context, this work presents the development and implementation of an intelligent inspection system aimed at inspecting THT (Through Hole Technology) components. The system consists of an automated Cartesian system that uses X and Y axes, controlled with high precision, to move an industrial camera over the surface of electronic boards, capturing detailed images of each component. The project involved integrating an automated control system based on a Programmable Logic Controller (PLC), responsible for the coordinated movement of the axes and synchronization with the camera's operation. This ensures greater repeatability and reliability in the inspection process while significantly reducing human error, improving the quality and consistency of inspections carried out on the production line. Among the main results achieved, the system demonstrated the ability to identify components that were incorrectly inserted, inverted, or missing, as well as recognize parts belonging to different models. This process is performed by comparing captured images with a master image, pre-configured in the system, which defines the ideal standards for each component and board model, enabling the precise detection of defects. Additionally, the system was integrated into the SMEMA (Surface Mount Equipment Manufacturers Association) communication network, allowing the automation of board transitions between workstations. As a result, a board only progresses to the next stage of the process after being validated by the inspection module, ensuring greater safety and consistency in the production line. The developed system proved to be robust and scalable, optimizing processes and providing significant cost-benefit gains, ensuring high-quality final products, and easily adapting to different board and component models.

Keywords: Industrial automation, Fault detection, Cartesian system, Axis control, Production quality, SMEMA network.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Linha do tempo da revolução industrial.	18
Figura 2 – CLP e suas interligações com os elementos externos.	21
Figura 3 – Modelo de software.	22
Figura 4 – Exemplo de Função.	23
Figura 5 – Exemplo de bloco de função.	24
Figura 6 – Modelo de quarto camadas TCP/IP.	26
Figura 7 – Exemplo de uma rede de automação.	27
Figura 8 – Exemplo de uma rede <i>Modbus RTU é Modbus/TCP</i>	30
Figura 9 – Mensagens padrão S7EMEA e seu princípio de funcionamento.	33
Figura 10 – Montagem de Componente Utilizando a Tecnologia THT.	34
Figura 11 – Montagem de Componente Utilizando a Tecnologia SMT.	35
Figura 12 – Principais Tipos de Pacotes de Componentes THT.	36
Figura 13 – Esquema de Funcionamento da Máquina de Solda por Onda.	36
Figura 14 – Processos da Aplicação da Pasta de Solda.	37
Figura 15 – Perfil Térmico Usado na Refusão da Pasta de Solda.	38
Figura 16 – Equipamentos que compõe uma típica linha de montagem SMT.	39
Figura 17 – Sensor de visão com IA integrada Série IV3.	46
Figura 18 – Exemplo de conexão de rede da série IV3.	47
Figura 19 – Fluxo de funcionamento IV3.	48
Figura 20 – Comunicação IV3 para CLP.	49
Figura 21 – Comunicação CLP para IV3.	49
Figura 22 – CLP AS228P.	50
Figura 23 – Programas em Ladder.	52
Figura 24 – Delta DOP-103WQ.	53
Figura 25 – Receita IHM.	54
Figura 26 – Tela inicial.	55
Figura 27 – Sistema de Segurança.	56
Figura 28 – Ajuste de movimento	57
Figura 29 – IO entrada.	57
Figura 30 – IO saída	57
Figura 31 – Easy Servo Nema 24 3NM 60HSE3N-D25.	58
Figura 32 – Projeto mecânico finalizado.	59
Figura 33 – Painel elétrico finalizado.	60
Figura 34 – Imagem Mestre.	65
Figura 35 – Componentes invertidos.	66
Figura 36 – Componentes ausentes.	66

Figura 37 – Inspeção Validada.	68
Figura 38 – Servidor <i>FileZilla</i>	68

Lista de abreviaturas e siglas

AIO	Automatic Optical Inspection
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
BGA	Ball Grid Array
CIP	Common Industrial Protocol
CLP	Controladores Lógicos Programáveis
CPU	Unidade Central de Processamento
CRC	Cyclic Redundancy Check
FBD	Function Block Diagram
FTP	File Transfer Protocol
GPL	General Public License
IA	Inteligência Artificial
IEC	International Electrotechnical Commission
IL	Instruction List
IHM	Interfaces Homem-Máquina
IOT	Internet of Things
LD	Ladder Diagram
LRC	Longitudinal Redundancy Check
ODVA	Open Device Vendor Association
PCBA	Placa de Circuito Impresso Montada
PCI	Placa de Circuito Impresso
PROFINET	Process Field Network
QR CODE	Quick Response Code
RFID	Radio Frequency Identification

RTU	Remote Terminal Unit
SFC	Sequential Function Chart
SCADA	Supervisory Control And Data Acquisition
SMEMA	Surface Mount Equipment Manufacturers Association
SMD	Surface-Mount Device
SMT	Surface-Mount Technology
SFTP	Secure File Transfer Protocol
ST	Structured Text
TCP/IP	Transmission Control Protocol/Internet Protocol
THT	Through-Hole Technology

Sumário

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Objetivos	15
1.1.1	Gerais	15
1.1.2	Específicos	15
1.2	Divisão do Trabalho	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1	Automação Industrial	17
2.1.1	Introdução á Indústria 4.0	17
2.1.2	Automação Industrial	17
2.1.3	Sistemas de Visão na Automação Industrial	19
2.2	Integração de CLP e IHM na Automação Industrial: Fundamentos e Tendências	20
2.2.1	Controladores Lógicos Programáveis (CLP)	20
2.2.1.1	Funções	23
2.2.1.2	Bloco de Função	23
2.2.1.3	Programas	23
2.2.2	Interfaces Homem-Máquina (IHM)	25
2.3	Redes Industriais	26
2.3.1	Protocolo <i>Modbus</i>	28
2.3.1.1	<i>Modbus/TCP</i>	29
2.3.2	Protocolo <i>Ethernet/IP</i>	30
2.3.3	<i>Surface Mount Equipment Manufacturers Association (SMEMA)</i>	32
2.4	Placa de Circuito Impresso	33
2.4.1	Tecnologias de PCIs	34
2.4.2	Processos de Montagem de PCIs	35
2.4.2.1	Processo de Montagem <i>THT</i>	35
2.4.2.2	Processo de Montagem <i>SMT</i>	36
2.4.3	Inspeção e Defeitos de PCIs	38
3	MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1	Projeto do Módulo de Inspeção Automática	45
3.1.1	Câmera Industrial: IV3-600 <i>Keyence</i>	45
3.1.2	CLP: Delta AS228P	49
3.1.3	IHM: Delta DOP103WQ	52

3.1.4	Motor: <i>Easy Servo Nema 24 3NM 60HSE3N-D25</i>	57
3.1.5	Projeto Mecânico	58
3.1.6	Projeto Elétrico	59
3.2	Integração com Sistema Interno	60
3.2.1	Comunicação via <i>Modbus</i>	61
3.2.2	Servidor <i>FTP(File Transfer Protocol)</i>	62
4	RESULTADOS	64
4.1	Cadastro das Imagens Mestres	64
4.2	Teste em Linha de Produção	67
5	CONCLUSÕES	69
5.1	Trabalhos Futuros	70
	REFERÊNCIAS	71
	APÊNDICES	75
	APÊNDICE A –	76

1 Introdução

Na indústria, o envio de produtos com defeitos gera perdas financeiras significativas e pode comprometer a imagem da marca. Com consumidores cada vez mais exigentes, a automação da inspeção visual tornou-se uma necessidade, especialmente em setores como eletrônicos e automotivo, onde a precisão é crucial. No Brasil, a visão computacional tem sido amplamente adotada na montagem de componentes eletrônicos, como placas para PCs e notebooks. Esse setor depende de inspeções rigorosas para garantir a qualidade das conexões e o alinhamento preciso de cada componente. Erros de montagem em circuitos eletrônicos podem comprometer todo o funcionamento do dispositivo, aumentando os custos com retrabalho e potencialmente afetando a satisfação do cliente. A visão computacional permite identificar falhas como soldas imperfeitas ou componentes mal posicionados, agilizando a inspeção e minimizando desperdícios. Globalmente, o mercado de visão computacional reflete essa demanda crescente. Em 2023, ele foi avaliado em aproximadamente US\$ 14,98 bilhões, com projeções para alcançar US\$ 27,63 bilhões até 2028, impulsionado por uma taxa de crescimento anual composta de 13,5% ([GLOBALDATA, 2023](#); [RESEARCHANDMARKETS, 2024](#)). Esse aumento reflete a crescente necessidade de automação, especialmente em setores como eletrônicos, saúde, automotivo e varejo, onde a tecnologia garante um controle de qualidade mais eficaz e a competitividade em um mercado global cada vez mais exigente.

A inspeção óptica de placas de circuito impresso, no entanto, não é uma tecnologia nova. Ela teve início na década de 1940, com comparadores ópticos tradicionais, onde o controle era realizado por um trabalhador humano, que comparava duas imagens ampliadas de placas testadas. O dispositivo de teste era puramente mecânico e dependia da experiência e da visão dos trabalhadores. Com o tempo, os sistemas foram aprimorados e, com a automação, se tornaram cada vez mais complexos, garantindo um nível mais alto de inspeção e uma ampla gama de detecção de falhas. Atualmente, o sistema de Inspeção Óptica Automatizada (*AOI*) é uma máquina sofisticada e cara, focada na produção em larga escala ([KUNTE, 2018](#)).

Neste trabalho, foi desenvolvido um sistema de inspeção inteligente para uma linha de produção industrial com inserção manual de componentes do tipo *THT* (*Through Hole Technology*). O sistema integra componentes de hardware e software de maneira eficiente. A parte de hardware inclui um sistema cartesiano automatizado que possibilita o movimento preciso de uma câmera industrial, capturando imagens em coordenadas específicas da placa e facilitando o processamento e a análise automática das imagens. Esse sistema foi projetado com foco na facilidade de operação, tanto para o usuário final quanto para o técnico responsável pela manutenção.

A parte de software envolve a transferência das imagens registradas pela câmera industrial para o sistema interno da empresa, que é responsável por armazenar tanto as imagens corretas quanto as incorretas. As imagens incorretas são utilizadas como alerta visual, permitindo que o operador identifique os erros e tome as ações corretivas necessárias. A placa só é liberada para o próximo posto quando todas as inspeções forem concluídas e as imagens corretas forem vinculadas à placa, gerando assim um histórico completo e detalhado de cada item inspecionado. Esse processo assegura maior controle de qualidade e rastreabilidade, garantindo que apenas as placas que atendem aos padrões estabelecidos avancem na linha de produção.

1.1 Objetivos

1.1.1 Gerais

Desenvolver um Sistema de Inspeção Inteligente para componentes *THT*, com capacidade de executar movimentos pré-programados em áreas específicas da placa de circuito, facilitando a captura de imagens e a análise final, garantindo a qualidade e rastreabilidade do processo de produção.

1.1.2 Específicos

1. Desenvolver a estrutura mecânica do sistema cartesiano para a movimentação da câmera industrial.
2. Montagem do Pannel elétrico para o sistema cartesiano XY.
3. Selecionar a câmera industrial adequada para garantir imagens de alta qualidade.
4. Selecionar os motores DC para o sistema cartesiano.
5. Programação do CLP responsável para a movimentação e gravação das coordenadas de movimentos.
6. Criar uma interface homem-máquina (IHM) de fácil utilização, permitindo o controle direto do sistema .
7. Integrar a comunicação entre o CLP e a câmera industrial via *EtherNet/IP*.
8. integrar o CLP ao sistema interno da empresa via *Modbus TCP*.
9. Implementar a comunicação com os transportadores de entrada e saída de placa, usando o protocolo *SMEMA (Surface Mount Equipment Manufacturers Association)*.

1.2 Divisão do Trabalho

O trabalho está estruturado da seguinte forma: após esta introdução, o Capítulo 2 apresenta o Referencial Teórico, abordando os principais temas necessários para a implementação do projeto. O Capítulo 3 detalha a execução do projeto, descrevendo os materiais e métodos empregados em sua realização. No Capítulo 4, são discutidos os resultados obtidos ao longo do projeto. Finalmente, o Capítulo 5 traz as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 Referencial Teórico

Este capítulo aborda os principais conceitos teóricos utilizados neste trabalho. Inicialmente, discutimos o conceito de Automação Industrial e sua inserção no contexto da Indústria 4.0. Em seguida, exploramos uma de suas aplicações, especificamente em sistemas de visão. O capítulo continua com uma explicação detalhada sobre o Controlador Lógico Programável (CLP) e as Interfaces Homem-Máquina (IHM), introduzindo também os conceitos de redes industriais. Finalizamos com uma análise sobre as placas de circuitos impressos, abordando suas tecnologias e os possíveis defeitos que podem ocorrer na sua produção.

2.1 Automação Industrial

2.1.1 Introdução á Indústria 4.0

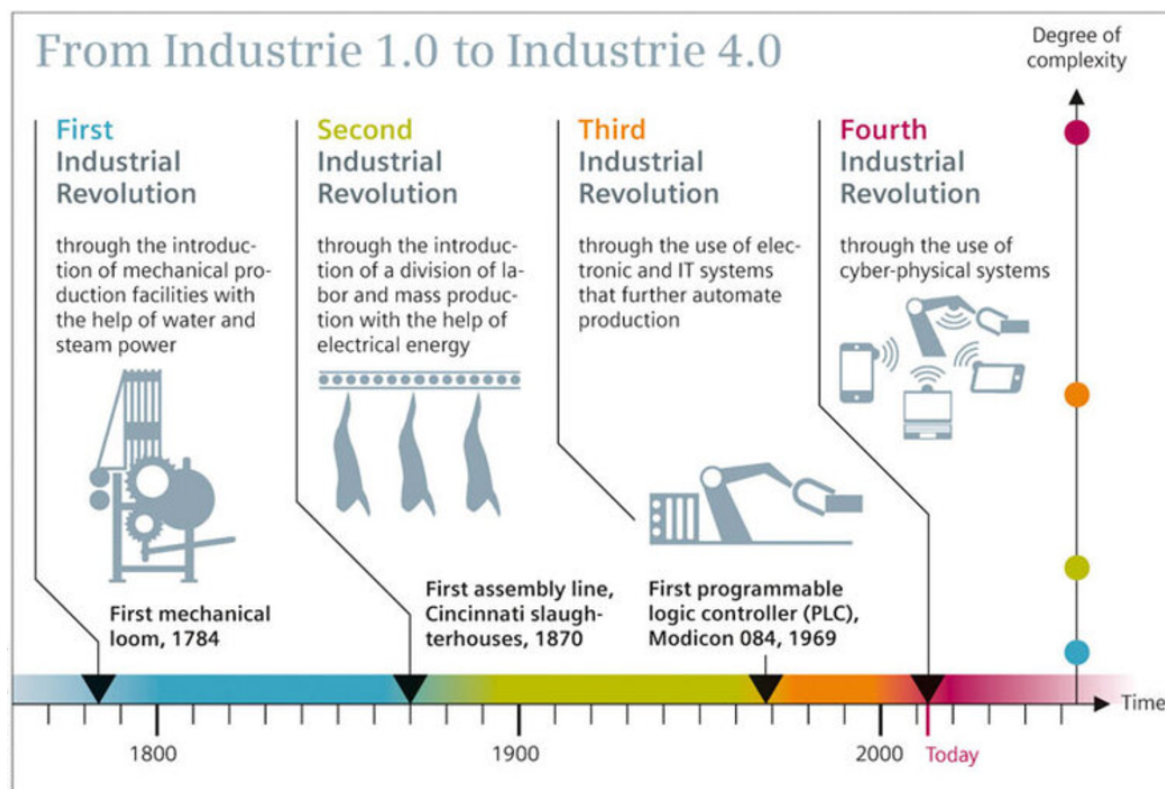
Ao longo da história, três grandes revoluções industriais moldaram o padrão de vida e o consumo da população, construindo a sociedade como conhecemos hoje. Cada uma dessas revoluções, com suas características distintas, trouxe mais tecnologia ao ambiente fabril, permitindo aumentos significativos na produtividade. Esse avanço não só gerou maior acesso da população a bens de consumo, como também criou um ciclo de aumento da demanda por mais produtos e, conseqüentemente, por mais tecnologia ([TEIXEIRA, 2014](#)).

A mais recente dessas fases de transformação nos modos de produção é conhecida como a Quarta Revolução Industrial. O termo Indústria 4.0 foi introduzido em 2011, na cidade de *Hannover*, Alemanha, durante uma feira de tecnologia, e se refere às mudanças profundas que estão ocorrendo em indústrias altamente desenvolvidas ([SACOMANO; SÁTYRO, 2018](#)). A Indústria 4.0 destaca-se principalmente pela virtualização da produção, que agora é mais controlada por equipamentos autônomos do que por intervenções humanas, além da enorme quantidade de dados gerados nesse processo ([PALMA, 2020](#)). Essas transformações têm o potencial de alterar radicalmente a forma como o gerenciamento da qualidade é realizado nas fábricas. Na imagem abaixo, podemos observar a evolução da indústria com mais detalhe.

2.1.2 Automação Industrial

As técnicas e dispositivos utilizados em conjunto em uma máquina ou processo industrial têm como objetivo o aumento da produção, a melhoria da qualidade, a redução de custos com mão de obra, a economia de energia e a diminuição de resíduos nos processos

Figura 1 – Linha do tempo da revolução industrial.



Fonte: Barteveyan (2016)

industriais. A eficiência desses elementos é fundamental para que as empresas possam se destacar em um mercado cada vez mais competitivo.

O principal objetivo de uma empresa é alcançar o máximo de produtividade com o menor custo possível. Esse objetivo é obtido ao combater desperdícios e ao otimizar o aproveitamento dos recursos no processo de transformação. Investimentos eficazes são aqueles que conseguem não apenas cobrir os custos, mas também gerar retorno sobre o capital aplicado, assegurando a sustentabilidade e a competitividade da empresa (NETO, 2003).

Quando uma organização decide implantar ou modificar um processo produtivo, é essencial que ela avalie a situação financeira e econômica em que está inserida. A análise do projeto deve ser feita considerando sua viabilidade como alternativa para a aplicação eficiente dos recursos, garantindo que os investimentos feitos tragam benefícios tangíveis para a operação e sustentabilidade da empresa. Esse cuidado no planejamento é vital para que os recursos sejam bem alocados e os riscos minimizados (FESTUGATO, 2016).

A implementação de tecnologias avançadas, como a automação industrial e a análise de dados em tempo real, permite que as empresas atinjam esses objetivos de forma

mais eficaz. Com a Indústria 4.0, por exemplo, a digitalização e a conectividade dos processos produtivos possibilitam a criação de sistemas mais inteligentes e autônomos, que não só aumentam a produção, mas também melhoram a eficiência energética e reduzem os desperdícios (SACOMANO; SÁTYRO, 2018). Essas inovações, integradas ao planejamento estratégico da empresa, resultam em uma gestão mais eficiente dos recursos, maximizando os resultados a longo prazo, podemos ter uma ideia

2.1.3 Sistemas de Visão na Automação Industrial

Os sistemas de visão computacional, ou simplesmente sistemas de visão, são tecnologias que permitem que as máquinas "vejam" e interpretem o ambiente, muitas vezes com mais precisão e velocidade do que os seres humanos. Em um contexto de automação, esses sistemas são essenciais para realizar tarefas como inspeção de qualidade, controle de processos, rastreabilidade de produtos e até mesmo navegação de robôs industriais.

Um sistema de visão industrial normalmente inclui câmeras de alta resolução, fontes de iluminação controlada e softwares especializados em processamento de imagem. O processamento dessas imagens pode ser realizado por algoritmos de inteligência artificial (IA), que são capazes de extrair características relevantes, como bordas, formas e padrões, possibilitando a análise em tempo real. De acordo com Szeliski (2022), os avanços em aprendizado de máquina e redes neurais têm sido fundamentais para o desenvolvimento de sistemas de visão mais eficientes e adaptáveis, permitindo maior precisão e flexibilidade nos processos industriais. Na Indústria 4.0, a integração dos sistemas de visão com outras tecnologias é essencial para otimizar a produção. As funções mais comuns dos sistemas de visão incluem:

- **Inspeção de Qualidade:** A inspeção visual automatizada é usada para detectar defeitos em produtos durante o processo de fabricação, assegurando padrões de qualidade elevados e consistentes. A tecnologia de visão é capaz de identificar defeitos imperceptíveis ao olho humano, como rachaduras minúsculas ou variações de cor.
- **Identificação e Rastreamento de Produtos:** A automação de processos de identificação, como leitura de códigos de barras, QR codes e RFID, tem sido amplamente utilizada em fábricas inteligentes. Esses sistemas de visão, associados a sensores de proximidade e RFID, podem garantir que os produtos certos sejam movidos para a próxima fase de produção ou embalagem (SZELISKI, 2022).
- **Controle de Processos:** Em processos de manufatura, sistemas de visão são empregados para monitorar variáveis como a altura de componentes, a posição de peças ou a forma de objetos, ajustando os parâmetros de operação automaticamente em resposta a variações detectadas.

Por outro lado, a implementação de sistemas de visão também abre oportunidades significativas para as indústrias. A capacidade de detectar defeitos automaticamente, aumentar a precisão e a velocidade de produção e integrar esses sistemas com outras tecnologias, como robótica e IoT, contribui para o aumento da competitividade das empresas no mercado global.

2.2 Integração de CLP e IHM na Automação Industrial: Fundamentos e Tendências

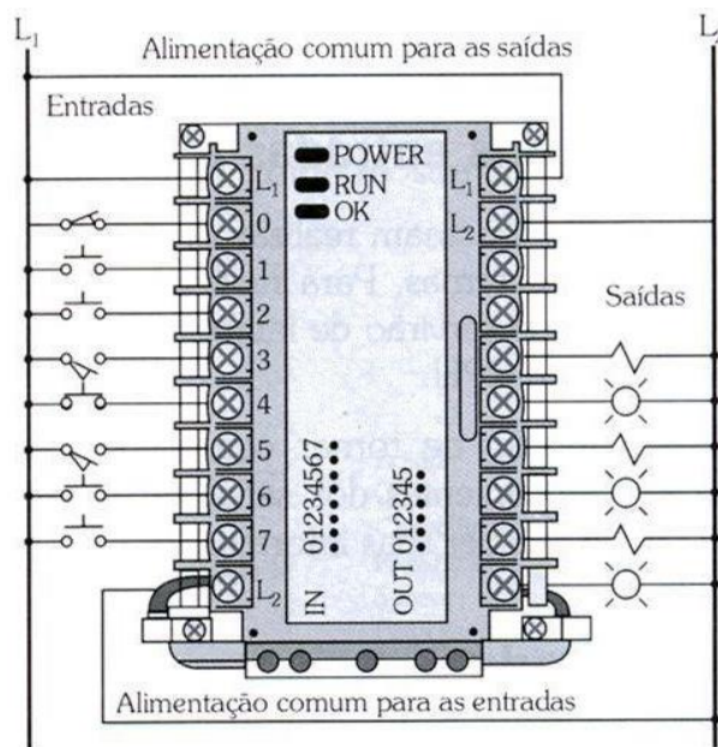
2.2.1 Controladores Lógicos Programáveis (CLP)

A partir do surgimento dos microprocessadores, ficou claro que esses dispositivos poderiam fornecer o hardware básico necessário para um controle lógico industrial mais flexível. Os primeiros Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) surgiram na década de 1960, com uma demanda específica da *General Motors*. A empresa enfrentava grandes dificuldades para alterar a lógica de controle dos painéis de comando a cada mudança na linha de montagem, o que implicava em altos custos de tempo e dinheiro. Com os CLPs, foi possível substituir os relés utilizados nas lógicas de comando por software, usando a linguagem de programação *ladder*, o que trouxe maior flexibilidade e eficiência ao controle das aplicações industriais (ANTONELLI, 2010).

De acordo com a norma *IEC 61131*, um CLP é definido como um sistema eletrônico digital projetado para ser utilizado em ambientes industriais. Ele utiliza uma memória programável para armazenar as instruções do usuário, com o objetivo de implementar funções específicas, como lógica, sequenciamento, temporização, contagem e aritmética. Essas funções visam controlar, em interação com as entradas e saídas do sistema, diversos tipos de máquinas e processos. A [Figura 2](#) ilustra fisicamente um CLP e suas interconexões com os elementos externos (CODE, ; IEC, 2003).

Um CLP é composto, essencialmente, por uma Unidade Central de Processamento (CPU) e um sistema de entradas e saídas (I/O). A CPU coordena todas as atividades realizadas pelo CLP e é formada por três componentes principais: o processador, o sistema de memória e a fonte de alimentação (ANTONELLI, 2010).

Figura 2 – CLP e suas interligações com os elementos externos.



Fonte: [Guarneri \(2009\)](#)

A [Figura 2](#) apresenta a estrutura básica de um CLP, onde a interface de entrada estabelece a conexão entre a CPU e os dispositivos que fornecem informações (como sinais de entrada gerados por chaves) e a interface de saída conecta os dispositivos controláveis (como sinais de saída ligados a cargas do sistema).

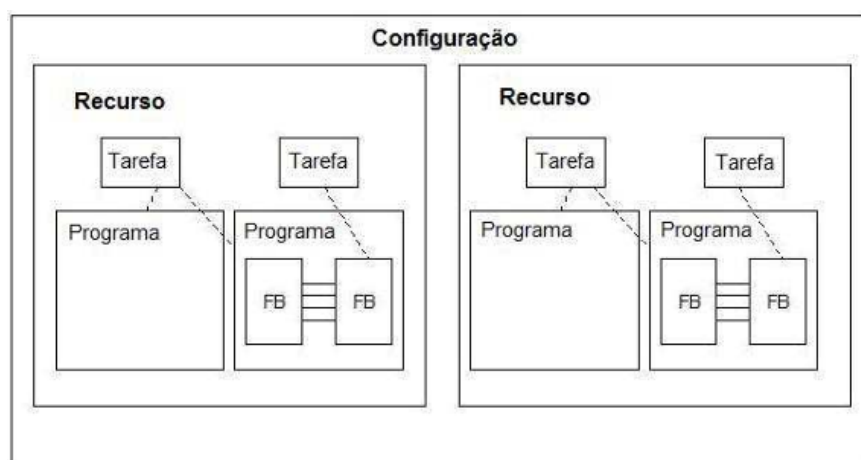
Durante seu funcionamento, a CPU realiza três atividades principais:

- **Leitura das informações:** A CPU lê os sinais provenientes dos dispositivos de entrada através das interfaces de entrada. Essas informações são armazenadas no sistema de memória da CPU para processamento.
- **Execução do programa de controle:** A CPU processa o programa de controle armazenado em sua memória, utilizando as informações de entrada previamente armazenadas no sistema de memória, e não diretamente das interfaces de entrada. As ações resultantes do programa de controle, relacionadas ao acionamento das saídas, também são gravadas no sistema de memória.
- **Acionamento dos dispositivos de saída:** A CPU ativa os dispositivos conectados às interfaces de saída. Esses acionamentos são realizados com base nos valores

armazenados no sistema de memória, resultantes da execução do programa de controle.

Após a introdução aos elementos de hardware que compõem a arquitetura básica de um CLP, temos a parte de software dos CLPs. A norma IEC 61131-3 define um modelo de software que inclui os seguintes componentes principais: configurações, recursos, tarefas e programas. A [Figura 3](#) apresenta uma visão geral deste modelo, evidenciando a estrutura e a organização lógica proposta ([IEC, 2003](#)).

Figura 3 – Modelo de software.



Fonte: [IEC \(2003\)](#)

De acordo com o modelo de software descrito pela norma IEC 61131-3, a configuração define um programa completo de CLP para resolver um problema específico de controle, especificando o sistema de hardware utilizado. Uma configuração pode incluir um ou mais recursos, que correspondem às capacidades de processamento do sistema para executar programas em paralelo.

Dentro de cada recurso, podem ser definidas uma ou mais tarefas, responsáveis por controlar a execução de programas e blocos de função, podendo ser periódicas ou ativadas por eventos. Os programas são construídos a partir de funções e blocos de funções, utilizando qualquer linguagem compatível com a norma.

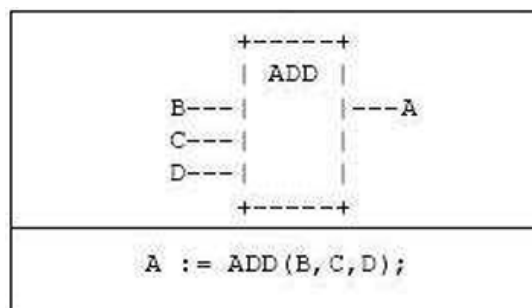
Para CLPs convencionais com um único recurso e tarefa, a norma IEC 61131-3 amplia as possibilidades de programação, incluindo suporte a multiprocessamento e execução controlada por eventos. A norma permite três formas principais de programação: funções, blocos de função e programas, que serão detalhadas posteriormente ([IEC, 2003](#)).

2.2.1.1 Funções

As funções nos CLPs possuem semântica similar às das linguagens funcionais tradicionais, retornando um único valor de saída. Além de aceitar valores de entrada (variáveis passadas ao chamar a função), elas podem utilizar parâmetros como saídas (equivalente a passar variáveis por referência) ou como entrada e saída ao mesmo tempo.

Um exemplo de função é ilustrado na [Figura 4](#), que demonstra graficamente (na linguagem FBD) e textualmente (na linguagem ST) a operação de soma. Nessa função, os valores das variáveis B, C e D são somados, e o resultado é atribuído à variável A.

Figura 4 – Exemplo de Função.



Fonte: [IEC \(2003\)](#)

2.2.1.2 Bloco de Função

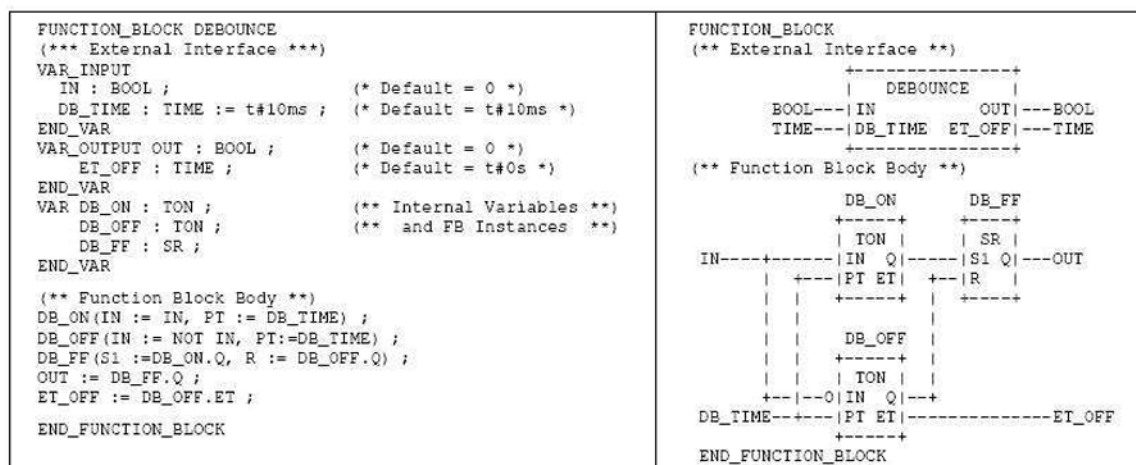
Os blocos de função representam conjuntos especializados de funções de controle, com dados e algoritmos integrados e uma interface bem definida. Eles facilitam a separação entre os níveis de programação e manutenção. Cada bloco de função é instanciado como uma variável, possuindo sua própria cópia do estado do bloco. Embora o bloco de função não retorne um valor diretamente, ele pode ter parâmetros para passar dados como entrada, saída ou bidirecional.

Um exemplo de bloco de função é o *Debounce*, ilustrado na [Figura 5](#), que protege contra oscilações indesejadas nos contatos elétricos. O bloco é composto por uma interface externa e funções que formam o corpo do bloco, definindo os tipos de variáveis e as ligações entre elas para executar o controle.

2.2.1.3 Programas

Os tipos de programas são semelhantes aos blocos de função, mas a diferença principal é que eles podem ser instanciados dentro de uma configuração, e não dentro de outras funções, blocos de função ou tipos de programa. Isso ocorre porque, no modelo de software da norma IEC 61131-3, os programas ocupam um nível hierárquico superior.

Figura 5 – Exemplo de bloco de função.



Fonte:IEC (2003)

Um programa geralmente consiste em um conjunto de funções e blocos de função que podem trocar dados entre si. Essas funções e blocos de função são componentes básicos, contendo uma estrutura de dados e um algoritmo para realizar suas tarefas.

A norma IEC 61131-3 define uma ampla gama de funções e blocos funcionais usados em CLPs, todos operando com variáveis que armazenam tipos de dados específicos, como informações binárias e números reais. As funções são operações que manipulam esses dados, como comparações e adições, enquanto os blocos funcionais são conjuntos de funções organizados como instruções para trabalhar com dados (IEC, 2003).

A norma também permite que programadores e fabricantes definam seus próprios elementos de programação, além de um conjunto básico de componentes obrigatórios. Embora não seja obrigatória, a conformidade com a norma oferece uma certificação, dependendo do grau de adesão.

Existem três tipos de blocos de programação que podem ser usados em linguagens textuais (IL e ST) ou gráficas (LD e FBD). A norma também inclui uma linguagem gráfica para a especificação de máquinas de estado chamada *SFC* (*Sequential Function Chart*), que pode ser usada em blocos funcionais, mas não para programar funções diretamente.

As principais vantagens da norma IEC 61131-3 incluem a facilidade de estruturar e modularizar o programa, a flexibilidade na escolha da linguagem para diferentes partes do projeto, e a possibilidade de reutilização de código através de bibliotecas de blocos funcionais. Isso facilita o desenvolvimento, implantação e manutenção, além de aumentar a qualidade do sistema. A norma também permite a importação e exportação de módulos entre diferentes ambientes de programação.

2.2.2 Interfaces Homem-Máquina (IHM)

Segundo [MORAES e CASTRUCCI \(2001\)](#), as Interfaces Homem-Máquina (IHM) são sistemas supervisórios desenvolvidos com o objetivo de criar uma interação amigável, eficiente e ergonômica entre sistemas de automação complexos e os operadores responsáveis por sua operação. Por isso, devem ser projetadas tendo os operadores como usuários finais e representar fielmente o processo real.

No contexto de Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), as IHMs podem ser configuradas tanto para enviar comandos de atuação quanto para realizar apenas o monitoramento do sistema. Ainda de acordo com [MORAES e CASTRUCCI \(2001\)](#), elas operam em dois modos distintos:

- **Modo de Desenvolvimento:** Focado na criação de telas gráficas e animações que representem o processo de forma visual, clara e interativa.
- **Modo Run Time:** Responsável pela execução das telas e animações criadas, exibindo o andamento do processo em tempo real. Nesse modo, a IHM deve ser capaz de coletar e armazenar dados, gerar gráficos de tendências, gerenciar alarmes e organizar as telas de forma hierárquica, garantindo compatibilidade com as necessidades operacionais do processo.

As IHMs englobam todos os elementos que uma pessoa interage para controlar um sistema e receber feedback de suas ações, como visualizar, tocar ou ouvir ([SHNEIDERMAN; PLAISANT, 2010](#)). Elas podem incorporar funções de controle, supervisão, aquisição de dados, gerenciamento de alarmes e integração com sistemas em rede.

Segundo [Shneiderman e Plaisant \(2010\)](#), as IHMs são utilizadas principalmente em três casos:

- **Substituição de botoeiras:** substituem chaves, botões liga/desliga e dispositivos de controle tradicionais.
- **Tratamento de dados:** facilitam o monitoramento e a avaliação de informações.
- **Supervisão:** ampliam a conectividade, permitem acesso remoto, geram gráficos e oferecem maior flexibilidade analítica.

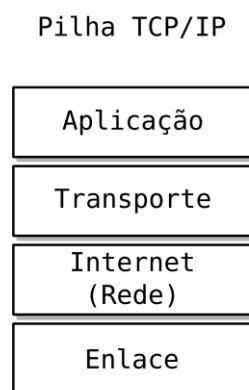
Entre seus benefícios, destacam-se a simplificação de painéis de controle, o aumento da eficiência de equipamentos e processos e o suporte à tomada de decisões. Contudo, sua implementação exige investimentos significativos.

2.3 Redes Industriais

As redes industriais desempenham um papel essencial na revolução da Indústria 4.0, sendo a espinha dorsal que conecta todos os dispositivos, sensores, controladores e sistemas de automação em tempo real. Elas permitem a troca de dados e a coordenação entre os diferentes componentes da fábrica, promovendo maior eficiência, flexibilidade e integração dos processos produtivos. Com a crescente demanda por sistemas mais rápidos e eficientes, as redes industriais precisam ser altamente confiáveis, escaláveis e seguras, ao mesmo tempo em que devem ser capazes de gerenciar grandes volumes de dados em tempo real, como os gerados pelos dispositivos *IoT* (*Internet of Things*) e outras tecnologias emergentes (ZHANG; YANG; LI, 2021; LIU; WANG; ZHAO, 2019). Além disso, essas redes devem garantir a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes, permitindo uma comunicação fluida e eficaz ao longo de toda a cadeia de produção.

A comunicação entre dispositivos interligados em rede é comumente realizada por meio de protocolos organizados em modelos multiníveis. Um exemplo amplamente utilizado é a pilha *TCP/IP* (*Transmission Control Protocol/Internet Protocol*), apresentada na Figura 6, que é descrita por Fall e Stevens (2012). Este modelo é composto por quatro camadas principais: Enlace, Internet (Rede), Transporte e Aplicação. Cada camada tem uma função específica, permitindo que a comunicação entre os dispositivos seja eficiente e escalável. O modelo *TCP/IP* é fundamental para a interconexão de sistemas e será adotado ao longo desta dissertação como referência para a análise da comunicação entre dispositivos industriais.

Figura 6 – Modelo de quatro camadas TCP/IP.



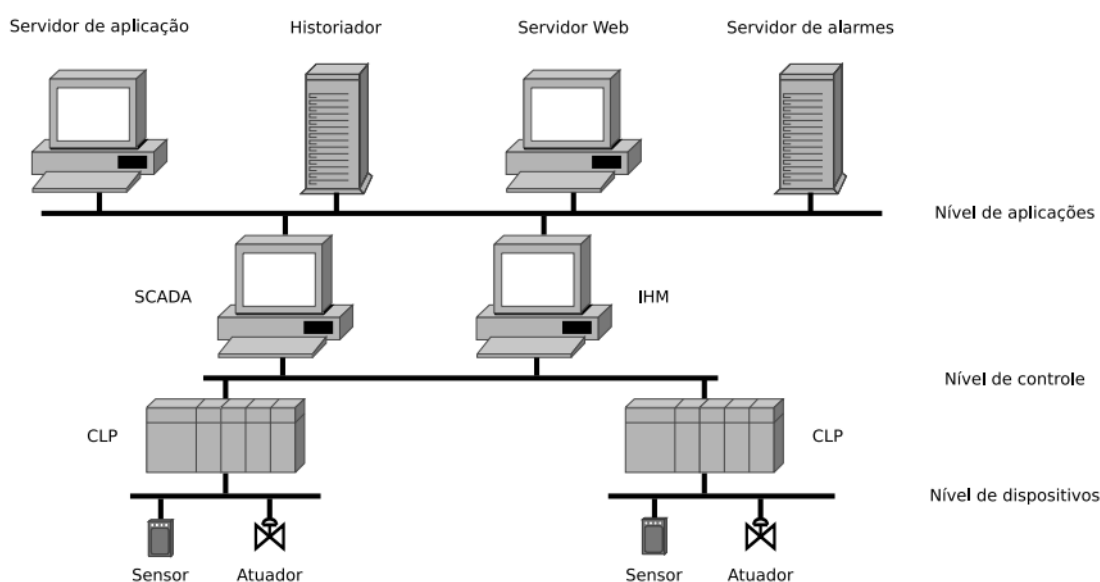
Fonte: Fall e Stevens (2012)

As redes industriais, ou redes de automação, utilizam protocolos de comunicação específicos para facilitar a troca de informações entre os dispositivos interconectados. Essas redes geralmente envolvem uma variedade de dispositivos, incluindo Controladores Lógicos

Programáveis (CLPs), sensores e atuadores. Os sensores são responsáveis por coletar dados do ambiente, como temperatura, pressão ou vazão, e transmiti-los ao CLP. Já os atuadores são dispositivos que alteram o estado de equipamentos em um processo, como válvulas ou motores, com base nos comandos recebidos do CLP. Este, por sua vez, é o elemento central no controle de processos industriais, pois recebe as informações dos sensores e emite comandos para os atuadores, mantendo o processo operacional.

Esses dispositivos, que formam a base das redes de automação, estão representados nos níveis mais baixos das arquiteturas de controle, conforme ilustrado na [Figura 7](#). O funcionamento eficiente desses sistemas depende da comunicação contínua e precisa entre os dispositivos, que permite a automação e o monitoramento dos processos industriais em tempo real ([SAUTER, 2005](#); [LOBASHOV](#); [SAUTER, 2006](#)).

Figura 7 – Exemplo de uma rede de automação.



Fonte: [Fall e Stevens \(2012\)](#)

Os protocolos de comunicação industriais baseados na pilha *TCP/IP* são amplamente utilizados para conectar Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) a sistemas *SCADA* (*Supervisory Control And Data Acquisition*), como ilustrado no nível de controle da [Figura 7](#). Essa integração facilita o monitoramento e o gerenciamento centralizado de processos industriais, permitindo uma comunicação eficiente entre os dispositivos em tempo real.

Contudo, tais protocolos podem apresentar vulnerabilidades que representam riscos à segurança dos sistemas industriais. Estudos destacam que falhas nesses protocolos podem expor redes a ataques cibernéticos, resultando em perda de dados, interrupções nos processos e até comprometimento físico dos equipamentos conectados ([BYRES](#); [HOFF-](#)

MAN; KUBE, 2006; MANDER et al., 2007). Por isso, é crucial realizar uma análise contínua dessas vulnerabilidades e implementar medidas de proteção, como *firewalls* industriais, criptografia de dados e autenticação robusta, para evitar incidentes de segurança

2.3.1 Protocolo *Modbus*

O protocolo *Modbus* segue o paradigma de comunicação mestre-escravo, no qual o mestre coordena a comunicação com diversos dispositivos escravos. Amplamente utilizado na automação industrial, o *Modbus* opera na camada de aplicação, conforme destacado por [Modbus Organization \(2024\)](#). Originalmente desenvolvido pela *Modicon Industrial Automation Systems* (agora parte da *Schneider Electric*) nos anos 1970, o protocolo foi projetado para facilitar a comunicação entre Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), sensores e atuadores.

Recentemente, o *Modbus* tornou-se parte do domínio *GPL* (*General Public License*), o que facilita sua adoção em projetos de código aberto e contribui para a sua disseminação na indústria. Atualmente, a manutenção do protocolo está a cargo da *Modbus-IDA*, uma organização composta por usuários e fornecedores independentes, que continua a promover o desenvolvimento e a padronização dessa tecnologia amplamente reconhecida ([Modbus Organization, 2024](#)).

Inicialmente, o protocolo *Modbus* foi projetado para dispositivos que utilizavam comunicação serial, o que contribuiu para sua popularidade na automação industrial. Essa comunicação serial pode ocorrer de duas formas principais: *RTU* (*Remote Terminal Unit*) e *ASCII* (*American Standard Code for Information Interchange*). Ambas as modalidades compartilham um formato de pacote comum, utilizado tanto em requisições quanto em respostas. No entanto, a diferença crucial entre os modos *RTU* e *ASCII* reside na representação dos dados ([THOMAS, 2008](#)).

No modo *RTU*, os dados são representados em formato binário, o que permite pacotes mais compactos e uma transmissão mais eficiente, porém exige sincronização rigorosa entre os dispositivos. Já no modo *ASCII*, os dados são transmitidos em caracteres legíveis, utilizando códigos hexadecimais convertidos para texto, o que facilita a leitura e a depuração, mas com uma eficiência de transmissão reduzida devido ao maior volume de dados ([THOMAS, 2008](#)).

Cada pacote *Modbus* serial é composto por seis campos principais, independentemente do modo utilizado (*RTU* ou *ASCII*). No modo *RTU*, esses campos são representados em formato binário, o que proporciona uma transmissão mais eficiente e compacta. Já no modo *ASCII*, os campos são representados por caracteres *ASCII*, facilitando a leitura e a depuração, mas com menor eficiência de transmissão devido ao maior tamanho dos pacotes ([GALLOWAY; HANCKE, 2012](#)).

Os seis campos que compõem um pacote Modbus serial são:

1. **Endereço do Dispositivo (Slave Address):** Identifica o dispositivo escravo ao qual a mensagem é destinada. No modo RTU, é um valor de 8 bits; no modo ASCII, é representado por dois caracteres hexadecimais.
2. **Código de Função (Function Code):** Especifica a ação a ser realizada (por exemplo, leitura de registradores ou escrita de dados). Esse código determina como o escravo processará a mensagem.
3. **Dados (Data):** Contém informações adicionais relacionadas à função solicitada. Pode incluir endereços de memória, valores a serem lidos ou escritos, entre outros parâmetros.
4. **CRC (Cyclic Redundancy Check) ou LRC (Longitudinal Redundancy Check):** Utilizado para verificação de erros na transmissão. No modo RTU, o campo de verificação de erros é chamado de CRC (16 bits). No modo ASCII, é utilizado o LRC (8 bits).
5. **Início de Mensagem (Start Frame) apenas no modo ASCII:** Representado por um caractere ":" (dois pontos), indica o início da mensagem.
6. **Fim de Mensagem (End Frame) apenas no modo ASCII:** Representado por um par de caracteres de nova linha (*CR(Carriage Return)/LF(Line Feed)*), sinaliza o término da mensagem.

2.3.1.1 Modbus/TCP

Devido à ampla adoção e flexibilidade do protocolo *Modbus*, novos meios de comunicação foram incorporados ao longo do tempo. Um dos avanços mais significativos é a introdução do *Modbus/TCP*, que utiliza a infraestrutura *Ethernet*. Essa variação do protocolo se baseia na pilha de protocolos *TCP/IP*, possibilitando transações entre dispositivos de forma mais eficiente e confiável.

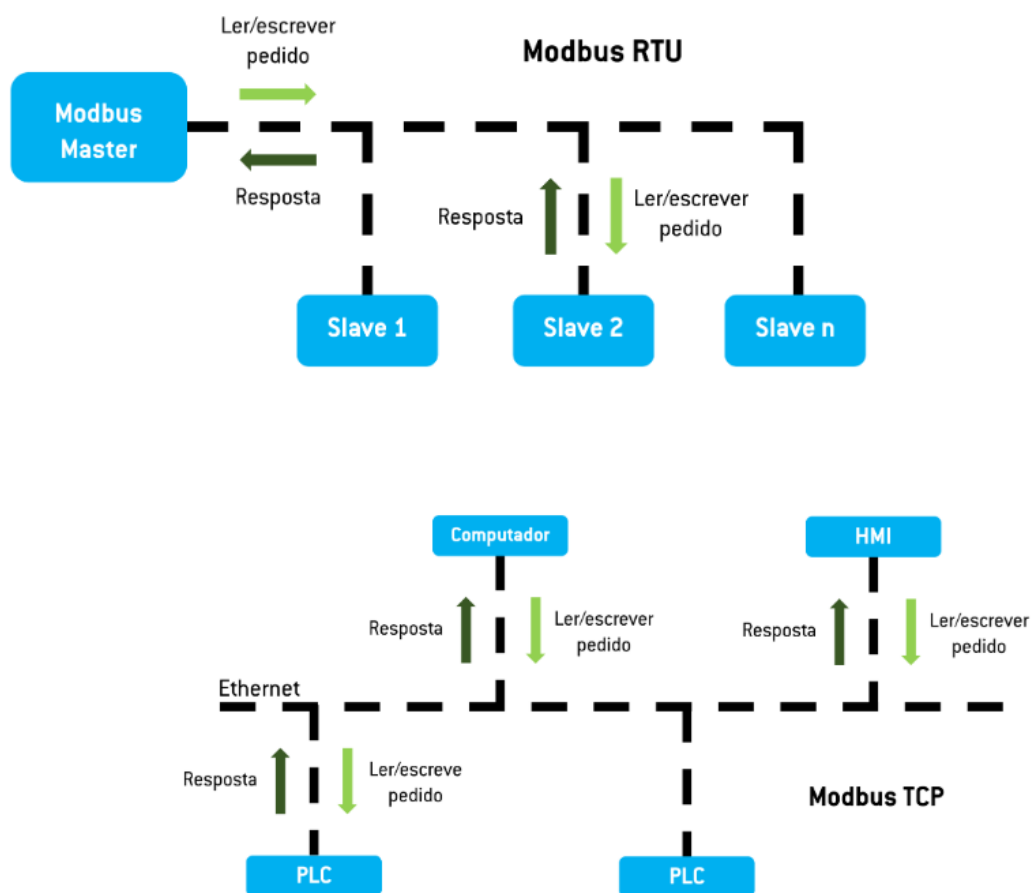
O *Modbus/TCP* proporciona uma conectividade aprimorada, pois permite a integração de diferentes tipos de redes dentro de uma mesma infraestrutura. Isso facilita a comunicação entre sistemas industriais e redes corporativas, aproveitando a infraestrutura de *Ethernet* já estabelecida. Essa capacidade de convergência entre redes industriais e de TI contribui significativamente para a expansão das aplicações do *Modbus* em ambientes complexos e distribuídos (MUSKINJA; TOVORNIK; TERBUC, 2003).

No *Modbus/TCP*, a estrutura é simplificada, utilizando apenas os campos Código de Função (*Function Code*) e Dados (*Data*). Os campos de Endereço do Dispositivo, *CRC*, Início de Mensagem e Fim de Mensagem são desnecessários, pois o endereçamento do

dispositivo é feito pelo próprio *TCP/IP*, e a verificação de erros é tratada pelas camadas inferiores do modelo *TCP/IP*. Além disso, os campos de início e fim de mensagem são dispensados, uma vez que o *TCP/IP* lida com a definição do início e término dos pacotes.

Essa simplificação resulta em uma comunicação mais eficiente e direta, facilitando a integração com redes *IP* e oferecendo maior escalabilidade, podemos ver na [Figura 8](#) uma exemplo de diferença entre o *Modbus RTU* para o *Modbus/TCP*.

Figura 8 – Exemplo de uma rede *Modbus RTU* e *Modbus/TCP*.



Fonte: [Tekonelectronics \(2024\)](#)

2.3.2 Protocolo *Ethernet/IP*

O uso de protocolos de comunicação industrial tem se expandido cada vez mais nas aplicações industriais. Os protocolos baseados no padrão *Ethernet*, que permitem a comunicação através da internet, estão crescendo constantemente. As aplicações relacionadas à Indústria 4.0 e à comunicação *Ethernet* tornam os processos industriais mais rápidos de operar, monitorar e controlar, possibilitando até mesmo a operação remota ([GUISLANDE; DIAS,](#)).

O protocolo *Ethernet/IP*, desenvolvido pela *ODVA* (*Open Device Vendor Association*) para a automação industrial, possibilita a integração de dispositivos e sistemas em tempo real. Ele utiliza a comunicação baseada no padrão *Ethernet*, facilitando a interação entre sistemas de supervisão e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs). Sua aplicação abrange uma ampla gama de cenários, desde o controle de sensores até o gerenciamento de máquinas (GUISLANDE; DIAS,).

A adoção do padrão *Ethernet/IP* surge da necessidade de conectar diversos níveis da cadeia de suprimentos (Supply Chain) utilizando um único padrão de rede, o *TCP/IP* (Transmission Control Protocol/Internet Protocol). Isso permite que a gerência tenha acesso em tempo real aos dados do chão de fábrica, facilitando a tomada de decisões rápidas e a integração entre os diferentes componentes da rede (RINALDI, 2003).

O *Ethernet/IP* utiliza todos os protocolos de transporte e controle empregados no *Ethernet* tradicional, incluindo o Protocolo de Controle de Transporte (TCP), o Protocolo de Internet (IP) e as tecnologias de acesso à mídia e sinalização presentes nas placas de interface *Ethernet* comuns. Ao se basear nessas tecnologias padrão de PC, o *Ethernet/IP* funciona de forma transparente com todos os dispositivos *Ethernet* padrão disponíveis no mercado atual. Isso também significa que o *Ethernet/IP* pode ser facilmente suportado em PCs padrão e suas derivações. Mais importante ainda, ao fundamentar o *Ethernet/IP* em uma plataforma tecnológica padrão, garante-se que o protocolo evoluirá à medida que as tecnologias base se desenvolvem no futuro (RINALDI, 2003).

Com o passar do tempo, o protocolo de camada física IEEE 802.3 (*Ethernet*) evoluiu, o que exigiu também atualizações nos conectores de hardware da rede. Atualmente, a rede *Ethernet/IP* utiliza o conector RJ45, que se tornou o padrão predominante no mercado (LUGLI; SANTOS, 2009).

Ao comparar a rede *Ethernet/IP* com a rede *PROFINET* (*Process Field Network*), percebe-se que, enquanto a *PROFINET* oferece dois modelos de arquitetura, a *Ethernet/IP* segue estritamente o modelo *TCP/IP*. Isso implica que a rede *Ethernet/IP* utiliza o *TCP* para transmissões de dados explícitos, que não são críticos em tempo real, garantindo a integridade e a ordem dos pacotes. Por outro lado, utiliza o *UDP* (*User Datagram Protocol*) para transmissões de dados implícitos, críticos em tempo real, proporcionando maior velocidade de comunicação, porém sem garantir a entrega ou a ordem dos pacotes (LUGLI; SANTOS, 2009).

A escolha entre comunicação explícita ou implícita depende da aplicação do usuário. A comunicação explícita (não crítica em tempo real) utiliza o *TCP*, enquanto a implícita (crítica em tempo real) utiliza o *UDP* (*User Datagram Protocol*). Ambas as formas de comunicação fazem uso da camada *CIP* (*Common Industrial Protocol*) da *ODVA*, que define a comunicação e o controle de dispositivos em redes *Ethernet/IP*. A *ODVA* é a organização responsável pelo desenvolvimento e manutenção do protocolo *CIP*, promovendo

a interoperabilidade entre dispositivos de diferentes fabricantes (LUGLI; SANTOS, 2009).

2.3.3 *Surface Mount Equipment Manufacturers Association (SMEMA)*

Na indústria de eletrônicos de montagem em superfície (SMT), a produção de cada tipo de produto envolve uma série de etapas de processo, cada uma exigindo uma variedade de equipamentos especializados. Esses equipamentos de produção variam significativamente, não apenas entre os diferentes fabricantes, mas também quanto às suas funções específicas dentro do processo. No entanto, apesar das diferenças, todos os equipamentos devem ser capazes de trabalhar de forma integrada para garantir a produção eficiente e a qualidade dos produtos finais.

As principais dificuldades surgem quando esses equipamentos não são padronizados e, portanto, não conseguem se comunicar adequadamente entre si. Isso pode resultar em falhas na sincronização dos processos, aumento de erros operacionais e uma queda na eficiência geral da produção. Para resolver esses desafios de compatibilidade e promover a colaboração entre os diferentes sistemas, foi fundada a *Surface Mount Equipment Manufacturers Association (SMEMA)* (PRASAD, 2012).

A *SMEMA* é uma organização sem fins lucrativos, formada por fabricantes de equipamentos e softwares utilizados na produção de placas de montagem em superfície. O principal objetivo da *SMEMA* é padronizar os processos e protocolos de comunicação entre os equipamentos, facilitando a integração entre eles e assegurando que as diferentes máquinas e sistemas possam trabalhar juntos de maneira eficiente. Através da criação de normas e diretrizes técnicas, a *SMEMA* contribui para a otimização dos processos de fabricação, promovendo melhores práticas e aumentando a produtividade e a qualidade no setor de eletrônicos (PRASAD, 2012).

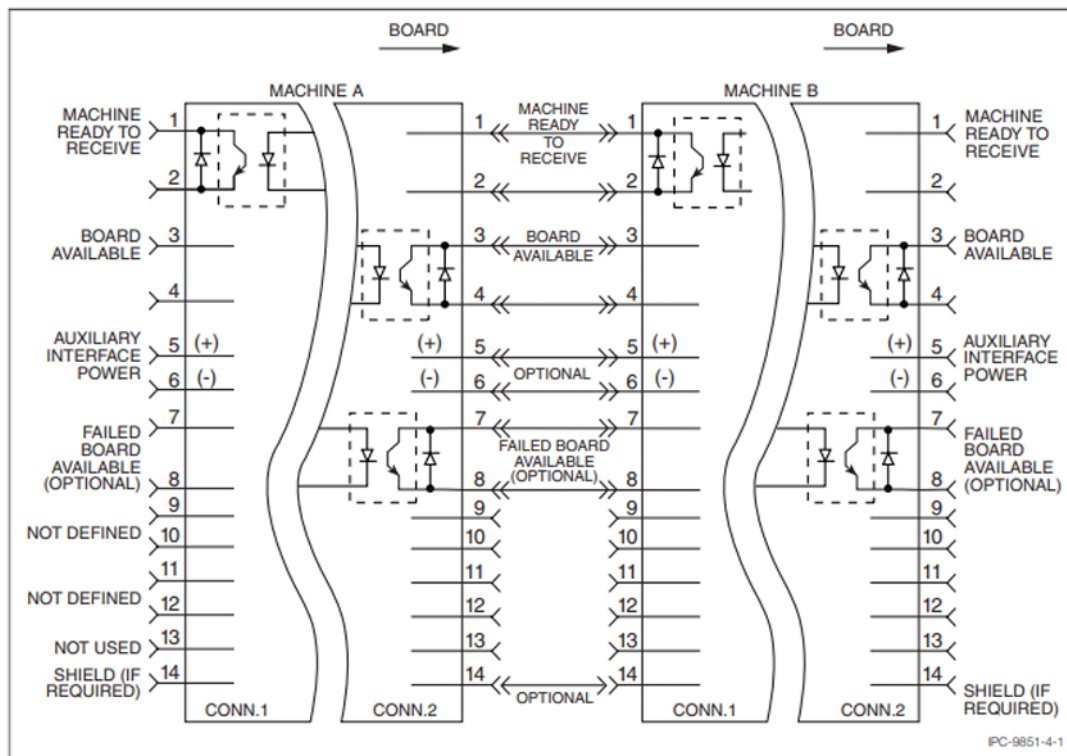
O protocolo SMEMA define uma interface elétrica e lógica simples para comunicação entre duas máquinas consecutivas (denominadas Máquina A e Máquina B) na linha de produção (Figura 9). O objetivo principal é coordenar o transporte de placas (PCBs) de uma máquina para outra, garantindo que ambas estejam prontas para enviar e receber a placa antes da transferência.

Ele utiliza sinais simples para informar o status de prontidão e disponibilidade de placas:

- **Machine Ready to Receive:** A máquina receptora indica que está pronta para receber uma placa.
- **Board Available:** A máquina remetente informa que há uma placa pronta para transferência.
- **Failed Board Available (Opcional):** Sinaliza a presença de uma placa defeituosa.

A Máquina A ativa *Board Available* quando há uma placa para enviar, e a Máquina B ativa *Machine Ready to Receive* quando está pronta para receber. Após a transferência, esses sinais são desativados, garantindo sincronização e continuidade no processo de produção.

Figura 9 – Mensagens padrão SMEMA e seu princípio de funcionamento.



Fonte: Viljamaa (2024)

2.4 Placa de Circuito Impresso

Uma Placa de Circuito Impresso (PCI) é composta por uma base fina na qual são impressas ou depositadas trilhas de cobre em uma ou ambas as faces. A base atua como um isolante, enquanto as trilhas têm a função de estabelecer conexões elétricas entre os diversos componentes, permitindo que executem suas respectivas funções no circuito (FUSE, 1999).

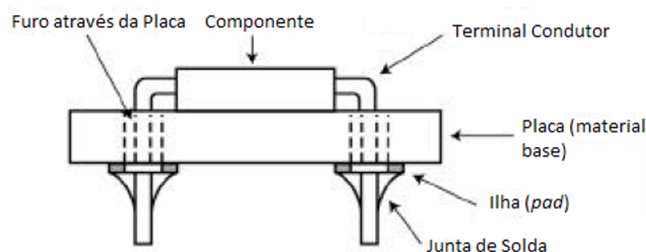
Ao longo dos anos, as PCIs se estabeleceram como uma das principais tecnologias para a interconexão de componentes eletrônicos. Considerando que o objetivo deste trabalho é desenvolver um protótipo para inspeção de PCIs, esta seção apresenta as principais tecnologias de fabricação e os possíveis erros que podem ocorrer durante esse processo.

2.4.1 Tecnologias de PCIs

Os componentes eletrônicos são fixados em regiões específicas das trilhas chamadas ilhas ou pads. Essas ilhas são áreas projetadas para acomodar uma junta de solda que conecta o terminal do componente à placa. Dependendo da tecnologia utilizada, as ilhas podem conter furos para a montagem de componentes (tecnologia *through-hole*) ou servir como base para a fixação direta dos componentes na superfície (tecnologia *surface-mount*).

A montagem por meio de furos (Through-Hole Technology, ou THT), desenvolvida por volta da década de 1940, utiliza componentes com terminais longos e salientes. Nessas placas, os furos são eletricamente conectados às trilhas de metal (Figura 10). Sistemas baseados nessa tecnologia são relativamente simples de construir, testar e manipular. No entanto, em projetos mais complexos, o hardware tende a ser fisicamente volumoso e pode apresentar maior suscetibilidade a ruídos elétricos, especialmente em aplicações de média e alta frequência (FUSE, 1999).

Figura 10 – Montagem de Componente Utilizando a Tecnologia THT.

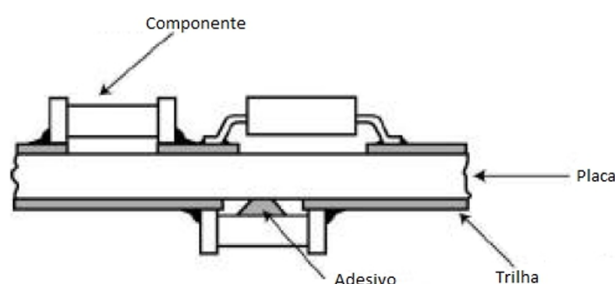


Fonte: Adaptado de FUSE (1999)

A montagem em superfície (*Surface-Mount Technology, ou SMT*) consiste em soldar os componentes diretamente sobre a superfície da placa, eliminando a necessidade de perfurações (Figura 11). Essa tecnologia surgiu em meados da década de 1960 e continua a evoluir rapidamente. No início, os componentes *SMT* eram desenvolvidos em formatos semelhantes aos utilizados na tecnologia *THT*, com terminais cortados e moldados para permitir a soldagem na superfície. Atualmente, tanto a largura dos terminais quanto a geometria dos componentes têm sido continuamente reduzidas, permitindo maior miniaturização e densidade nos projetos eletrônicos (FUSE, 1999).

A fabricação de uma Placa de Circuito Impresso (PCI) abrange diversas etapas, incluindo a seleção dos componentes, o design do layout da placa e os processos de produção, montagem e teste. Em cada uma dessas fases, podem surgir defeitos que comprometem a qualidade e o desempenho do produto final. Compreender as causas e as implicações desses defeitos é essencial para implementar ações corretivas e preventivas, tanto no produto quanto no processo, garantindo maior confiabilidade e eficiência.

Figura 11 – Montagem de Componente Utilizando a Tecnologia SMT.



Fonte: Adaptado de FUSE (1999)

2.4.2 Processos de Montagem de PCIs

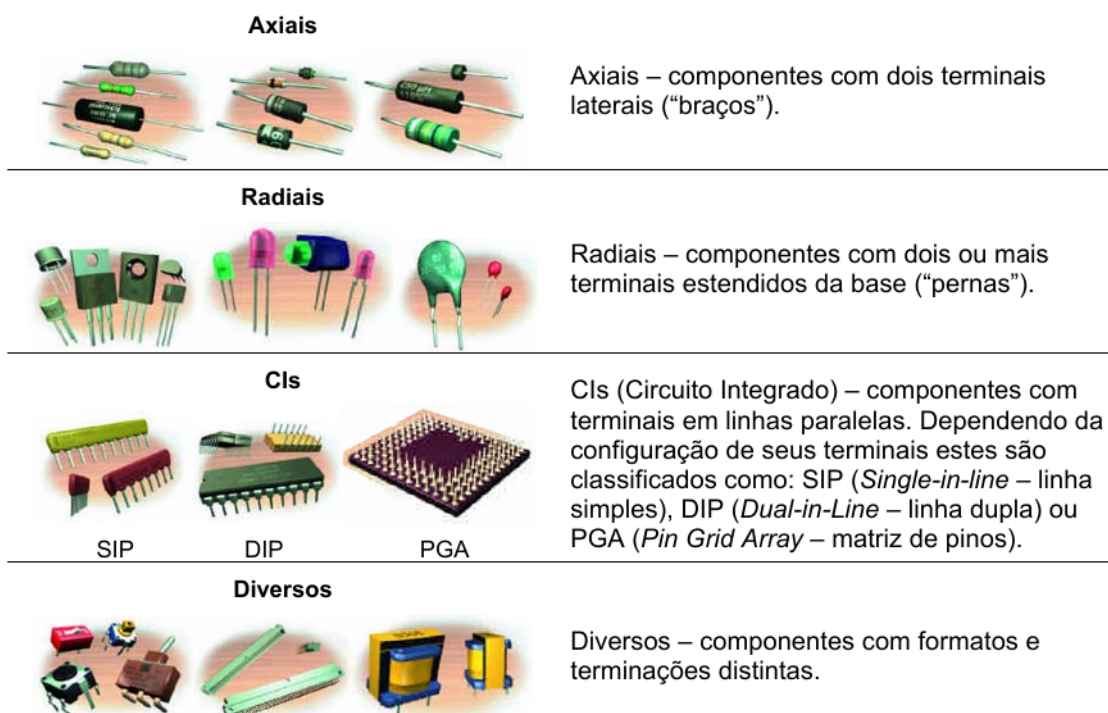
2.4.2.1 Processo de Montagem *THT*

O processo de montagem de placas utilizando a tecnologia *Through-Hole (THT)* baseia-se, essencialmente, na inserção e soldagem dos componentes nos furos da placa. A inserção dos componentes pode ser realizada de forma manual ou automatizada. Contudo, as máquinas automatizadas são limitadas a componentes *THT* com encapsulamento dos tipos axial, radial e Circuitos Integrados (CIs) (DORO, 2004). A Figura 12 apresenta exemplos de diferentes tipos de encapsulamento utilizados em componentes *THT*.

O processo de inserção manual começa com a etapa de pré-formagem dos componentes, na qual eles são cortados, dobrados e separados de acordo com a necessidade do projeto. Em seguida, os componentes são inseridos manualmente na placa. Essa abordagem, porém, é altamente suscetível a erros, como falhas na orientação ou no posicionamento. Por esse motivo, é recomendável o uso de máquinas de inserção semi-automáticas, que auxiliam na orientação e no sentido correto da montagem, reduzindo a probabilidade de erros e aumentando a eficiência do processo (DORO, 2004).

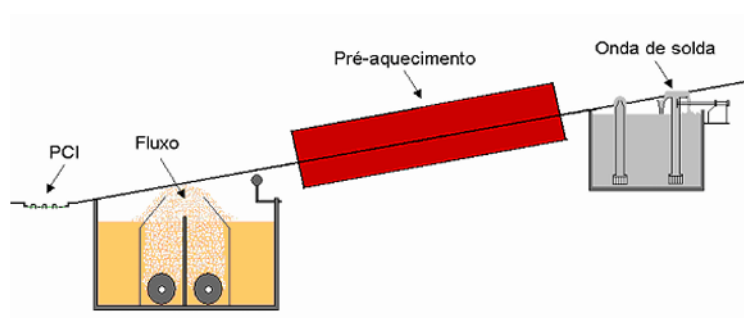
Por fim, os componentes são soldados utilizando uma máquina de solda por onda. Nessa etapa, a placa é transportada por uma esteira e passa tangencialmente por uma cuba, onde ocorre a remoção de impurezas por meio de um fluxo de produtos químicos específicos. Em seguida, a placa é direcionada para uma zona de preaquecimento, que tem como objetivo evitar o choque térmico nos componentes e ativar o fluxo (DORO, 2004). Após o preaquecimento, a placa passa novamente tangencialmente por outra cuba contendo a liga de solda fundida. Essa liga se adere aos terminais e às ilhas da placa, realizando a soldagem dos componentes. No entanto, o ajuste adequado dos parâmetros da máquina exige um alto nível de conhecimento técnico. Se não ajustados corretamente, os parâmetros podem resultar em juntas defeituosas, o que aumenta a probabilidade de falhas (WOODGATE, 1996). A Figura 13 ilustra as etapas de operação de uma máquina de solda.

Figura 12 – Principais Tipos de Pacotes de Componentes THT.



Fonte: [Doro \(2004\)](#)

Figura 13 – Esquema de Funcionamento da Máquina de Solda por Onda.



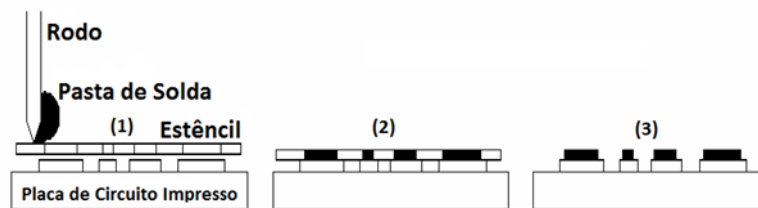
Fonte: [Doro \(2004\)](#)

2.4.2.2 Processo de Montagem SMT

O processo de montagem *SMT* segue um procedimento semelhante ao da montagem *THT*. Os componentes *Surface-Mount Device (SMD)* podem ser inseridos tanto manualmente quanto por meio de máquinas automatizadas. A inserção manual é comum em produções de pequenas séries, onde alguns componentes são fornecidos em pequenas quantidades ou a granel, o que impossibilita a inserção automática. Antes da inserção dos componentes, uma máquina aplicadora de pasta de solda, chamada *Printer*, deposita a

pasta sobre as ilhas na superfície da placa. A pasta de solda é composta por uma liga metálica (geralmente $63\%Sn+37\%Pb$ ou $62\%Sn+36\%Pb+2\%Ag$), combinada com resinas, ativadores, aditivos e solventes (DORO, 2004). Nesse processo, a pasta é aplicada por meio de um rodo que passa sobre uma matriz metálica (estêncil), permitindo que a pasta de solda seja depositada exclusivamente sobre as ilhas. Esse processo é ilustrado na Figura 14.

Figura 14 – Processos da Aplicação da Pasta de Solda.



Fonte: Doro (2004)

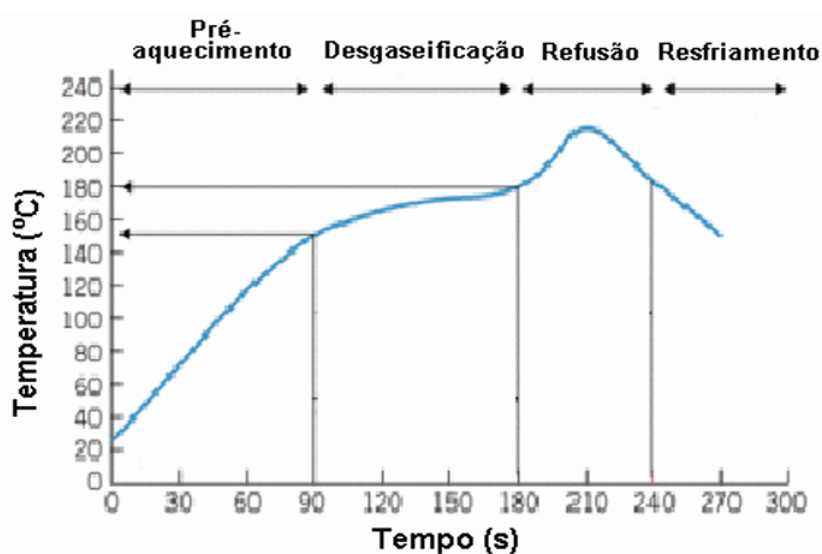
A próxima etapa envolve a inserção dos componentes por meio de máquinas específicas para essa função. Existem dois tipos principais de máquinas de inserção *SMT*: a *Turret Head* (cabecote revolver) e a *Pick & Place* (apanhar e inserir). A máquina *Turret Head* foi desenvolvida para inserir componentes em alta velocidade (10.000 a 60.000 chips por hora), enquanto as máquinas *Pick & Place* são mais precisas e capazes de inserir componentes maiores, como os *Ball Grid Array (BGA)* (DORO, 2004).

A última etapa é a soldagem dos componentes na placa, realizada por um forno de refusão, que aquece a placa por meio de convecção forçada. Uma esteira transportadora move a placa por todas as etapas do forno. Cada uma dessas etapas possui uma temperatura específica, formando um perfil térmico do forno, ou seja, a curva de temperatura da placa ao longo do tempo (Figura 15). Esse perfil térmico é composto por quatro fases distintas (DORO, 2004):

- **Preaquecimento:** a temperatura é elevada até o ponto de evaporação dos solventes na pasta de solda;
- **Desgaseificação:** a temperatura é elevada lentamente com o objetivo de ativar o fluxo e igualar a temperatura na placa;
- **Refusão:** a temperatura é elevada para fundir a solda, formando então as juntas de solda;
- **Resfriamento:** a temperatura é reduzida gradativamente até chegar na temperatura ambiente.

No processo *SMT* (Figura 16), onde a soldagem é realizada pela máquina de solda por onda, a deposição de pasta de solda é substituída pela aplicação de adesivo. O adesivo tem a função de segurar os componentes no lugar durante a soldagem. As demais etapas, como a inserção dos componentes e o aquecimento da placa, continuam a ser realizadas. No entanto, as zonas de aquecimento do forno (perfil térmico) são ajustadas, pois sua função agora é curar o adesivo. Após os componentes serem inseridos e fixados com o adesivo, a soldagem é realizada pela máquina de solda por onda, de maneira similar ao processo *THT* (BLACKWELL, 2017).

Figura 15 – Perfil Térmico Usado na Refusão da Pasta de Solda.



Fonte: Doro (2004)

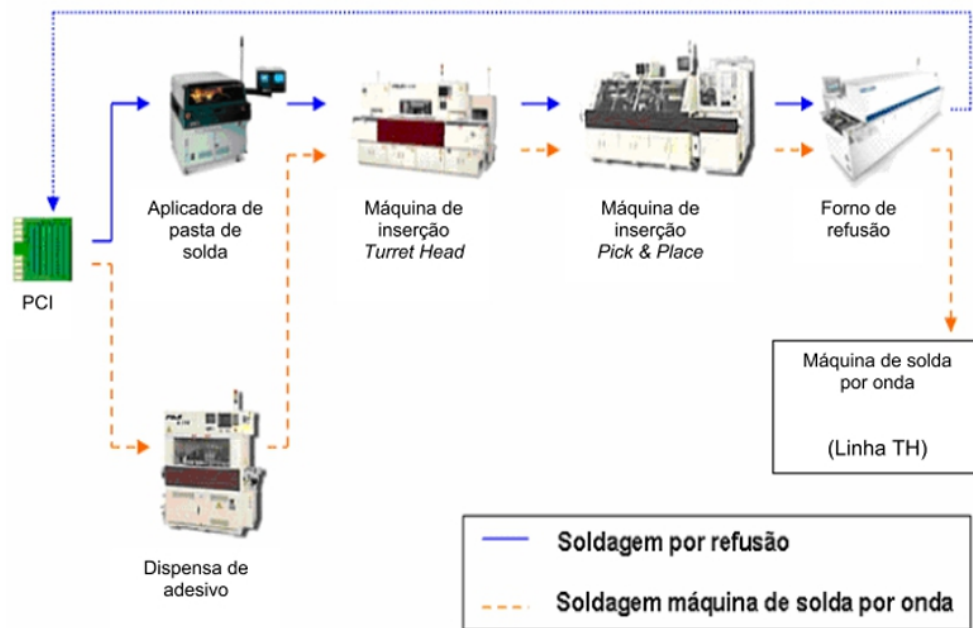
2.4.3 Inspeção e Defeitos de PCIs

No processo de manufatura, a inspeção industrial desempenha um papel fundamental. Em muitos sistemas, busca-se garantir 100% da qualidade de peças, subconjuntos ou produtos finalizados, dado que a qualidade das PCIs impacta diretamente o desempenho de um produto eletrônico (WU; WANG; LIU, 1996).

Inspeções realizadas por seres humanos monitoram mais de cinquenta etapas no processo de fabricação de uma PCI, geralmente por meio de inspeção visual seguindo normas predefinidas. Contudo, essas inspeções envolvem julgamentos subjetivos, além de serem tarefas exaustivas e monótonas. Em contraste, sistemas de inspeção automática eliminam a subjetividade, fornecem respostas mais rápidas e avaliações quantitativas precisas (MOGANTI et al., 1996).

Com o avanço das tecnologias na indústria de componentes *SMT* é *THT*, a inspeção manual tem sido gradualmente substituída. A miniaturização crescente dos componentes

Figura 16 – Equipamentos que compõe uma típica linha de montagem SMT.



Fonte: [Doro \(2004\)](#)

eletrônicos torna esse tipo de inspeção cada vez mais desafiadora, quando não inviável ([SUNDARAJ, 2009](#)).

A busca por maior qualidade no processo de montagem de *PCIs* leva os fabricantes a exigir níveis elevados de precisão nas inspeções ([LIAO; LEE; LAI, 2012](#)). Felizmente, os avanços em computação como maior velocidade de processamento, maior capacidade de memória e redução de custos, somados aos progressos em processamento de imagens, reconhecimento de padrões e inteligência artificial, têm reduzido os custos de desenvolvimento de sistemas de inspeção mais eficientes e acessíveis.

Durante as diversas etapas do processo de fabricação de uma *PCI*, diferentes tipos de defeitos podem surgir, sendo classificados em três categorias principais ([DORO, 2004](#)):

- Defeitos nos componentes ou placas: Esses defeitos geralmente não são originados durante o processo de fabricação, mas são consequência de fatores como baixa qualidade dos componentes ou das placas, armazenamento inadequado, transporte ou manuseio incorreto.
- Defeitos na inserção: Ocorridos durante a etapa de inserção manual ou automática dos componentes, esses defeitos estão relacionados a falhas no posicionamento, alinhamento ou fixação dos elementos na placa.
- Defeitos nas terminações: Esses defeitos surgem durante o processo de soldagem e

podem estar associados a problemas na aplicação da pasta de solda, parâmetros incorretos no forno de refusão ou na orientação e espaçamento inadequados dos componentes.

Sistemas de inspeção automatizados são imunes ao cansaço e fadiga, mantendo consistência e operando continuamente. Quando integrados em etapas estratégicas no processo de montagem de PCIs, podem reduzir custos associados a erros, minimizar o retrabalho e aumentar a eficiência dos testes elétricos (MOGANTI et al., 1996).

Os principais requisitos que um sistema de inspeção deve atender incluem: alta velocidade de inspeção, alta precisão na identificação de defeitos e uma baixa taxa de falsos alarmes. Os sistemas de inspeção de PCIs são classificados em duas categorias principais:

1. Métodos elétricos/com contato
2. Métodos não elétricos/sem contato.

Os métodos elétricos com contato podem apresentar riscos de danos elétricos às placas devido à aplicação de sinais elétricos, que podem causar curtos-circuitos ou danificar componentes invertidos, ausentes ou defeituosos. Por outro lado, os métodos não elétricos sem contato evitam esses riscos e oferecem diversas soluções para Inspeção Óptica Automatizada (*Automated Optical Inspection - AOI*).

A Inspeção Óptica Automática é uma tecnologia empregada para realizar inspeções visuais automatizadas de produtos e componentes. Esse processo utiliza sistemas ópticos de captura de imagens, sistemas de iluminação e algoritmos de visão computacional para identificar e analisar defeitos ou anomalias cosméticas nos objetos inspecionados, sem a necessidade de qualquer intervenção invasiva (JENSSEN; ROVERSO et al., 2018).

Na indústria de fabricação de Equipamentos Eletroeletrônicos (EEE), a AOI é amplamente utilizada para identificar erros visíveis nas etapas iniciais do processo de produção. Essa abordagem permite a detecção precoce de falhas, reduzindo retrabalhos e garantindo maior qualidade do produto final (SCHWEBIG; TUTSCH, 2020).

A automação do processo de inspeção melhora significativamente a eficiência e a confiabilidade no controle de qualidade durante a fabricação de Placas de Circuito Impresso (PCI) em larga escala. Além disso, contribui para a maximização dos lucros ao reduzir custos com retrabalho, minimizar falhas e otimizar o tempo de produção (SCHWEBIG; TUTSCH, 2020; SHAOBIN et al., 2022).

As técnicas de AOI são geralmente classificadas em três abordagens principais (LIAO; LEE; LAI, 2012):

1. Comparação de Referências: compara a imagem inspecionada com uma referência previamente armazenada.
2. Verificação sem Referências: avalia critérios geométricos ou padrões para identificar defeitos sem necessidade de uma referência.
3. Abordagem Híbrida: combina aspectos das duas abordagens anteriores, aumentando a robustez e a precisão do sistema.

Os sistemas de Inspeção Óptica Automática são normalmente integrados à linha de produção em várias etapas críticas, incluindo após os estágios de impressão da pasta de solda, colocação de componentes, montagem e refluxo. Essas estações são estrategicamente posicionadas para inspecionar a integridade das *PCBs*, as juntas de solda e os componentes das *PCBAs* (Placa de Circuito Impresso Montada).

A primeira estação *AOI* geralmente está localizada após o processo de impressão da pasta de solda, onde é realizada a inspeção dos depósitos de pasta na PCB. O objetivo dessa etapa é garantir o alinhamento correto, o volume adequado e a ausência de defeitos, como pontes ou solda insuficiente. Essa estação é comumente conhecida como *Solder Paste Inspection (SPI)* (MAR; YARLAGADDA; FOOKES, 2011; KIM et al., 2019).

A segunda estação da *AOI* é geralmente posicionada após o processo de colocação dos componentes. Essa etapa tem como objetivo verificar o alinhamento, a presença e a qualidade dos componentes inseridos (ZHAO; CHENG; JIN, 2009). Durante essa inspeção, são identificados problemas como:

- Componentes desalinhados;
- Componentes ausentes;
- Marcações inadequadas para exclusão;
- Terminais levantados (*lifted leads*);
- Defeitos relacionados à solda.

A terceira estação da *AOI* é posicionada após o processo de soldagem por refluxo, quando a *PCBA* já está formada. Nesse estágio, as conexões elétricas devem estar em total conformidade com os padrões de qualidade.

Essa estação desempenha um papel fundamental na detecção de defeitos, uma vez que aproximadamente 43% do total de falhas em uma *PCBA* são estimados como ocorrendo após o processo de soldagem. Entre os defeitos mais comuns identificados estão (YAMANE; ESPINOSA; TENÓRIO, 2013):

- Juntas de solda defeituosas;
- Conexões ausentes ou fracas;
- Componentes mal soldados ou desalinhados.

Estações adicionais da *AOI* podem ser integradas à linha de produção conforme a complexidade e os requisitos de qualidade da montagem da PCB. Essas estações podem ser posicionadas em diferentes fases do processo de montagem para realizar inspeções específicas, como a verificação de polaridade, a confirmação da presença de componentes específicos ou a inspeção de recursos especializados.

É importante destacar que o número e a localização das estações *AOI* podem variar de acordo com a configuração de fabricação e as exigências do processo *SMT* ou *THT*. Os fabricantes têm a flexibilidade de personalizar o posicionamento das estações *AOI* com base em fatores como o volume de produção, a complexidade do produto e os objetivos de controle de qualidade. Graças à sua eficiência, vantagens e confiabilidade em comparação aos processos tradicionais de inspeção, a tecnologia *AOI* tornou-se cada vez mais essencial na tecnologia *SMT* e *THT* (ZHAO; CHENG; JIN, 2009).

Com o uso da *AOI*, é possível identificar uma variedade de defeitos em *PCBs* e *PCBAs*, como:

1. **Missing Hole:** O buraco faltante é um defeito comum em *PCBs*, ocorrendo quando um buraco necessário para conectar os componentes não está presente na trilha. A ausência desse buraco impede a passagem de corrente elétrica e a fixação adequada dos componentes *THT* (*Through-Hole Technology*), o que pode levar a mau funcionamento ou até mesmo à falha total do dispositivo. Esse tipo de defeito está frequentemente associado a erros durante o processo de fabricação ou ao uso inadequado da placa (CHAUDHARY; DAVE; UPLA, 2017).
2. **Circuito aberto:** Um defeito de circuito aberto em uma PCB ocorre quando há uma interrupção ou descontinuidade na trilha que conecta os componentes, impedindo o fluxo de corrente elétrica. Isso pode ser causado por um furo, rachadura, arranhão ou um componente defeituoso. Esse tipo de defeito pode ser difícil de detectar, pois, muitas vezes, não apresenta sinais visíveis que indicam a localização do problema. Para identificá-lo, geralmente é necessário realizar um teste de continuidade, que verifica se o caminho elétrico está completo e funcional (CHAUDHARY; DAVE; UPLA, 2017).
3. **Curto-circuito:** Um curto-circuito ocorre quando dois ou mais condutores são conectados diretamente, permitindo a passagem excessiva de corrente elétrica, o que pode causar danos à PCB e aos componentes. Esse defeito pode ser causado

por falhas de fabricação, erros de montagem ou condições ambientais. Técnicas como testes de continuidade, resistência e tensão são usadas para detectá-lo, e ferramentas de design modernas ajudam a identificar possíveis problemas durante o projeto da placa.

4. **Wrong size hole:** Um furo com diâmetro inadequado para fixação de componentes THT pode causar problemas de montagem. Se o diâmetro do furo for menor que o esperado, o componente pode não ser fixado corretamente. Por outro lado, se o diâmetro for maior, o componente pode se soltar durante a manipulação. Esses defeitos podem afetar a qualidade e a confiabilidade do produto final (CHAUDHARY; DAVE; UPLA, 2017).
5. **Falta de solda:** O defeito de "sem solda" ocorre quando a solda não adere corretamente à superfície metálica do componente ou da *PCB*. Isso pode resultar em conexões elétricas instáveis, levando a falhas ou mau funcionamento do circuito.
6. **Componente ausente:** A ausência de um componente em uma *PCBA* pode gerar diversos problemas, como mau funcionamento ou falha total da placa. Dependendo do componente, isso pode causar um circuito aberto, resultando em superaquecimento ou instabilidade. Se o componente ausente for parte de um circuito ativo, o funcionamento correto do circuito pode ser comprometido.
7. **Componente errado:** O defeito ocorre quando um componente de uma *PCBA* não atende às especificações do projeto. Isso pode ser causado por compra incorreta, instalação inadequada ou uso indevido do componente. Em alguns casos, o componente errado pode ser instalado no local errado da *PCB*, resultando em curtos-circuitos ou outros problemas. Para evitar esse problema, é essencial garantir que todos os componentes sejam solicitados e instalados conforme as especificações, além de verificar a compatibilidade entre eles antes da instalação.
8. **Componente invertido:** O defeito de *PCB* envolvendo um componente invertido ocorre quando o componente é soldado na orientação incorreta. Isso pode resultar em mau funcionamento do componente ou até mesmo danificar a *PCB*, causando curtos-circuitos ou outros problemas elétricos. A correta orientação do componente é crucial para garantir o funcionamento adequado da placa.
9. **Componente com polaridade invertida:** Um defeito de polaridade invertida ocorre quando os terminais positivo e negativo de um componente são conectados de forma errada. Isso pode levar a sérios danos à *PCB*, como superaquecimento, e em casos extremos, pode causar incêndios ou explosões. A correta identificação e instalação dos terminais são essenciais para evitar esse tipo de defeito.

10. **Shifted:** Um componente deslocado é um defeito que ocorre quando um componente na PCB não está corretamente alinhado com sua posição designada. Esse problema pode ser causado por soldagem inadequada, posicionamento incorreto do componente ou defeitos de fabricação. Componentes deslocados podem resultar em curtos-circuitos, circuitos abertos e outros problemas, comprometendo o funcionamento da PCB e causando falhas no dispositivo.

11. **Tombstone/Bilboard:** Um tipo de defeito de PCBA ocorre quando um componente parece estar em pé, devido ao torque gerado pela solda. Esse defeito pode acontecer quando os componentes não estão corretamente alinhados durante o processo de soldagem ou quando são colocados muito próximos uns dos outros. Esse desalinhamento pode resultar em mau funcionamento ou danos ao componente ou à placa.

3 Materiais e Métodos

Neste capítulo são apresentados os métodos pelos quais os objetivos propostos são alcançados. A primeira seção trata do desenvolvimento do protótipo, em suas características de *hardware*, mecânica e elétrica. A segunda seção trata da comunicação entre o sistema interno da empresa com módulo de inspeção automático.

3.1 Projeto do Módulo de Inspeção Automática

Para a construção do módulo de inspeção automática, de forma a validar as técnicas e conceitos descritas no referencial teórico, o projeto foi realizado dividindo o processo nos seguintes itens que serão detalhados nesta seção:

1. Escolher a câmera industrial, o CLP, IHM e os motores que atenda os requisitos mínimos de funcionamento para o projeto;
2. Projetar a estrutura mecânica;
3. Projetar o Painel elétrico;

3.1.1 Câmera Industrial: IV3-600 *Keyence*

A câmera industrial escolhida para este trabalho foi o modelo IV3, da renomada fabricante *Keyence*, reconhecida por suas soluções inovadoras no setor de automação industrial. A linha IV3 se destaca pela integração de inteligência artificial, tornando-a ideal para inspeções automáticas e reconhecimento de imagens em processos industriais. Além disso, sua interface de configuração é simplificada e intuitiva, permitindo que operadores com pouca experiência técnica realizem ajustes rápidos e precisos.

O modelo IV3 oferece um desempenho excepcional graças aos seus algoritmos avançados de inteligência artificial, que ajustam automaticamente os parâmetros de inspeção. Isso garante alta precisão na detecção e análise, reduzindo significativamente a ocorrência de falsos positivos ou negativos, mesmo em situações que envolvem pequenas variações nos produtos. A robustez do dispositivo é outro diferencial, possibilitando seu funcionamento confiável em ambientes industriais adversos, com poeira, umidade e vibração.

A conectividade também é um ponto forte do IV3, que suporta interfaces como *Ethernet/IP* e *Profinet*, facilitando sua integração com sistemas industriais complexos. Além disso, o equipamento é altamente versátil, permitindo a realização de múltiplas inspeções simultaneamente. Essa flexibilidade amplia suas aplicações, abrangendo setores

como o automotivo, eletrônico, farmacêutico e de alimentos, onde é utilizado para controle de qualidade, rastreamento de produtos, leitura de códigos e inspeção de embalagens. A escolha do IV3 neste trabalho se deu por sua capacidade de aliar alta performance, confiabilidade e adaptabilidade às demandas do projeto.

Figura 17 – Sensor de visão com IA integrada Série IV3.



Fonte: [keyence](#) (2024b)

A conexão de rede do modelo IV3 com os demais periféricos foi implementada com base no fluxograma apresentado na [Figura 18](#). Este fluxograma detalha a estrutura de integração, evidenciando como estabelecer a comunicação entre os dispositivos. Nessa configuração, foi utilizado um servidor *FTP/SFTP*, que funciona como um serviço de armazenamento em nuvem, permitindo tanto a transferência de arquivos online quanto a criação de backups. Esse servidor é responsável por receber as imagens capturadas pelo sensor IV3, bem como os resultados do julgamento final realizado pelo dispositivo.

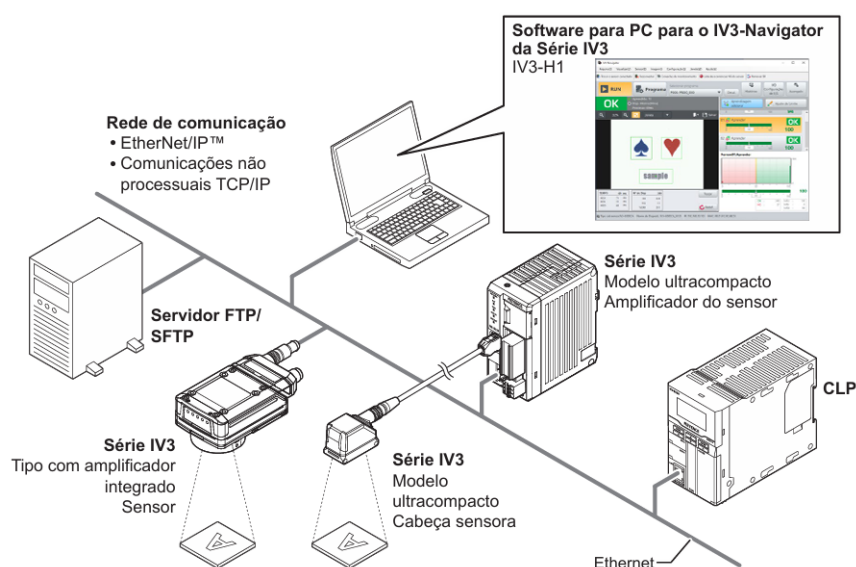
Toda a comunicação ocorre por meio do protocolo *Ethernet/IP*, que assegura a transferência de dados com alta eficiência e confiabilidade. O controle do sensor é gerenciado por um Controlador Lógico Programável (CLP) integrado no mesmo barramento de comunicação, permitindo uma sincronização eficiente entre os sistemas. Essa configuração não apenas centraliza o gerenciamento dos dados e comandos, mas também garante uma operação coesa e em tempo real entre o sensor IV3, o servidor *FTP/SFTP* e o CLP, atendendo aos requisitos de automação e conectividade deste projeto.

O funcionamento do sensor IV3 está detalhado no fluxograma apresentado na [Figura 19](#), que descreve as etapas necessárias para sua configuração e operação. O processo começa com a definição da imagem mestre, que serve como referência para que o sistema realize o julgamento entre o correto e o errado durante as inspeções. A partir dessa

base, o sensor permite configurar diversas ferramentas de análise disponíveis, garantindo flexibilidade para atender a diferentes demandas industriais.

Neste projeto, foram utilizadas exclusivamente as ferramentas de análise de cor, localização de posição e aprendizado. A ferramenta de cor baseia-se na comparação entre os *pixels* da imagem mestre e os da imagem capturada, identificando discrepâncias relacionadas à tonalidade e padrão de cores. A ferramenta de localização de posição verifica a conformidade da posição das peças, garantindo que estejam corretamente alinhadas, evitando erros que poderiam comprometer o processo produtivo. Por último, a ferramenta de aprendizado, que utiliza a inteligência artificial integrada ao sensor, é empregada para identificar e aprender áreas específicas da imagem mestre selecionadas pelo usuário. Essa ferramenta oferece a possibilidade de realizar ajustes adicionais de aprendizado conforme novos cenários ou necessidades são identificados durante as avaliações.

Figura 18 – Exemplo de conexão de rede da série IV3.



Fonte: [keyence \(2024a\)](#)

A comunicação entre o sensor IV3 e o Controlador Lógico Programável (CLP) foi configurada com base nos endereços especificados nas [Figura 20](#) e [21](#) do manual do equipamento. Esses endereços são fundamentais para a troca de mensagens e comandos entre os dispositivos. Para este projeto, foram utilizados apenas os principais endereços necessários à funcionalidade requerida, tais como:

- **Trigger:** responsável por enviar o comando para o sensor iniciar uma nova inspeção;
- **OK e NG:** indicadores que informam o resultado da análise, indicando se o julgamento foi realizado corretamente (OK) ou se apresentou alguma não conformidade (NG);

- **BUSY:** este bit sinaliza que o sensor está ocupado e não pode aceitar novos comandos de disparo. Essa situação ocorre durante operações como geração de imagem, processamento do julgamento, registro de uma nova imagem mestre externa ou troca de programas;
- **Pronto (Ready):** este bit indica que a inicialização do sensor foi concluída e o dispositivo está disponível para operação após ser energizado;
- **Solicitação de troca de programa:** permite que o CLP solicite ao sensor a troca do programa em uso, garantindo flexibilidade para diferentes cenários de operação;
- **RUN:** este bit indica que o sensor está em modo operacional ("RUN") e que nenhum erro de sistema foi detectado, confirmando que o dispositivo está apto a executar suas funções.

Figura 19 – Fluxo de funcionamento IV3.

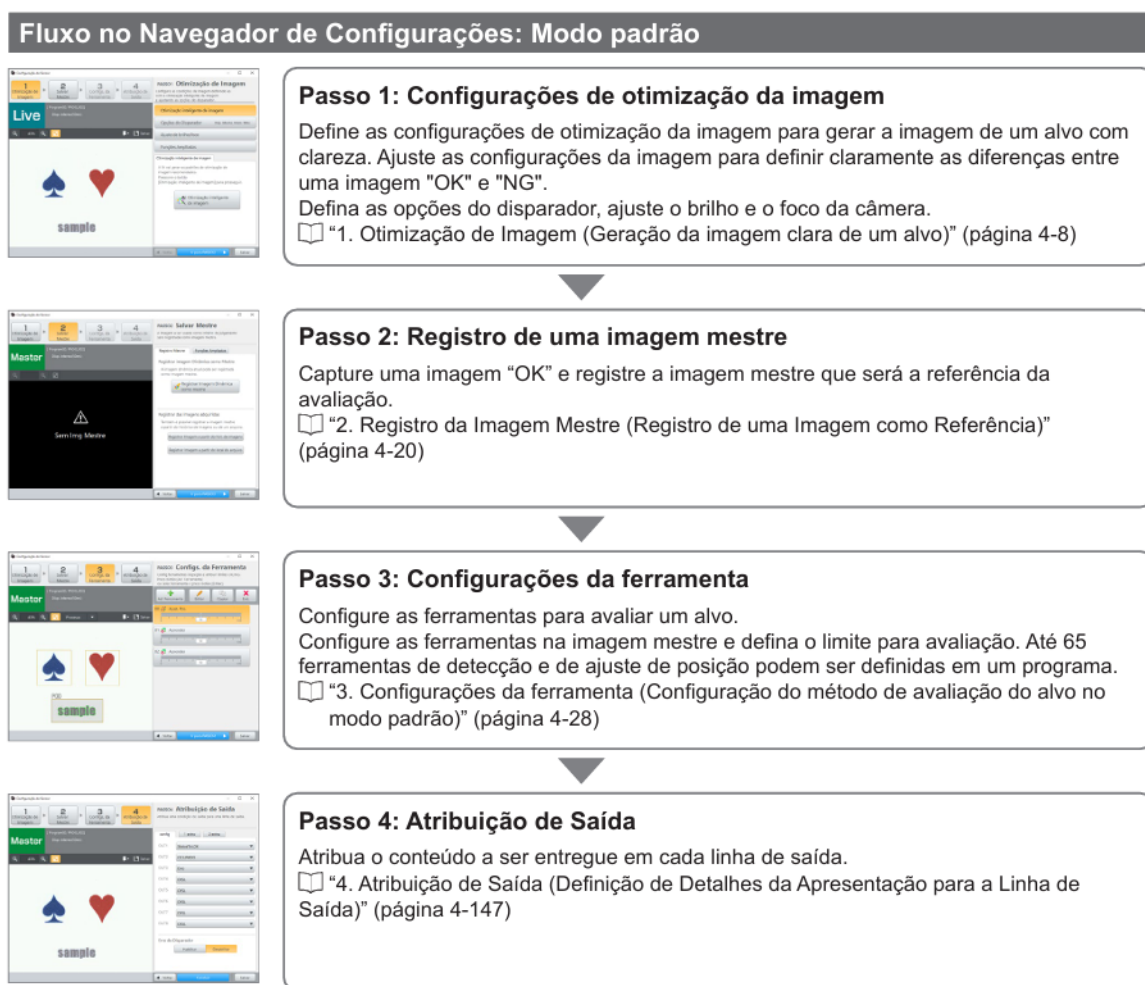


Figura 20 – Comunicação IV3 para CLP.

Endereço	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
0	Resposta de alteração do valor da configuração	Resposta de parada de salvamento em cartão SD	Resposta de limpar buffer	Resposta de redefinir estatísticas	Resposta de limpar aviso	Resposta de troca de programa	Resposta de registro mestre	Resposta de disparo
1	Falha na alteração do valor de configuração	Falha de parada de salvamento em cartão SD	Reservado pelo sistema			Falha de troca de programa	Falha no registro mestre	Falha de disparo
2	Status de identificação do cartão SD	Pronto para o gatilho	Pronto	RUN	Status de geração de imagens	BUSY	Atualização de resultado concluída	Resultado disponível
3	Erro	Aviso	Estouro de buffer	Espaço livre insuficiente no cartão SD	Reservado pelo sistema			Informações de modo de classificação
4	Reservado pelo sistema	Julgamento geral NG	LOGIC4	LOGIC3	LOGIC2	LOGIC1	Correção de posição	Julgamento geral OK
5	Reservado pelo sistema							

Fonte: [keyence \(2024a\)](#)

Figura 21 – Comunicação CLP para IV3.

Endereço	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
0	Solicitação de alteração do valor da configuração	Solicitação de parada de salvamento em cartão SD	Solicitação de limpar buffer	Solicitação de redefinir estatísticas	Solicitação de limpar aviso	Solicitação de troca de programa	Solicitação de registro mestre	Solicitação de disparo
1	Reservado pelo sistema							
2	Reservado pelo sistema							Notificação de aquisição de resultado concluída
3	Reservado pelo sistema							
4 - 5	N.º do programa							
6 - 7	N.º da configuração do limite superior/inferior (ferramentas que não a de OCR) N.º da configuração do texto-mestre. (Ferramenta de OCR) N.º de configuração de salvo em FTP/SD. (Função de salvamento em cliente de FTP / cartão SD)							
8 - 11	Limite superior/inferior (ferramentas que não a de OCR) Texto-mestre/número de letras (ferramenta de OCR) Configurações de salvamento em FTP/SD (função de salvamento em cliente de FTP / cartão SD)							
12 - 103	Reservado pelo sistema							

Fonte: [keyence \(2024a\)](#)

3.1.2 CLP: Delta AS228P

O controlador logico programador (CLP) escolhido para a implementação dos algoritmos é o AS228P (Figura 22), produzido pela fabricante DELTA. A versão escolhida pertence a uma linha lançada da familiar AS200 essa serie fornece algumas funcionalidades importantes para esse projeto como :

- Capacidade de Processamento: capacidade de processamento eficiente, ideal para pequenas e médias automações industriais. Ele suporta programação de sequências, temporizadores, contadores e outras funções de controle lógicas comuns em sistemas industriais;
- Entradas e Saídas (I/O): tendo 15 entradas e 11 saídas, podendo expandir conforme a necessidade com adição de novos módulos de expansão;
- Comunicação e Conectividade: conta com portas de comunicação, como RS-232 e RS-485, para integrar com outros dispositivos e sistemas, como IHM (Interface Homem-Máquina), sensores, e sistemas *SCADA*.
- Integração diferentes protocolos de rede: tendo conectividade tanto com o *Modbus TCP/IP* quanto para *Ethernet/IP*;
- Programação: A programação pode ser feita utilizando o software de desenvolvimento *ISPSoft*, que é fácil de usar e segue a lógica de programação *Ladder*, um dos métodos mais comuns em sistemas de automação. Além disso, o *ISPSoft* permite simulações e depurações do programa, o que ajuda a otimizar o processo de desenvolvimento;
- Desempenho e Robustez: projetado para operar de forma contínua em ambientes industriais, sendo capaz de suportar condições adversas, como variações de temperatura e interferências eletromagnéticas.

Figura 22 – CLP AS228P.



Fonte: [Delta \(2024\)](#)

O software *ISPSoft* foi utilizado para a criação do algoritmo que foi implementado no CLP. Ele é uma ferramenta poderosa e intuitiva, projetada para facilitar o desenvolvimento, depuração e manutenção de sistemas de automação industrial. Baseado em normas

internacionais, como a IEC 61131-3, o *ISPSOft* oferece suporte a diversas linguagens de programação, como *Ladder Diagram (LD)*, *Instruction List (IL)* e *Structured Text (ST)*.

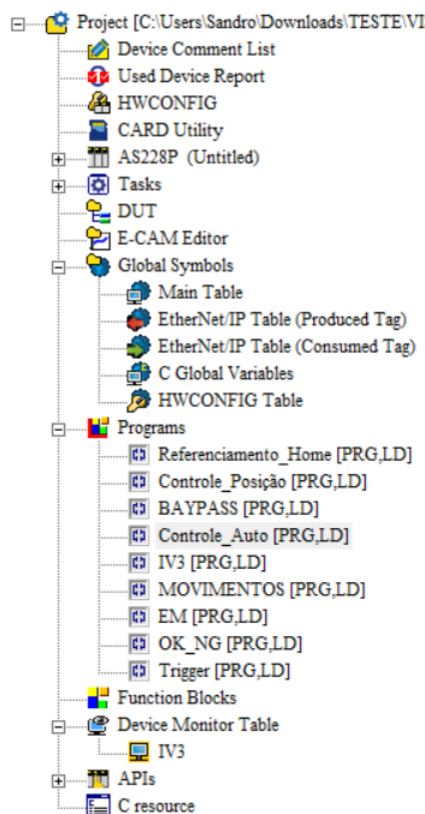
Para esta aplicação, foi escolhida a linguagem padrão *Ladder Diagram (LD)* para desenvolver todo o algoritmo. A utilização desta linguagem, amplamente adotada em automação industrial, facilita a interpretação e a manutenção do sistema. O algoritmo foi estruturado em programas independentes como podemos ver na [Figura 23](#), permitindo a criação de rotinas isoladas e modulares, o que contribui para maior organização e flexibilidade no projeto.

A seguir, apresentamos a divisão desses programas juntamente com suas respectivas explicações de funcionamento:

- **Referenciamento:** rotina responsável por realizar o "Home", posicionando cada eixo no ponto zero, de forma a garantir que os eixos estejam em suas posições de origem antes de iniciar qualquer operação;
- **Controle de Posição:** permite movimentar os eixos de forma independente e livre, proporcionando flexibilidade para ajustes manuais ou intervenções específicas;
- **BAYPASS:** rotina que coloca o sistema em modo conveyor, no qual apenas o transporte contínuo ocorre, sem executar ações adicionais ou controles específicos;
- **Controle Auto:** gerencia todas as movimentações e comandos em modo automático, coordenando o funcionamento do sistema de maneira autônoma e eficiente;
- **Movimentos:** armazena em memórias específicas do CLP os valores corretos de posição registrados, garantindo que essas posições sejam facilmente acessadas para uso futuro;
- **EM:** rotina dedicada a situações de emergência, sendo responsável por desligar os motores imediatamente e garantir a segurança do sistema e dos operadores;
- **OK_NG:** rotina que recebe a confirmação do sensor IV3 sobre o resultado da análise da imagem (OK ou NG). Este recurso garante que o sistema só permita movimentação caso a imagem seja validada como correta;
- **TRIGGER:** responsável por realizar a captura de imagens, seja de forma automática ou manual, integrando os comandos do CLP ao sensor IV3 para garantir a sincronização entre disparo e análise.

Com a integração de todas as rotinas descritas, temos o funcionamento central do projeto. O funcionamento inicia com o registro das posições que serão inspecionadas, bem

Figura 23 – Programas em Ladder.



Fonte:Autor

como a configuração e o armazenamento das imagens mestres no sensor IV3, que servirão como base para as verificações.

Após essa etapa, o sistema pode ser ativado no modo automático. Nesse modo, ele segue uma sequência de movimentos previamente salvos durante a operação manual inicial. Em cada posição, o julgamento é realizado pelo sensor IV3, que verifica se a imagem capturada corresponde aos critérios estabelecidos na imagem mestre. O avanço para a próxima posição só ocorre se houver confirmação positiva do sensor (OK), garantindo a conformidade do processo.

Ao final do ciclo de inspeções, o sistema envia os dados ao sistema interno da empresa, indicando que a peça ou placa foi inspecionada e está completamente validada.

3.1.3 IHM: Delta DOP103WQ

Para servir como interface entre o CLP e o operador, foi escolhida uma IHM (Interface Homem-Máquina) da mesma fabricante do CLP, a Delta. O modelo selecionado foi o DOP-103WQ (Figura 24), uma solução simples, porém eficiente, que atende às necessidades do projeto.

Essa IHM possui uma tela colorida de 4,3 polegadas, capaz de exibir 65.536 cores, com resolução de 480x272 *pixels*, garantindo uma visualização clara e detalhada das informações. Sua conectividade *Ethernet* integrada proporciona recursos avançados de comunicação, incluindo FTP para transferência de arquivos, envio de e-mails para alertas ou notificações, além de monitoramento e controle remoto por meio do *VNC* (Computação de Rede Virtual). Adicionalmente, suporta *NTP* (Protocolo de Tempo de Rede), assegurando sincronização precisa do sistema com servidores de horário.

Figura 24 – Delta DOP-103WQ.



Fonte: Mercado Livre (2024)

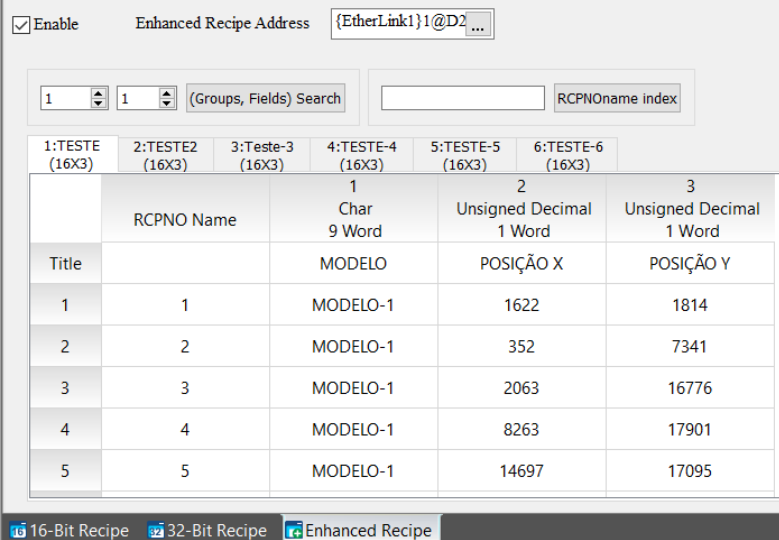
Assim como o CLP possui um software próprio para programação, a IHM DOP-103WQ também conta com seu ambiente dedicado, o *DOPSoft*. Este software oferece uma ampla gama de ferramentas para criar interfaces dinâmicas e intuitivas, com uma rica biblioteca de elementos gráficos que facilitam o desenvolvimento de telas personalizadas e interativas.

O *DOPSoft* também suporta a implementação de marcos, que são utilizados para criar programações internas diretamente na IHM, especialmente para configurar botões que executam ações específicas. Outra funcionalidade importante é a capacidade de utilizar a memória interna da IHM para armazenamento, permitindo que dados importantes sejam salvos localmente.

No contexto deste projeto, foi implementada uma funcionalidade de receitas (Figura 25), que utiliza a memória interna da IHM para armazenar seis tabelas distintas. Cada tabela corresponde a um modelo de operação, contendo, no mínimo, dezesseis posições para salvar coordenadas. Essas coordenadas são configuradas e recuperadas conforme a necessidade, garantindo flexibilidade e eficiência na operação automatizada. Essa abordagem permite que o operador selecione rapidamente o modelo desejado e trabalhe com

configurações previamente salvas, otimizando o tempo e a precisão durante o processo produtivo.

Figura 25 – Receita IHM.



The screenshot shows a software interface for 'Enhanced Recipe Address'. At the top, there is a checkbox labeled 'Enable' and a text field containing '{EtherLink1}1@D2...'. Below this, there are two dropdown menus, both set to '1', and a search box labeled '(Groups, Fields) Search'. To the right of the search box is a button labeled 'RCPNOname index'. The main part of the interface is a table with six columns: '1:TESTE (16X3)', '2:TESTE2 (16X3)', '3:Teste-3 (16X3)', '4:TESTE-4 (16X3)', '5:TESTE-5 (16X3)', and '6:TESTE-6 (16X3)'. The table has five rows of data. The first row is a header with columns: 'Title', 'RCPNO Name', '1 Char 9 Word', '2 Unsigned Decimal 1 Word', and '3 Unsigned Decimal 1 Word'. The subsequent rows contain numerical data for each column. At the bottom of the interface, there are three buttons: '16-Bit Recipe', '32-Bit Recipe', and 'Enhanced Recipe'.

1:TESTE (16X3)	2:TESTE2 (16X3)	3:Teste-3 (16X3)	4:TESTE-4 (16X3)	5:TESTE-5 (16X3)	6:TESTE-6 (16X3)
Title	RCPNO Name	1 Char 9 Word	2 Unsigned Decimal 1 Word	3 Unsigned Decimal 1 Word	
1	1	MODELO-1	1622	1814	
2	2	MODELO-1	352	7341	
3	3	MODELO-1	2063	16776	
4	4	MODELO-1	8263	17901	
5	5	MODELO-1	14697	17095	

Fonte:Autor

No total foi realizado quatro modelos de telas diferentes onde uma é destinada para o operador e as restantes são para os técnicos, logo a seguir temos as funcionalidades de cada uma :

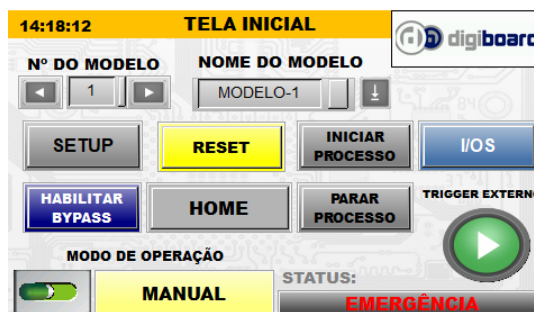
A tela inicial da IHM, ilustrada na [Figura 26](#), foi projetada para oferecer uma interface clara e funcional, com diversos elementos que permitem ao operador interagir diretamente com o sistema. Entre os componentes presentes, destacam-se:

- **Seleção de Modelo:** permite ao operador escolher o modelo desejado, seja para salvar novas posições ou utilizar coordenadas previamente salvas;
- **Botão Setup:** leva a uma tela dedicada aos ajustes de movimentação, facilitando a configuração precisa dos eixos;
- **Reset:** usado para reinicializar todo o sistema, retornando-o ao estado inicial de operação.
- **Habilitar BYPASS:** ativa o modo de operação como conveyor tradicional, onde o sistema funciona apenas como um transportador, sem realizar inspeções ou movimentações adicionais;
- **Home:** executa o referenciamento da máquina, alinhando todos os eixos ao ponto zero;

- **Botões Iniciar e Parar Processo:** permitem ao operador iniciar ou interromper o funcionamento no modo automático, garantindo controle sobre o fluxo de trabalho;
- **Modo Automático e Manual:** alterna entre os modos de operação, dando flexibilidade para ajustes manuais ou execução automatizada;
- **Botão I/OS:** direcionado ao técnico, possibilita o monitoramento em tempo real de todas as entradas e saídas utilizadas pelo CLP, essencial para diagnóstico de falhas e resolução de erros;
- **Trigger Externo:** fornece um comando para capturar manualmente imagens com o sensor IV3, útil para ajustes ou validações pontuais;
- **Barra de Status:** exibe informações em tempo real sobre o status da máquina, permitindo que o operador acompanhe o funcionamento do sistema.

Essa tela inicial foi projetada para ser intuitiva e funcional, atendendo às necessidades tanto dos operadores quanto dos técnicos, assegurando eficiência, clareza e controle sobre o sistema.

Figura 26 – Tela inicial.



Fonte: Autor

A tela de Setup, como ilustrado na [Figura 27](#), possui um mecanismo de segurança para garantir que apenas usuários autorizados possam realizar ajustes no sistema. Para acessar a tela de ajuste de movimento, é necessária a validação do usuário, o que aumenta a segurança e evita alterações não autorizadas que possam comprometer o funcionamento do sistema.

Após a validação, o usuário é direcionado para a tela de ajuste de movimento, apresentada na [Figura 28](#). Essa tela oferece várias funcionalidades, facilitando a operação e o controle preciso do sistema, incluindo:

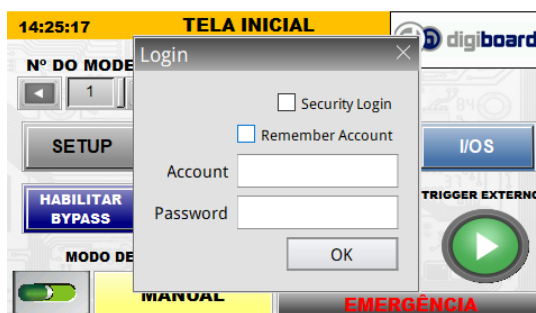
- **Indicadores de Posição:** Exibem informações cruciais sobre a posição atual dos eixos X e Y, comparando com as posições salvas. Isso permite que o técnico visualize

qual posição está registrada para cada eixo e facilita ajustes manuais, caso necessário, durante a configuração do sistema;

- **Botões de Movimento:** Permitem o controle manual do sistema cartesiano, possibilitando o movimento da câmera nos eixos X e Y. Isso é útil para ajustar a posição da câmera, garantindo a melhor configuração para as inspeções;
- **Botão Move:** Responsável por iniciar o movimento automático do sistema para a posição selecionada no momento. Ele permite que o sistema execute os movimentos automaticamente conforme a configuração desejada;
- **Botão Salva:** Salva o modelo e as posições correspondentes na receita, garantindo que as configurações feitas pelo operador sejam armazenadas de maneira eficiente para uso no modo automático.

Essa tela oferece uma interface clara e prática para o técnico realizar ajustes finos e garantir que os movimentos da câmera estejam devidamente configurados, com a possibilidade de salvar as alterações e reusar os ajustes conforme necessário.

Figura 27 – Sistema de Segurança.



Fonte:Autor

As últimas duas telas do sistema são dedicadas à análise das Entradas e Saídas (I/Os) do CLP, como mostrado nas [Figura 29](#) e [30](#). Essas telas foram projetadas para oferecer uma visão detalhada e em tempo real do estado das entradas e saídas do controlador, permitindo o monitoramento contínuo e facilitando o diagnóstico de possíveis falhas.

Além disso, as telas contam com recursos interativos que possibilitam aos usuários simular alterações no estado das entradas e saídas para testar o comportamento do sistema sem interferir diretamente no processo real. Também são exibidas informações adicionais, como endereçamento lógico e status operacional, proporcionando uma análise mais abrangente do desempenho do CLP e auxiliando na manutenção preventiva."

Figura 28 – Ajuste de movimento



Fonte:Autor

Figura 29 – IO entrada.



Fonte:Autor

Figura 30 – IO saída



Fonte:Autor

3.1.4 Motor: *Easy Servo Nema 24 3NM 60HSE3N-D25*

Para o movimento dos eixos X e Y, foi escolhido o motor do modelo *Easy Servo* (Figura 31), que combina as vantagens dos motores de passo tradicionais com a tecnologia de malha fechada. Esses motores possuem um *encoder* integrado, permitindo o monitoramento constante da posição e garantindo que não haja perda de passos durante o

funcionamento. Essa característica é essencial para aplicações que demandam alta precisão e repetibilidade nos movimentos. Além disso, os motores *Easy Servo* são ideais para rotações entre 500 a 1200 rpm, oferecendo maior velocidade e estabilidade em comparação com motores de passo de malha aberta. A malha fechada ajusta automaticamente o torque necessário, mantendo o movimento estável mesmo em condições de variação de carga. Com alta performance, precisão superior e confiabilidade, esses motores foram escolhidos para assegurar o perfeito alinhamento dos eixos e a eficiência do sistema de inspeção.

O *encoder* integrado no *Easy Servo* desempenha um papel crucial ao fechar a malha no sistema de controle. Ele verifica os pulsos enviados pelo driver e os compara com os pulsos *TTL* gerados pelo próprio *encoder*. Essa comparação ocorre dentro do driver, que identifica qualquer defasagem na contagem e ajusta automaticamente os ganhos para minimizar o erro. Esse processo é extremamente rápido, garantindo a precisão contínua do sistema. Além disso, caso seja detectada uma força maior do que a capacidade do conjunto, o sistema emite um alarme, prevenindo danos ao equipamento e assegurando a confiabilidade da operação.

Figura 31 – Easy Servo Nema 24 3NM 60HSE3N-D25.



Fonte: [Tecmaf \(2024\)](#)

3.1.5 Projeto Mecânico

Para o projeto mecânico, foi aproveitada uma estrutura já existente de um conveyor tradicional de 60 metros, que originalmente possuía comunicação *SMEMA*. Contudo, para adequação à nova aplicação, a função de saída automática foi desativada, sendo agora controlada pelo CLP do sistema desenvolvido. O restante das adaptações mecâ-

nicas concentrou-se na integração de um sistema cartesiano montado em uma estrutura acima do conveyor, totalmente fechada para garantir segurança e eficiência.

O eixo Z foi projetado como fixo, permitindo ajustes apenas de forma manual. Para sua sustentação, foram utilizados perfis de alumínio 20x20, enquanto a estrutura principal do sistema cartesiano foi construída com perfis de alumínio 40x40, garantindo maior robustez e estabilidade. As laterais da estrutura foram fechadas com chapas de alumínio de 3 mm, proporcionando proteção e isolamento. Na parte frontal, onde foi instalada a IHM, uma janela de fenolite foi projetada com um corte centralizado e preenchida com uma chapa de acrílico, permitindo ao operador e ao técnico visualizar todo o funcionamento do sistema. A figura abaixo apresenta o projeto finalizado.

Figura 32 – Projeto mecânico finalizado.



Fonte: Autor

3.1.6 Projeto Elétrico

O sistema do painel elétrico foi projetado para atender às necessidades específicas do projeto, seguindo as diretrizes da NR12, que regulamenta a segurança em máquinas e equipamentos. Para garantir a segurança durante a operação, foi instalado um sensor de

segurança na porta do painel. Caso a porta seja aberta durante o funcionamento, o sensor aciona um relé de segurança, que interrompe imediatamente os movimentos do sistema cartesiano.

Além desse dispositivo, o painel conta com outros elementos importantes, como a Luz de Advertência Industrial de 3 Cores, utilizada para indicar o estado da máquina (pronto, em operação ou em erro). A alimentação dos motores foi projetada utilizando uma fonte colmeia de 24V 5A, que oferece a capacidade necessária para atender às demandas do sistema.

Para proteger o CLP contra picos de energia dos sensores, foram empregados relés de interface, que atuam como barreiras de segurança, prevenindo danos diretos ao CLP em caso de falhas. A fiação das entradas e saídas do CLP foi organizada e conectada aos respectivos componentes, garantindo funcionalidade e eficiência do sistema. O painel elétrico finalizado pode ser visualizado na figura abaixo, demonstrando sua organização e adequação às normas e requisitos do projeto.

Figura 33 – Painel elétrico finalizado.



Fonte:Autor

3.2 Integração com Sistema Interno

A empresa onde foi realizado o desenvolvimento do protótipo conta com um sistema interno de rastreabilidade essencial para suas operações, sendo uma fabricante de

componentes eletrônicos. A rastreabilidade é uma das partes mais importantes do processo produtivo, garantindo que cada placa esteja corretamente monitorada ao longo de todas as etapas. Para atender a esse requisito, o sistema de inspeção foi projetado para realizar a leitura de uma etiqueta interna inserida no início da produção, a qual é vinculada à placa em questão.

Como um dos pré-requisitos para o funcionamento, o processo de inspeção só é iniciado após a leitura e validação do código da etiqueta. O sistema verifica se o código está corretamente vinculado à placa, garantindo que apenas placas identificadas e válidas avancem no processo. Após a inspeção, as fotos capturadas e os resultados da validação são vinculados à respectiva placa e enviados para o sistema interno da empresa, concluindo o processo de rastreabilidade.

Esse procedimento pode ser dividido em duas etapas principais. Na primeira etapa, ocorre a comunicação com o sistema interno da empresa para receber a autorização de início do processo. Na segunda etapa, realizada após a inspeção, o sistema garante que a placa só seja liberada para a saída após o envio e confirmação das fotos e dados validados para o sistema interno, assegurando que a placa esteja dentro dos padrões de qualidade exigidos. Essa integração reforça a confiabilidade do processo e a conformidade com os altos padrões de rastreabilidade necessários.

3.2.1 Comunicação via *Modbus*

Para implementar a primeira etapa do processo, foi escolhido o protocolo *Modbus TCP/IP*, devido à sua compatibilidade com a infraestrutura existente. Como o sistema já utiliza um barramento *RJ45* conectado a um *switch*, e a câmera industrial se comunica com o CLP via *Ethernet/IP*, a adoção do *Modbus TCP/IP* não interferiu no funcionamento geral da rede. A integração foi realizada utilizando a biblioteca *pyModbusTCP* em *Python*, que facilita a comunicação com dispositivos que utilizam este protocolo.

A biblioteca *pyModbusTCP* é uma solução prática para implementar comunicação *Modbus* em aplicações *Python*. Ela permite o envio e recebimento de dados entre o sistema e os dispositivos através de funções específicas para leitura e escrita em registros de memória. No projeto, a *pyModbusTCP* foi configurada para estabelecer uma conexão com o CLP, utilizando o endereço IP do dispositivo e a porta padrão do protocolo (502), permitindo a troca de informações de forma rápida e confiável. Sua simplicidade é um dos principais destaques, proporcionando métodos claros para operações como:

- **read_coils:** Este método permite a leitura de entradas ou saídas digitais (também conhecidas como "coils") do dispositivo Modbus. Cada "coil" é representada como um bit, indicando estados binários, como ligado/desligado ou 1/0;

- **read_holding_registers:** Esse método é utilizado para ler registros de memória que armazenam valores analógicos ou inteiros;
- **write_registers:** Com este método, é possível enviar valores diretamente para registros do CLP, atualizando dados ou acionando comandos no sistema. Por exemplo, no projeto, ele foi utilizado para enviar o sinal de "start" ao registro M200, iniciando o processo de inspeção automaticamente após a leitura da etiqueta.

Esses métodos são simples de implementar, já que a biblioteca se encarrega de detalhes técnicos, como a codificação dos pacotes de dados e a gestão da comunicação com o dispositivo. Essa facilidade de uso possibilita ao desenvolvedor focar na lógica da aplicação, sem se preocupar com a complexidade do protocolo *Modbus*.

O funcionamento começa com a leitura da etiqueta, cuja informação é enviada para um registro específico no CLP, o M200. Esse registro foi escolhido por ser uma memória volátil, ideal para gerenciar sinais temporários como o de "start" do sistema. No programa principal do CLP, o registro M200 é monitorado continuamente e atua como uma das condições de início, garantindo que o processo só seja iniciado após a validação da leitura da etiqueta.

Além da condição de início, outras funcionalidades foram implementadas utilizando o protocolo *Modbus TCP/IP*. Por exemplo, em situações de erro ou quando o sistema precisa ser resetado, o CLP zera um registro específico que é monitorado pelo sistema interno. Quando o sistema interno detecta essa alteração, ele realiza automaticamente a limpeza do *log* de eventos e retorna ao estado de espera para uma nova leitura.

3.2.2 Servidor *FTP*(*File Transfer Protocol*)

A câmera industrial utilizada no sistema de inspeção realiza a troca de mensagens via *FTP*, permitindo a transferência das imagens capturadas juntamente com o julgamento realizado pelo sensor. Essa comunicação é essencial para garantir que as imagens válidas sejam enviadas corretamente para o servidor e integradas ao sistema interno da empresa.

Para isso, foi configurada uma conexão local entre o sensor e o servidor *FTP*, onde o sensor envia as imagens com o julgamento (OK ou NG) para uma pasta específica no servidor. O sistema interno monitora continuamente essa pasta, esperando pelas novas mensagens. Após a transferência completa das imagens e dados, o sistema interno envia as informações para o servidor principal e, em seguida, limpa as mensagens da pasta, garantindo que o servidor esteja pronto para receber novos dados.

Esse processo de troca de informações via *FTP* também garante que, ao salvar as imagens válidas, não haja risco de vinculação incorreta de fotos, como a foto de uma placa anterior, ao novo item que entrou no processo de inspeção. Ou seja, assim que uma

nova placa é inserida no sistema para inspeção, o servidor é limpo, evitando qualquer possibilidade de erro na associação das imagens.

Para implementar esse servidor *FTP*, foi escolhido o *FileZilla*, um software *open source* amplamente utilizado para transferência de arquivos via *FTP*, *SFTP* (*FTP* com *SSH*) e *FTPS* (*FTP* com *SSL/TLS*). O *FileZilla* é uma solução confiável e robusta para gerenciar arquivos entre sistemas locais e servidores remotos. Ele oferece uma interface intuitiva e é bastante popular entre desenvolvedores, administradores de sistemas e profissionais de TI devido à sua simplicidade e confiabilidade. O *FileZilla* foi configurado para gerenciar a transferência contínua dos dados do sensor para o sistema interno, assegurando que as imagens e julgamentos sejam registrados corretamente e que o fluxo de dados seja eficiente e seguro.

4 Resultados

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir dos métodos e abordagens descritos nos capítulos anteriores. Para uma melhor organização, os resultados foram divididos em duas partes principais: a primeira parte aborda o processo de cadastro das imagens mestre, enquanto a segunda parte detalha o funcionamento do protótipo na linha de produção.

4.1 Cadastro das Imagens Mestres

Para iniciar o funcionamento do protótipo, antes de colocá-lo em operação automática, foi realizado o que chamamos de "setup da máquina". Este procedimento foi crucial para definir os pontos de inspeção onde o sensor realizaria o julgamento. No caso, a aplicação era voltada para componentes *THT (Through Hole Technology)*, que são colocados manualmente pelos operadores na linha de produção. Para esse processo, utilizou-se uma placa de teste, que foi posicionada na estação de trabalho para a configuração inicial.

O primeiro passo foi a nomeação do modelo, que ficou registrado para futuras referências, permitindo que as configurações e imagens mestre fossem associadas ao modelo específico. Após isso, foi realizado o login no sistema, permitindo o acesso ao modo de setup. Nesse modo, o técnico teve a possibilidade de ajustar os movimentos do sistema cartesiano. Como era o primeiro teste, todos os dezesseis movimentos estavam inicialmente zerados, sem qualquer configuração predefinida.

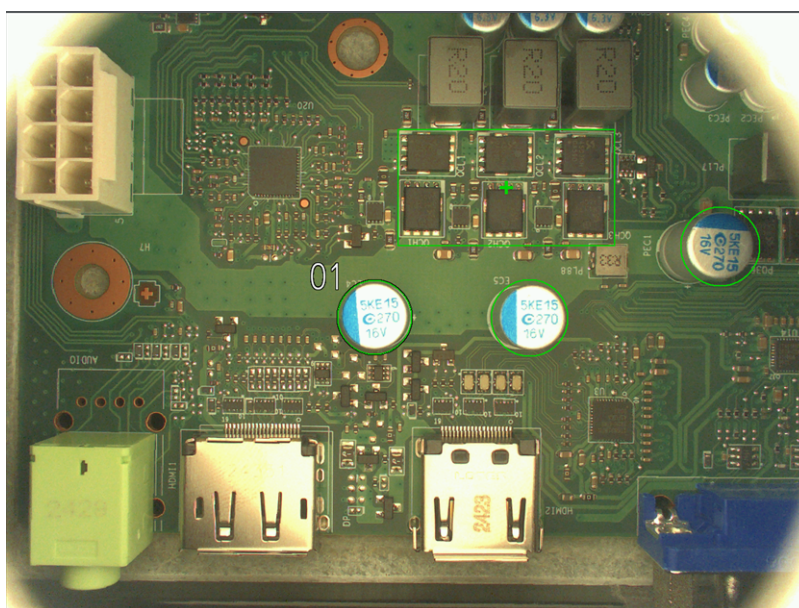
Com a placa posicionada corretamente, iniciou-se o processo de salvamento das imagens mestres no sensor IV3. Essas imagens seriam utilizadas posteriormente para realizar os julgamentos automáticos de qualidade. Em paralelo, os movimentos correspondentes às imagens mestres foram salvos diretamente na IHM, onde o técnico fez o salvamento das posições através do botão 'Salva', ajustando os pontos de movimentação de acordo com a posição das imagens mestres. Esse processo não foi automatizado, permitindo que o técnico ajustasse as coordenadas de movimento de forma personalizada. Assim, o sistema passou a ter uma referência precisa de posição, garantindo que as futuras inspeções fossem realizadas corretamente nas placas que passariam pela linha de produção.

Abaixo, podem ser vistas algumas imagens do processo de salvamento das imagens mestre, com suas respectivas explicações sobre cada etapa e a importância de cada configuração para o funcionamento do sistema de inspeção.

Então, como primeiro movimento, foi realizada a aprendizagem com IA, recurso que o sensor IV3 possui. Durante essa fase, a imagem mestre foi salva, focando em pontos

específicos onde o sensor deveria fazer o julgamento. No nosso caso, os pontos de análise foram os posicionamentos dos três capacitores na placa, que deveriam estar corretamente alinhados e com as polaridades certas. A imagem mestre foi salva com os capacitores perfeitamente encaixados e suas polaridades corretamente orientadas, como ilustrado abaixo:

Figura 34 – Imagem Mestre.



Fonte:Autor

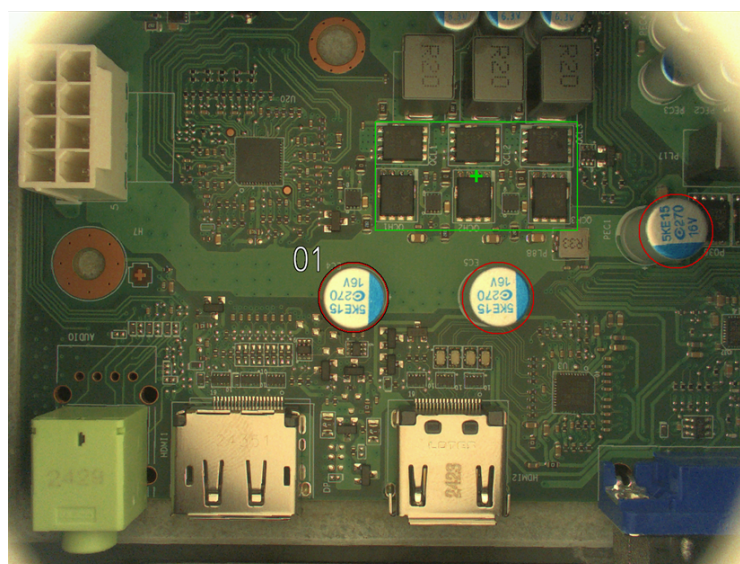
Para tornar a IA mais precisa, alguns testes realizados com o sensor revelaram que uma única aprendizagem não era suficiente para garantir a eficácia do sistema, especialmente devido a fatores como iluminação e outras variáveis ambientais. A solução adotada foi salvar também as imagens que representam os erros mais comuns observados durante a inspeção. No caso dessa posição específica, os dois erros mais frequentes na linha de produção são o componente invertido e o componente ausente. Além disso, outras falhas, como componentes mais altos que o esperado, também podem ser consideradas, mas, conforme vamos analisando as possibilidades, podemos realizar as aprendizagens necessárias para ajustar o banco de dados da IA e evitar erros.

Ao salvar essas imagens de erro, o sistema consegue aprender com essas variações, garantindo que o sensor tenha um banco de dados robusto para tomar decisões mais precisas. Abaixo, podemos ver as [Figura 35](#) e [36](#), que ilustram o aprendizado para os dois casos de erro: na [Figura 35](#), os componentes estão invertidos, e na [Figura 36](#), os componentes estão ausentes.

Para esse modelo específico, foram criados um total de 8 programas de inspeção e 8 movimentos que o CLP deveria executar. Todo o processo de configuração e salvamento das imagens mestre durou aproximadamente 40 minutos. Esse tempo pode variar conforme

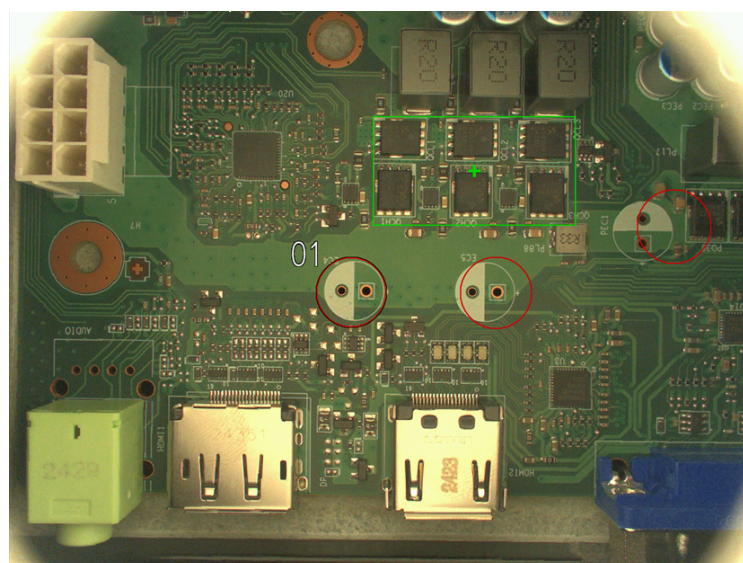
o modelo da placa a ser inspecionada, bem como de acordo com a experiência do técnico responsável pela realização do procedimento. Com o salvamento completo das imagens mestre, o sistema estava pronto para iniciar o ciclo de inspeção automática, garantindo que as futuras placas fossem analisadas com base nas referências salvas e ajustadas.

Figura 35 – Componentes invertidos.



Fonte:Autor

Figura 36 – Componentes ausentes.



Fonte:Autor

4.2 Teste em Linha de Produção

Com todos os movimentos e as respectivas imagens mestre salvas, os testes em linha foram realizados. Para isso, o convey tradicional que estava posicionado antes do forno foi retirado, pois a melhor posição para realizar os testes era logo após o forno. Essa posição foi escolhida devido à distância adequada para que, após a validação da placa pelo inspetor, a operadora pudesse verificar se realmente tudo estava correto, uma vez que a máquina ainda estava em fase de testes.

Após definir a posição do inspetor, foi realizada a conexão do sistema de comunicação *SMEMA*. A entrada do *SMEMA* do inspetor foi conectada à saída do convey tradicional, e a saída do *SMEMA* do inspetor foi conectada à entrada do próximo convey, garantindo a continuidade e fluidez da linha de produção, sem interrupções. Isso permitiu a integração eficiente do novo sistema de inspeção com a produção existente, mantendo o fluxo de trabalho ininterrupto e facilitando a validação das placas durante o processo.

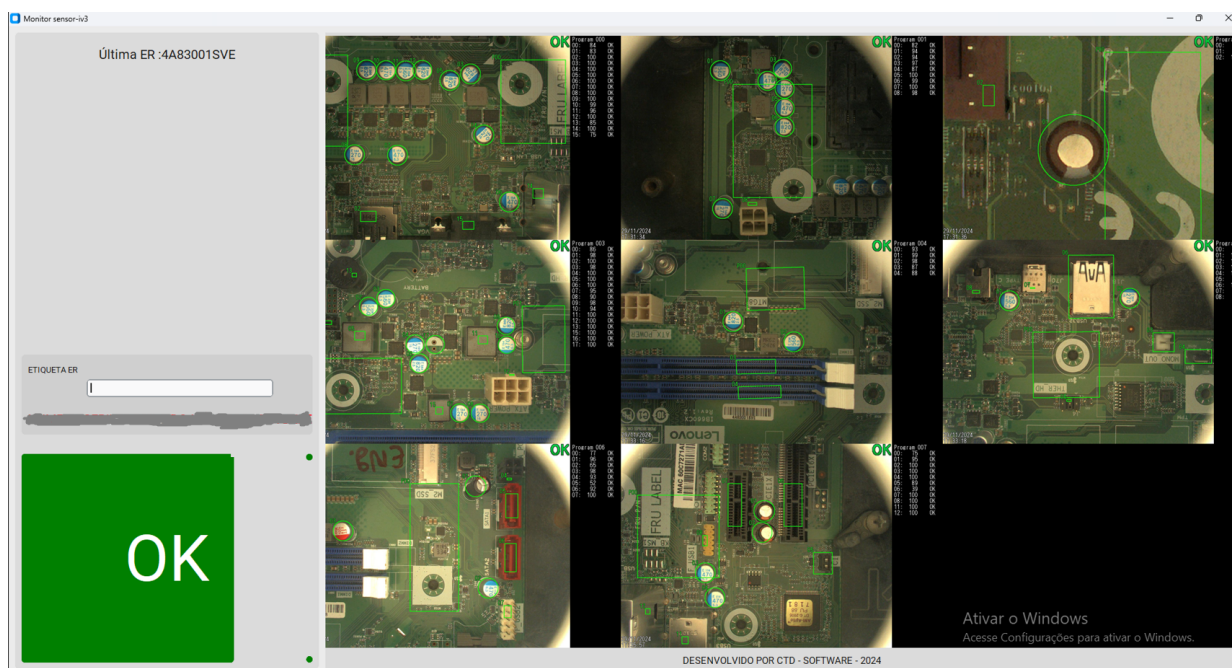
Após todas as conexões realizadas, foram verificadas as comunicações entre o sensor, o CLP e o sistema interno da empresa. Após a confirmação de que tudo estava funcionando corretamente, a máquina foi colocada em modo automático. Nos primeiros testes, alguns erros ocorreram, principalmente relacionados a ferramentas de posição. A velocidade da esteira do convey estava muito alta, o que fazia com que as placas parassem em posições diferentes das imagens mestre salvas, comprometendo a precisão da inspeção.

Para resolver essa questão, foram adicionadas ferramentas de posição em todas as imagens mestre. Isso permitiu que o sensor se localizasse corretamente e realizasse o julgamento das placas com maior precisão. Após a implementação dessas correções, o sistema foi novamente testado e, dessa vez, o processo foi executado corretamente. O sistema confirmou, em tempo real, que a placa que estava sendo inspecionada foi validada e as fotos capturadas foram corretamente vinculadas à placa. O resultado pode ser visto na [Figura 37](#), demonstrando o sucesso da validação no processo de inspeção.

Por questão de sigilo e para proteger a privacidade da informação, o número do *MAC* da placa utilizada nos testes foi borrado, garantindo a segurança dos dados.

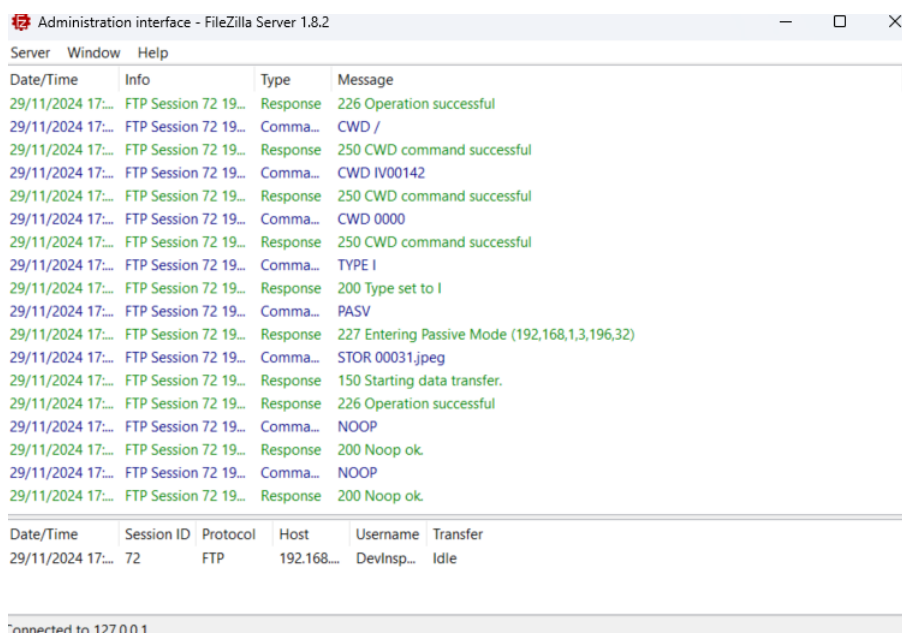
Na [Figura 38](#), podemos observar o servidor funcionando corretamente, com a troca de mensagens entre o sensor e o sistema interno da empresa ocorrendo de forma fluida e sem interrupções. Esse processo de comunicação garantiu que as imagens e os dados do sensor fossem transferidos de maneira eficiente para o sistema, permitindo o monitoramento e a validação contínua das placas inspecionadas durante o processo de produção.

Figura 37 – Inspeção Validada.



Fonte:Autor

Figura 38 – Servidor *FileZilla*.



Fonte:Autor

5 Conclusões

Neste trabalho, foi desenvolvido um protótipo para inspecionar placas de circuitos impressos, focando especificamente em componentes *THT* (*Through Hole Technology*), que são inseridos manualmente pelos operadores na linha de produção. Esses componentes são mais suscetíveis a erros de posicionamento e polaridade, o que torna a inspeção automatizada essencial para garantir a qualidade do produto. O protótipo foi projetado para identificar e julgar esses componentes de forma eficiente, utilizando sensores e câmeras industriais para verificar se os componentes estão corretamente posicionados, com as polaridades corretas.

Durante os testes com diferentes modelos de placas, observou-se que o tempo médio de inspeção até a liberação da placa foi de 25 segundos. No entanto, esse tempo pode variar conforme o número de movimentos e a quantidade de componentes que o sensor precisa avaliar. Identificou-se que, com o aumento das ferramentas de posicionamento, o tempo de processamento para a realização do julgamento também aumenta. Em termos de comparação entre o tempo de produção antes e depois da instalação do protótipo, não foi possível obter essas informações, pois até o momento não foi possível medir o tempo na linha de produção.

Apesar dessas variações, o protótipo mostrou-se totalmente funcional dentro das suas limitações. Ele valida a viabilidade da ideia de multi-conexão em um CLP, com a integração bem-sucedida dos protocolos *Ethernet/IP* e *Modbus*. Ambos os protocolos funcionaram corretamente na troca de mensagens entre o CLP e os sistemas envolvidos. A troca de mensagens entre a linha de produção também foi otimizada por meio da comunicação *SMEMA*, garantindo que a placa só saísse do inspetor após a validação do sistema interno da empresa.

A integração com o sistema interno da empresa foi bem-sucedida, sem nenhum problema de lentidão nas trocas de mensagens, confirmando a eficiência do protótipo no ambiente de produção. Assim, este protótipo não só comprovou a viabilidade técnica do processo, como também ofereceu uma solução eficaz para a inspeção e validação automatizada das placas *THT* na linha de produção.

5.1 Trabalhos Futuros

Dentre os possíveis tópicos que podem ser explorados em trabalhos futuros, os mais notáveis são:

1. Adicionar um eixo de controle de altura para proporcionar maior precisão e controle durante a inspeção, ajustando a distância entre o sensor e a placa;
2. Implementar a ferramenta OCR para verificar a capacitância dos capacitores, garantindo que estejam com as características corretas;
3. Projetar sistemas de eixos com maiores dimensões para permitir a inspeção de modelos de placas de diferentes tamanhos e formatos;
4. Testar outros modelos de câmeras industriais disponíveis no mercado, visando encontrar opções que melhorem o desempenho do sistema de inspeção;
5. Ajustar os códigos em *Ladder* no CLP, tornando-os mais robustos para a troca automática de movimentos e melhorando a estabilidade do sistema;
6. Testar diferentes modelos de Interfaces Homem-Máquina (IHMs) com telas maiores, facilitando a adição de funções operacionais e melhorando a interação com o sistema;
7. Implementar a técnica de Receitas no CLP, permitindo o armazenamento das coordenadas e parâmetros de movimentação diretamente no CLP, em vez de depender exclusivamente da IHM;
8. Testar diferentes fontes de iluminação externa para melhorar a captura de imagens pelo sensor, evitando problemas relacionados à iluminação ambiente inadequada.

Referências

- ANTONELLI, P. L. *Introdução aos controladores lógicos programáveis (CLPs)*. 2010. Citado na página 20.
- BARTEVYAN, L. Industry 4.0 summary report. *DLG*, 2016. Disponível em: <<https://www.dlg.org/en/mediacenter/dlg-expert-reports/food-technology/dlg-expert-report-07-2016-industry-40-summary-report>>. Citado na página 18.
- BLACKWELL, G. R. *The electronic packaging handbook*. [S.l.]: CRC Press, 2017. Citado na página 38.
- BYRES, E. J.; HOFFMAN, D.; KUBE, N. On shaky ground—a study of security vulnerabilities in control protocols. *Proc. 5th American Nuclear Society Int. Mtg. on Nuclear Plant Instrumentation, Controls, and HMI Technology*, p. 1–7, 2006. Citado na página 28.
- CHAUDHARY, V.; DAVE, I. R.; UPLA, K. P. Automatic visual inspection of printed circuit board for defect detection and classification. In: IEEE. *2017 international conference on wireless communications, signal processing and networking (WiSPNET)*. [S.l.], 2017. p. 732–737. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 43.
- CODE, P. Programmable controllers—part 8: Guidelines for the application and implementation of programming languages. Citado na página 20.
- Delta. *CLP de Médio porte Série AS*. 2024. Accessed: 2024-12-03. Disponível em: <<https://delta-electronics.com.br/produtos/clp-de-medio-porte-serie-as/>>. Citado na página 50.
- DORO, M. M. *Sistemática para implantação da garantia da qualidade em empresas montadoras de placas de circuito impresso*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós , 2004. Citado 5 vezes nas páginas 35, 36, 37, 38 e 39.
- FALL, K. R.; STEVENS, W. R. *Tcp/ip illustrated*. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2012. v. 1. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- FESTUGATO, L. *Estudo de viabilidade para automatizar linha produtiva em uma indústria de máquinas e equipamentos para construção civil*. 87 p. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia de Produção)) — Unidade Central de Educação Faem Faculdade - UCEFF, Chapecó, Santa Catarina, 2016. Citado na página 18.
- FUSE, T. Training material,. *PRINTED CIRCUIT BOARD AND SURFACE MOUNT DESIGN*, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 33, 34 e 35.
- GALLOWAY, B.; HANCKE, G. P. Introduction to industrial control networks. *IEEE Communications surveys & tutorials*, IEEE, v. 15, n. 2, p. 860–880, 2012. Citado na página 28.

GLOBALDATA. *Tamanho do mercado de visão computacional, participação, tendências e análise por região, vertical da indústria e previsões de segmento até 2026*. 2023. Disponível em: <<https://www.globaldata.com/store/report/computer-vision-market-analysis/>>. Citado na página 14.

GUARNERI, G. A. *Controladores Lógicos Programáveis - Hardware*. Campus Pato Branco, 2009. Citado na página 21.

GUISLANDE, A. K.; DIAS, D. A. L. C. Estudo e implementação de uma aplicação industrial utilizando o protocolo ethernet/ip. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 31.

IEC. *IEC 61131-3, 2nd Ed. Programmable Controllers - Programming Languages*. 2003. International Electrotechnical Commission. Citado 4 vezes nas páginas 20, 22, 23 e 24.

JENSSEN, R.; ROVERSO, D. et al. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 99, p. 107–120, 2018. Citado na página 40.

keyence. *Manuais da Série IV3*. 2024. Accessed: 2024-12-03. Disponível em: <<https://www.keyence.com.br/support/user/vision/iv3/manual/>>. Citado 3 vezes nas páginas 47, 48 e 49.

keyence. *Sistema de Visão com IA integrada*. 2024. Accessed: 2024-12-03. Disponível em: <<https://www.keyence.com.br/products/vision/vision-sys/vs/>>. Citado na página 46.

KIM, D. et al. Rapid fault cause identification in surface mount technology processes based on factory-wide data analysis. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, SAGE Publications Sage UK: London, England, v. 15, n. 2, p. 1550147719832802, 2019. Citado na página 41.

KUNTE, B. O. Automatic optical inspection of printed circuit boards. *Czech Technical University in Prague, Faculty of Electrical Engineering, Department of Cybernetics-2018*, 2018. Citado na página 14.

LIAO, C.-T.; LEE, W.-H.; LAI, S.-H. A flexible pcb inspection system based on statistical learning. *Journal of Signal Processing Systems*, Springer, v. 67, p. 279–290, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 40.

LIU, L.; WANG, X.; ZHAO, Z. *Industrial Communication Systems and Networks*. Hoboken: Wiley, 2019. Citado na página 26.

LOBASHOV, M.; SAUTER, T. Vertical communication from the enterprise level to the factory floor-integrating fieldbus and ip-based networks. In: IEEE. *2006 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation*. [S.l.], 2006. p. 1214–1221. Citado na página 27.

LUGLI, A. B.; SANTOS, M. M. D. Sistemas fieldbus para automação industrial: Devicenet, canopen, sds e ethernet. *Tatuapé: Erica*, 2009. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

MANDER, T. et al. Data object based security for dnp3 over tcp/ip for increased utility commercial aspects security. In: IEEE. *2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting*. [S.l.], 2007. p. 1–8. Citado na página 28.

- MAR, N. S. S.; YARLAGADDA, P. K.; FOOKES, C. Design and development of automatic visual inspection system for pcb manufacturing. *Robotics and computer-integrated manufacturing*, Elsevier, v. 27, n. 5, p. 949–962, 2011. Citado na página 41.
- Mercado Livre. *Ihm Delta Dop*. 2024. Accessed: 2024-12-03. Disponível em: <<https://produto.mercadolivre.com.br>>. Citado na página 53.
- Modbus Organization. *Modbus Organization Official Website*. 2024. Accessed: 2024-12-03. Disponível em: <<https://www.modbus.org/>>. Citado na página 28.
- MOGANTI, M. et al. Automatic pcb inspection algorithms: a survey. *Computer vision and image understanding*, Elsevier, v. 63, n. 2, p. 287–313, 1996. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 40.
- MORAES, C.; CASTRUCCI, P. *Engenharia de Automação Industrial*. Rio de Janeiro: LTC, 2001. Citado na página 25.
- MUSKINJA, N.; TOVORNIK, B.; TERBUC, M. Use of tcp/ip protocol in industrial environment. In: IEEE. *IEEE International Conference on Industrial Technology, 2003*. [S.l.], 2003. v. 2, p. 896–900. Citado na página 29.
- NETO, A. A. *Finanças corporativas e valor*. 2003. Citado na página 18.
- PALMA, C. W. Indústria 4.0: origem, conceito, os 9 pilares, impactos na indústria e a influência no mundo dos equipamentos elétricos. *Tese Motores*, 2020. Disponível em: <<https://tesemotores.com.br/industria-4-0/>>. Citado na página 17.
- PRASAD, R. P. *Surface mount technology: principles and practice*. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2012. Citado na página 32.
- RESEARCHANDMARKETS. *Relatório de mercado global de visão computacional 2024*. 2024. Disponível em: <<https://www.researchandmarkets.com/reports/5790756/computer-vision-global-market-report>>. Citado na página 14.
- RINALDI, J. An overview of ethernet/ip. *Real Time Automation* < *www.rtaautomation.com*, 2003. Citado na página 31.
- SACOMANO, J.; SÁTYRO, W. Indústria 4.0: conceitos e elementos formadores. *SACOMANO, José Benedito et al. Indústria*, v. 4, p. 27–45, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 19.
- SAUTER, T. Integration aspects in automation-a technology survey. In: IEEE. *2005 IEEE conference on emerging technologies and factory automation*. [S.l.], 2005. v. 2, p. 9–pp. Citado na página 27.
- SCHWEBIG, A. I. M.; TUTSCH, R. Intelligent fault detection of electrical assemblies using hierarchical convolutional networks for supporting automatic optical inspection systems. *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Copernicus Publications Göttingen, Germany, v. 9, n. 2, p. 363–374, 2020. Citado na página 40.
- SHAOBIN, Y. et al. An optical apparatus for inspecting adjacent surfaces defects of tec components with equal-optical-path confocal imaging using optical wedge prisms. In: IOP PUBLISHING. *Journal of Physics: Conference Series*. [S.l.], 2022. v. 2226, n. 1, p. 012005. Citado na página 40.

- SHNEIDERMAN, B.; PLAISANT, C. *Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction*. [S.l.]: Pearson Education India, 2010. Citado na página 25.
- SUNDARAJ, K. Pcb inspection for missing or misaligned components using background subtraction. *WSEAS transactions on information science and applications*, World Scientific and Engineering Academy and Society (WSEAS) Stevens Point , v. 6, n. 5, p. 778–787, 2009. Citado na página 39.
- SZELISKI, R. *Computer vision: algorithms and applications*. [S.l.]: Springer Nature, 2022. Citado na página 19.
- Tecmaf. *Motor de Passo com Encoder*. 2024. Accessed: 2024-12-03. Disponível em: <<https://loja.tecmaf.com.br/motor-de-passo-com-encoder-120-nm-easy-servo-driver>>. Citado na página 58.
- TEIXEIRA, F. M. P. *Revolução Industrial*. 12ª. ed. [S.l.]: Ed. Ática, 2014. Citado na página 17.
- Tekonelectronics. *O que precisa de saber sobre o Protocolo de Comunicação Modbus*. 2024. Accessed: 2024-12-03. Disponível em: <<https://www.tekonelectronics.com/pt/media/tekon-blog/protocolo-comunicacao-modbus/>>. Citado na página 30.
- THOMAS, G. Introduction to the modbus protocol. *The Extension*, v. 9, n. 4, p. 1–4, 2008. Citado na página 28.
- VILJAMAA, H. Smt-linjan kommunikation modernisointi. 2024. Citado na página 33.
- WOODGATE, R. W. *The handbook of machine soldering: SMT and TH*. [S.l.]: Wiley, 1996. Citado na página 35.
- WU, W.-Y.; WANG, M.-J. J.; LIU, C.-M. Automated inspection of printed circuit boards through machine vision. *Computers in industry*, Elsevier, v. 28, n. 2, p. 103–111, 1996. Citado na página 38.
- YAMANE, L. H.; ESPINOSA, D. C. R.; TENÓRIO, J. A. S. Lixiviação bacteriana de sucata eletrônica: influência dos parâmetros de processo. *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, ABM-Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração, v. 10, n. 1, p. 50–56, 2013. Citado na página 41.
- ZHANG, Z.; YANG, G.; LI, Y. *Computer Vision for Industrial Applications*. Cham: Springer, 2021. Citado na página 26.
- ZHAO, H.; CHENG, J.; JIN, J. Ni vision based automatic optical inspection (aoi) for surface mount devices: Devices and method. In: IEEE. *2009 International Conference on Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices*. [S.l.], 2009. p. 356–360. Citado 2 vezes nas páginas 41 e 42.

Apêndices

APÊNDICE A –

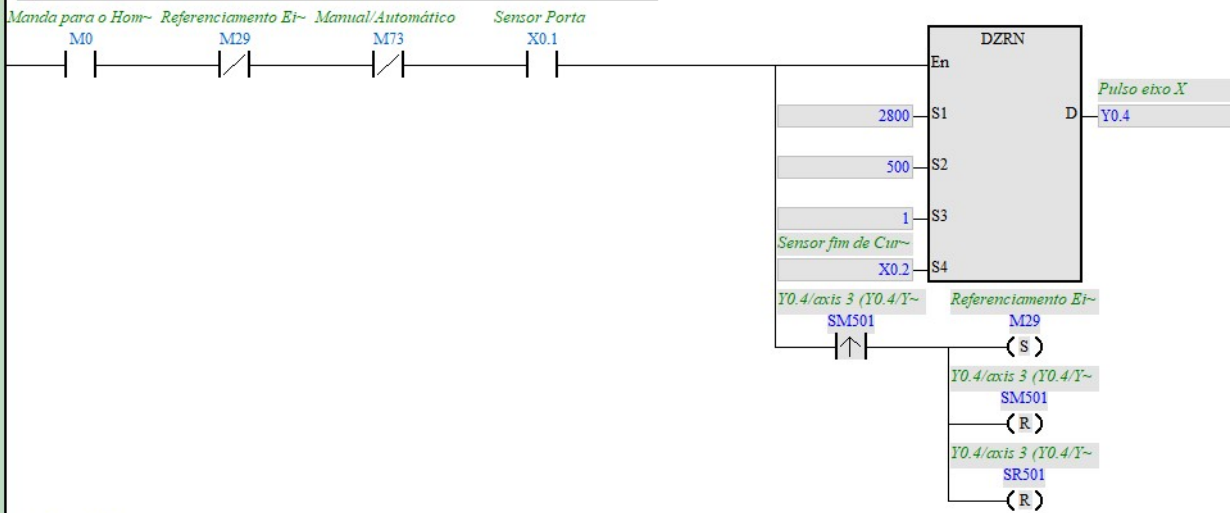
Neste apêndice, apresentamos detalhadamente todos os códigos dos programas desenvolvidos para o funcionamento do CLP utilizado neste projeto. A seguir, os códigos são organizados de acordo com a ordem descrita abaixo:

1. **Referenciamento:** Rotina que posiciona cada eixo no ponto zero para garantir que estejam em suas posições de origem antes de iniciar qualquer operação;
2. **Controle de Posição:** Permite movimentar os eixos de forma independente e livre, proporcionando flexibilidade para ajustes manuais ou intervenções específicas;
3. **BAYPASS:** Coloca o sistema em modo conveyor, onde ocorre apenas o transporte contínuo, sem ações adicionais ou controles específicos;
4. **Controle Auto:** Gerencia todas as movimentações e comandos em modo automático, coordenando o funcionamento do sistema de maneira autônoma e eficiente;
5. **Movimentos:** Armazena os valores corretos de posição registrados em memórias específicas do CLP, garantindo fácil acesso para uso futuro;
6. **EM:** Rotina dedicada a situações de emergência, responsável por desligar os motores imediatamente para garantir a segurança do sistema e dos operadores;
7. **OK_NG:** Recebe a confirmação do sensor IV3 sobre o resultado da análise da imagem (OK ou NG), permitindo movimentação apenas se a imagem for validada como correta;
8. **TRIGGER:** Responsável pela captura de imagens, seja de forma automática ou manual, integrando os comandos do CLP ao sensor IV3 para garantir a sincronização entre disparo e análise.

No.	Declaration Type	Identifiers	Address	Type	Initial Value	Identifier Comments
-----	------------------	-------------	---------	------	---------------	---------------------

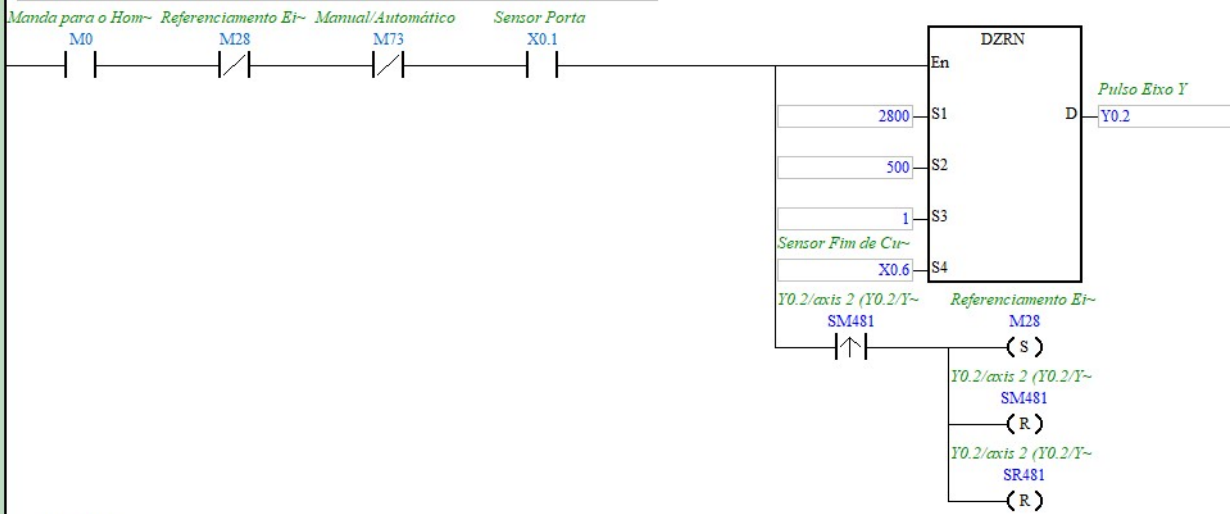
Network 1

Referenciamento do eixo X



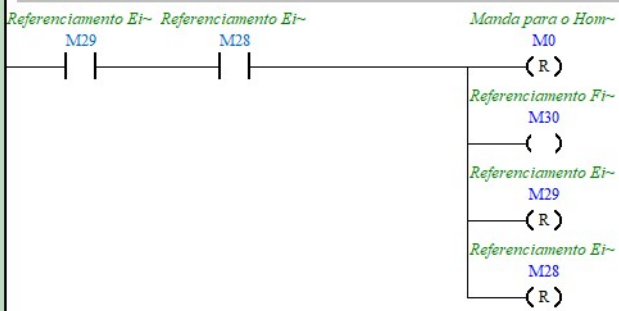
Network 2

Referenciamento do eixo Y

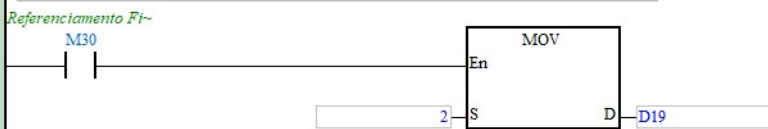


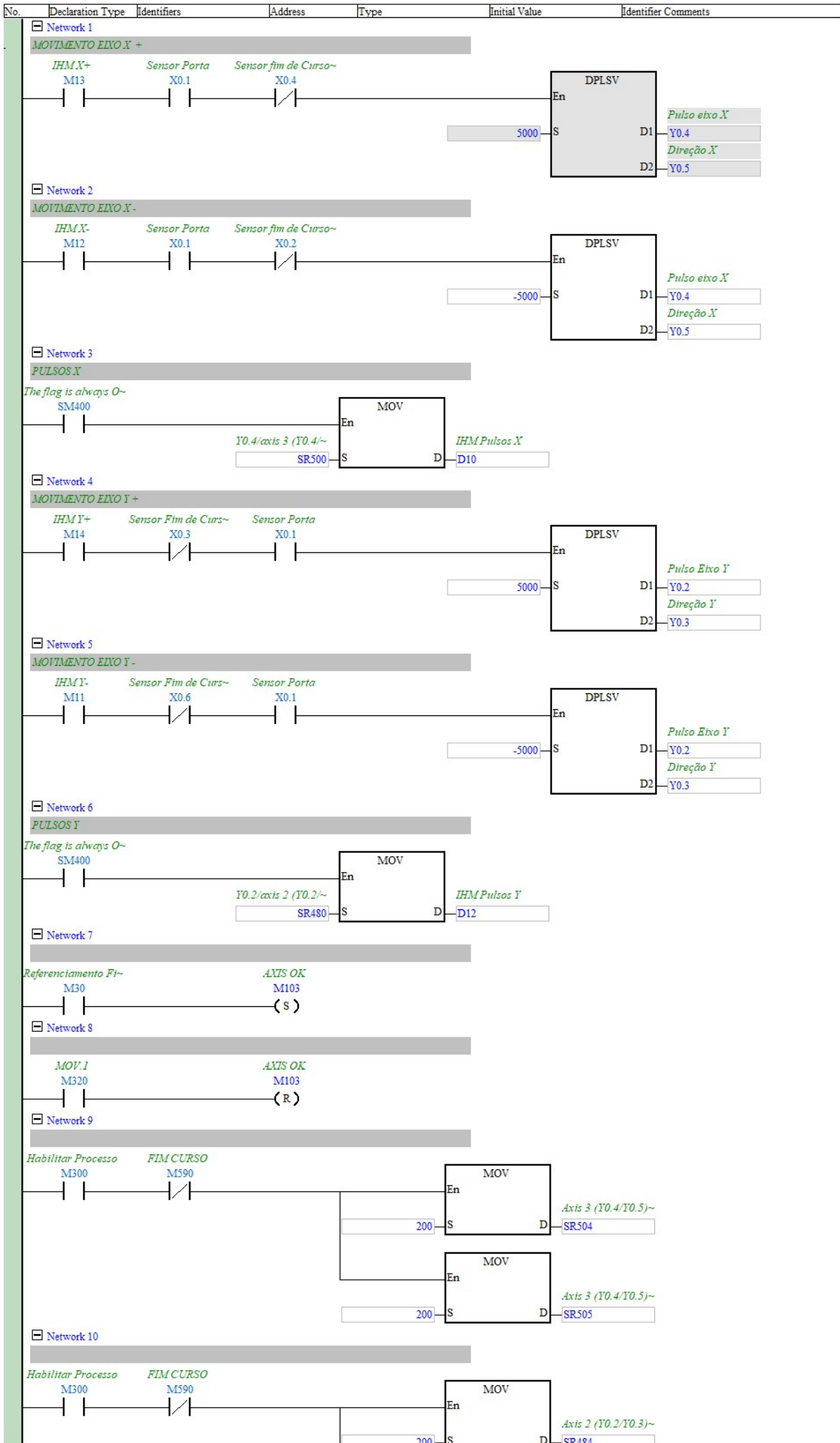
Network 3

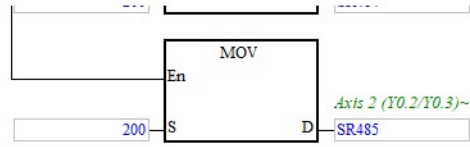
Indicado de Home Finalizado



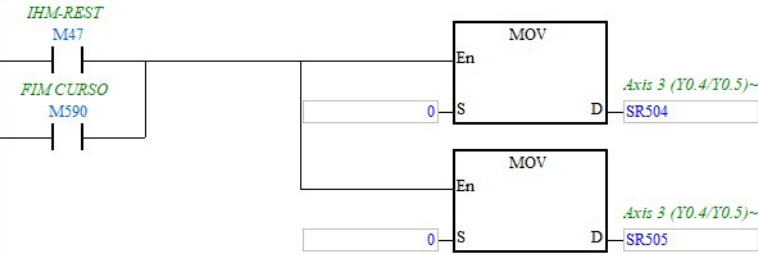
Network 4



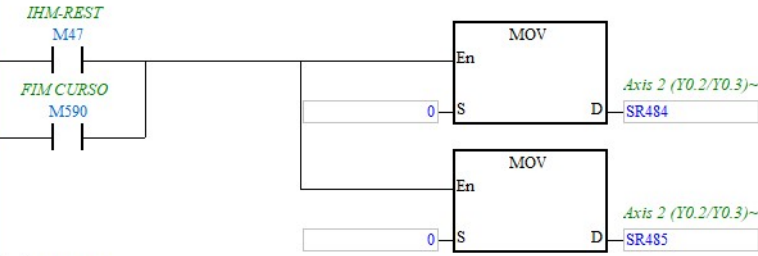




Network 11



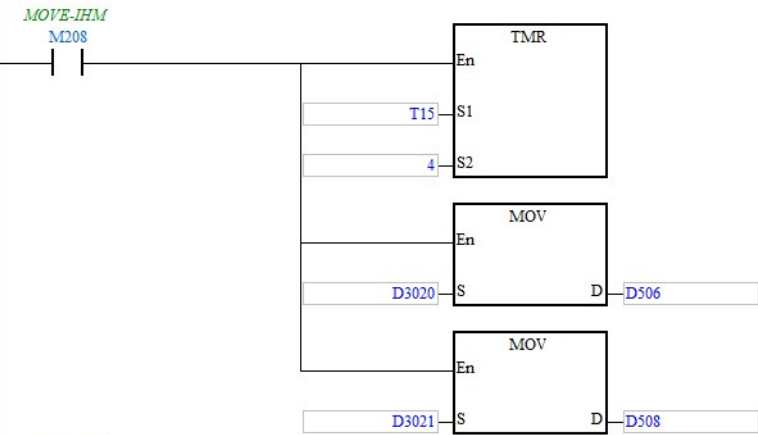
Network 12



Network 13

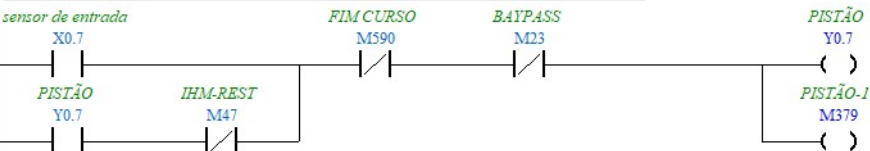


Network 14



Network 15

CONTROLE PISTÃO



Network 16



Network 17

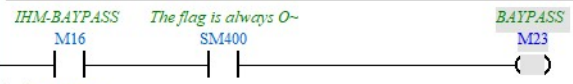
SMEM INT



BAYPASS

No.	Declaration Type	Identifiers	Address	Type	Initial Value	Identifier Comments
-----	------------------	-------------	---------	------	---------------	---------------------

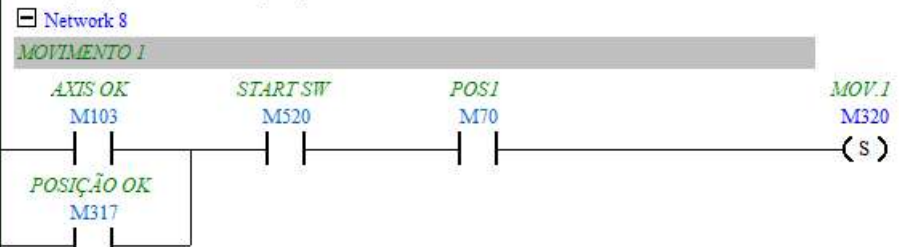
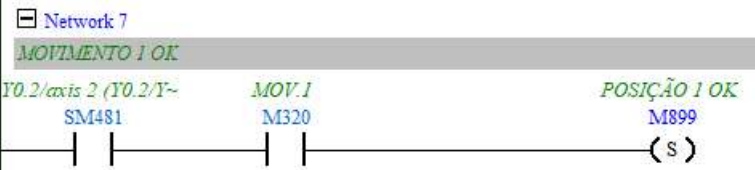
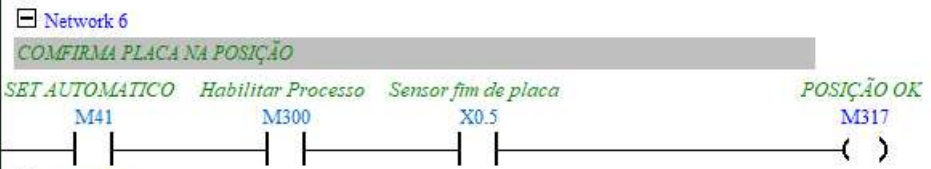
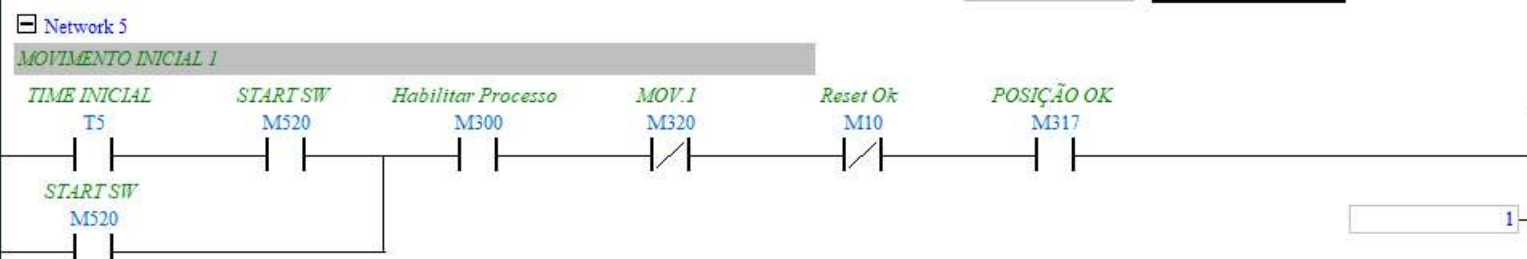
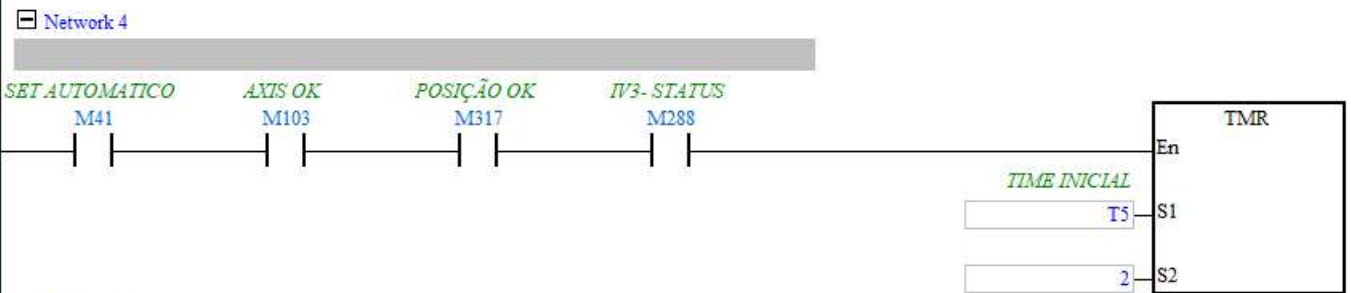
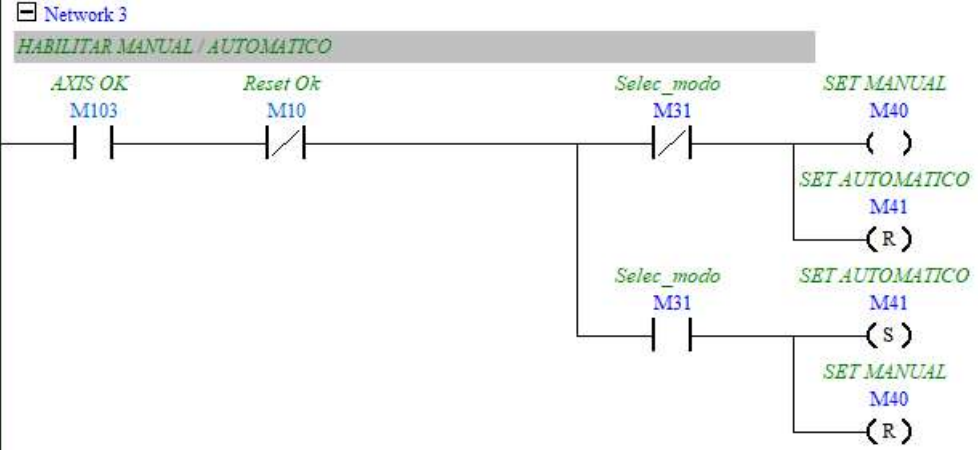
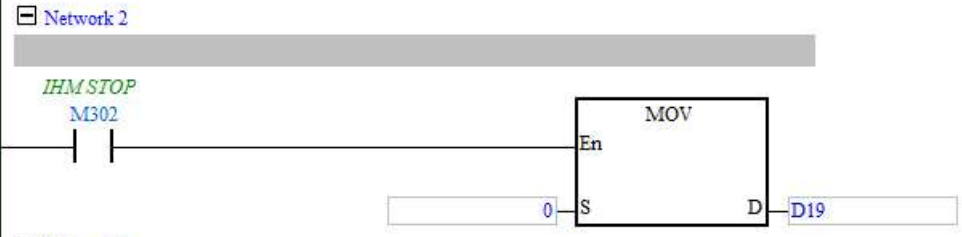
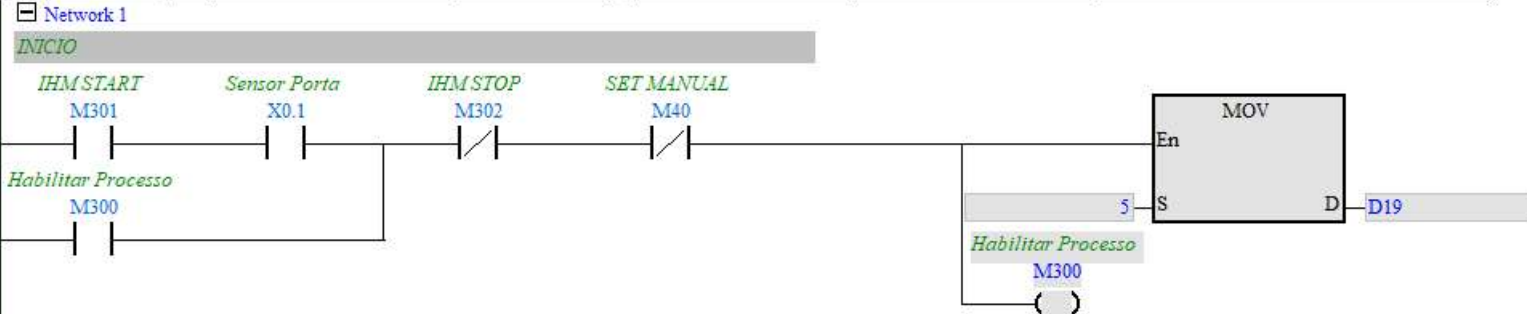
Network 1



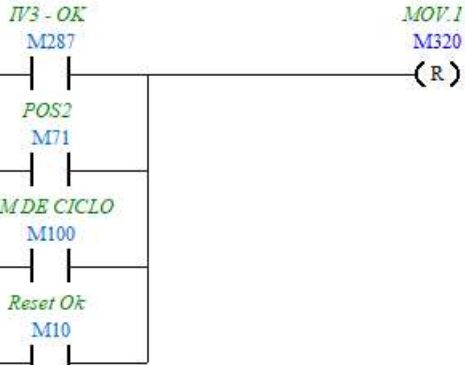
Network 2



No.	Declaration	Type	Identifiers	Address	Type	Initial Value	Identifier Comments
-----	-------------	------	-------------	---------	------	---------------	---------------------

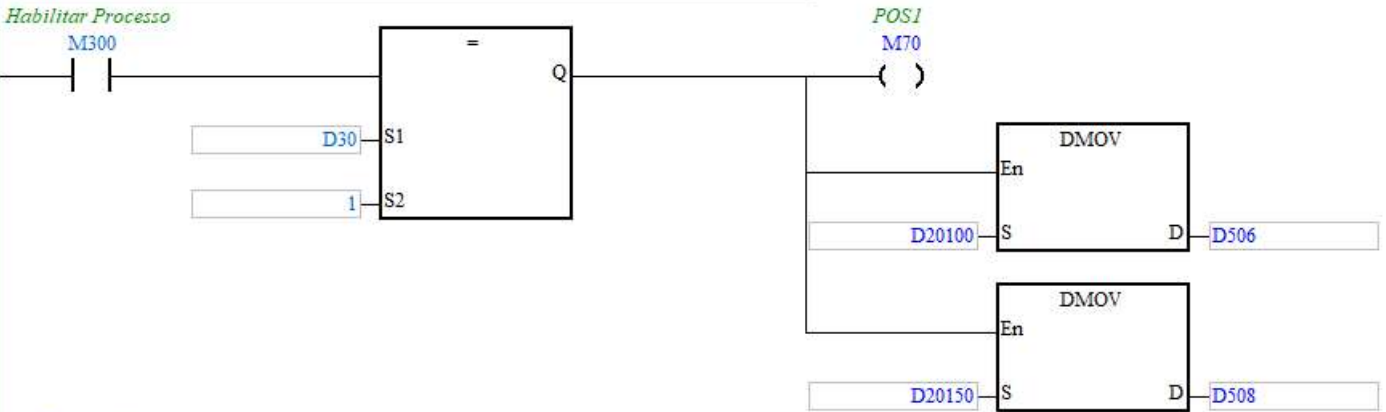


Network 9



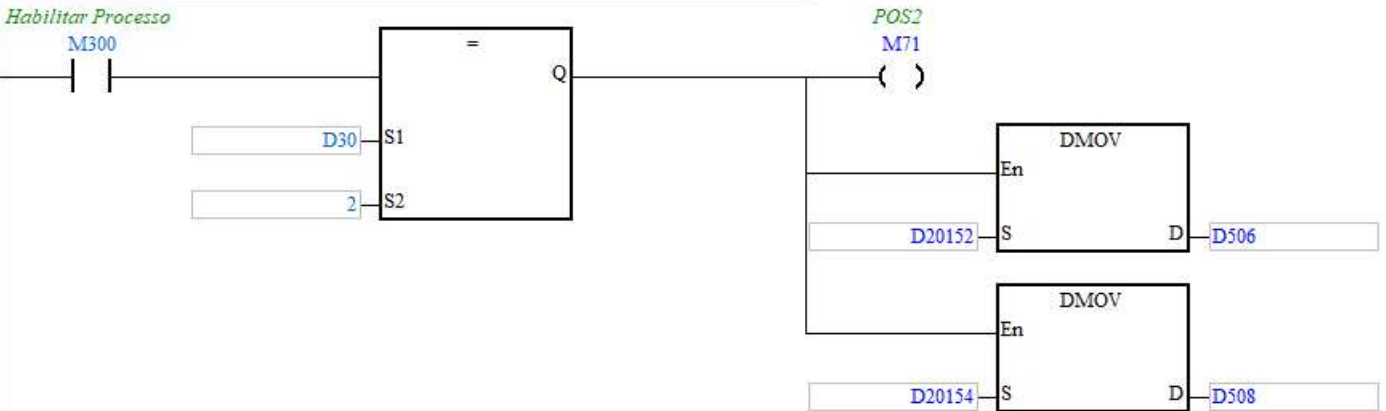
Network 10

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 1



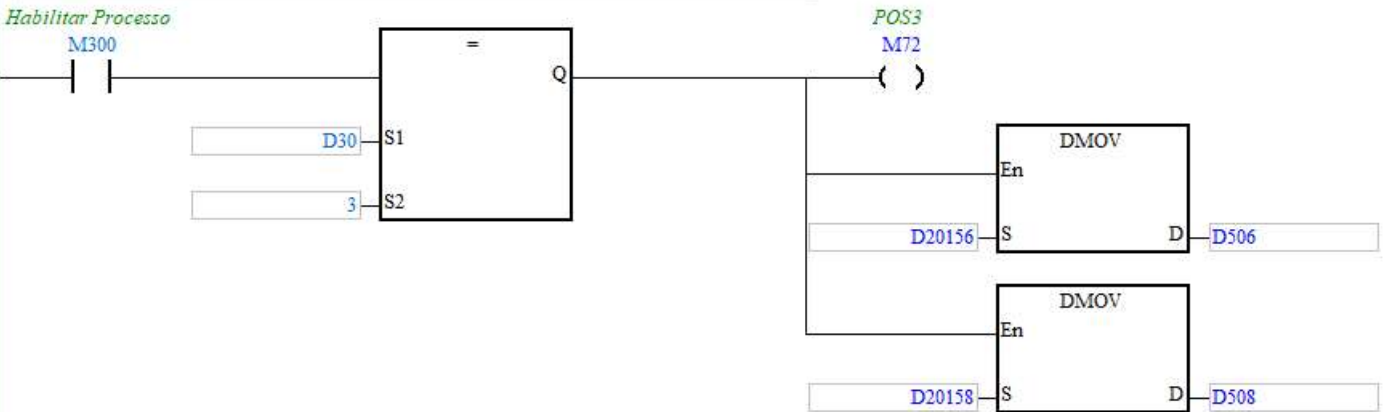
Network 11

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 2



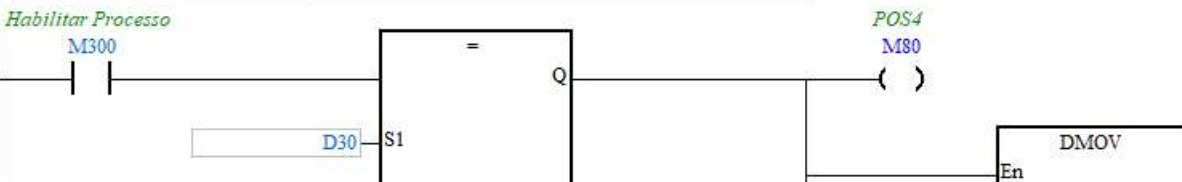
Network 12

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 3

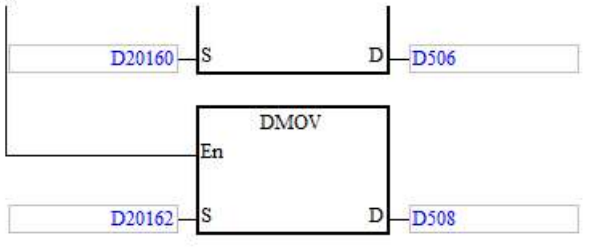


Network 13

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 4



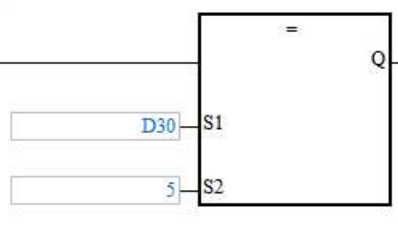
4 S2



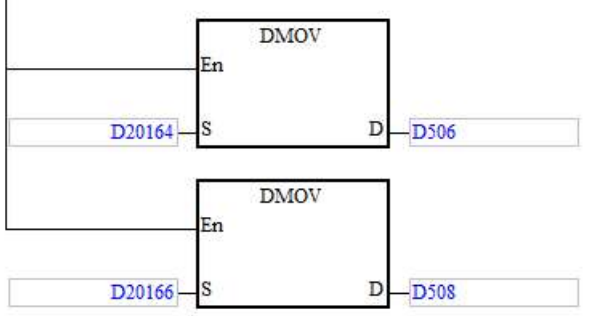
Network 14

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 5

Habilitar Processo
M300



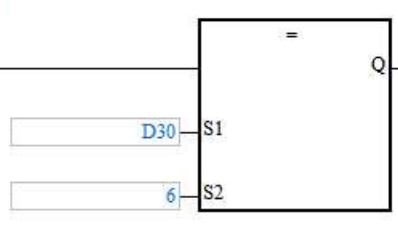
POS5
M81



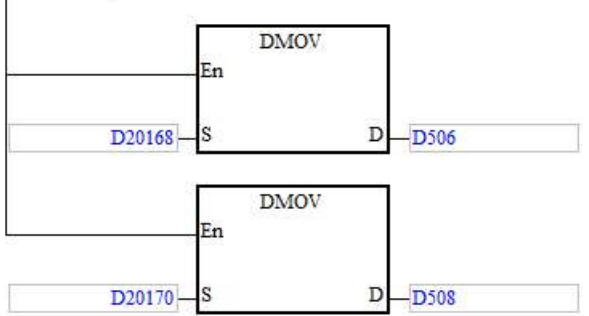
Network 15

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 6

Habilitar Processo
M300



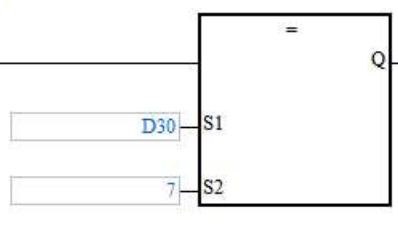
POS6
M82



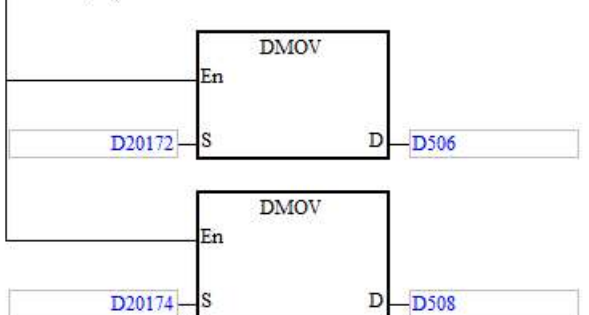
Network 16

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 7

Habilitar Processo
M300



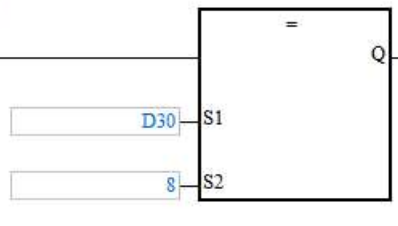
POS7
M83



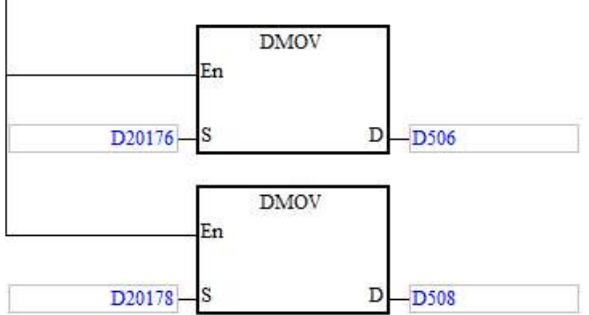
Network 17

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 8

Habilitar Processo
M300



POS8
M84

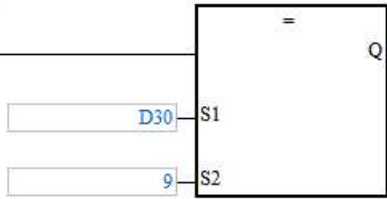


Network 18

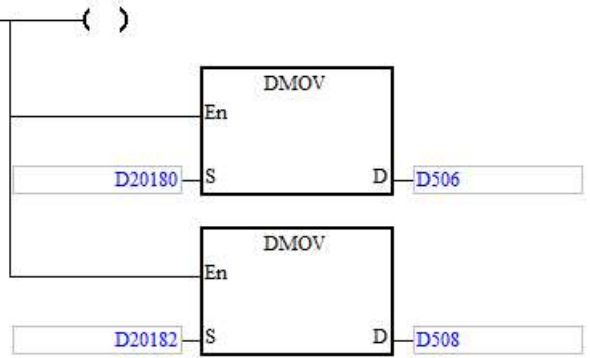
MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 9

Habilitar Processo

M300



POS9
M85

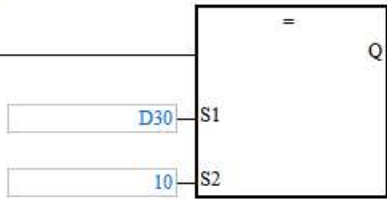


Network 19

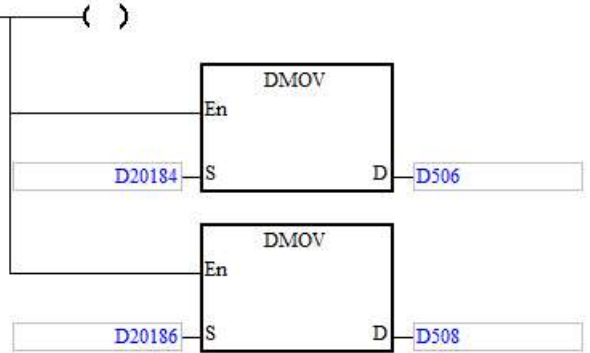
MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 10

Habilitar Processo

M300



POS10
M86

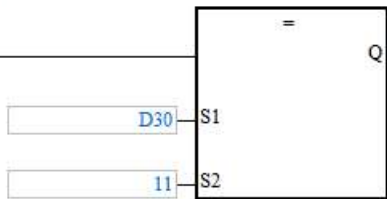


Network 20

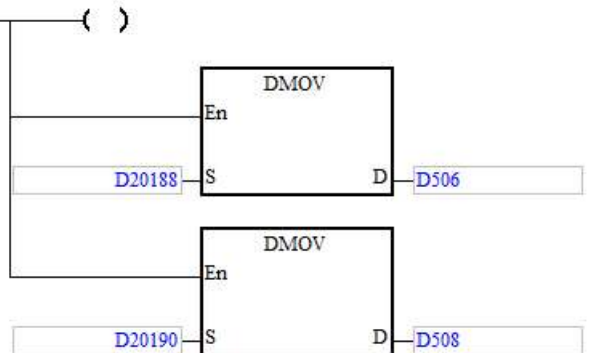
MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 11

Habilitar Processo

M300



POS11
M87

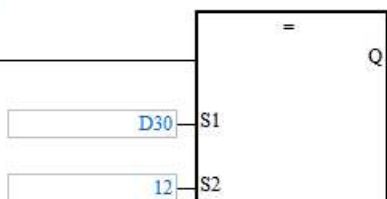


Network 21

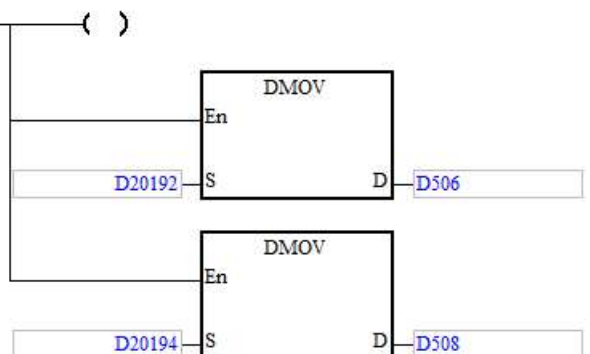
MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 12

Habilitar Processo

M300



POS12
M88

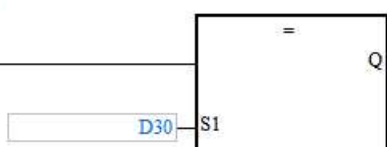


Network 22

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 13

Habilitar Processo

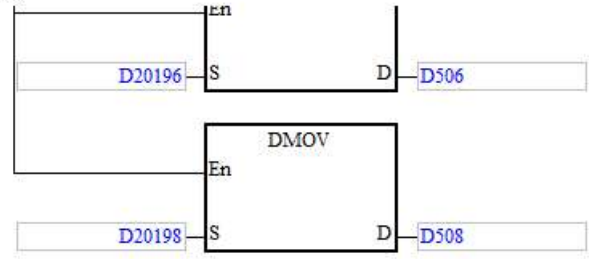
M300



POS13
M89



13 S2



Network 23

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 14

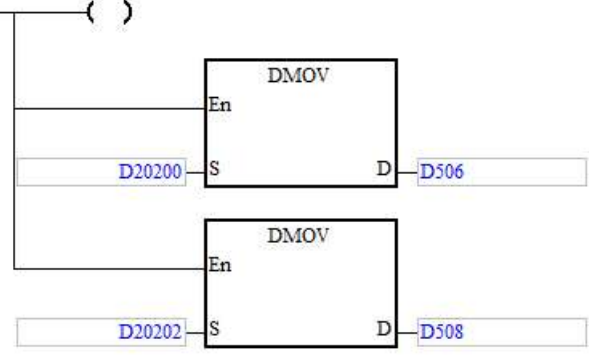
Habilitar Processo

M300



POS14

M90



Network 24

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 15

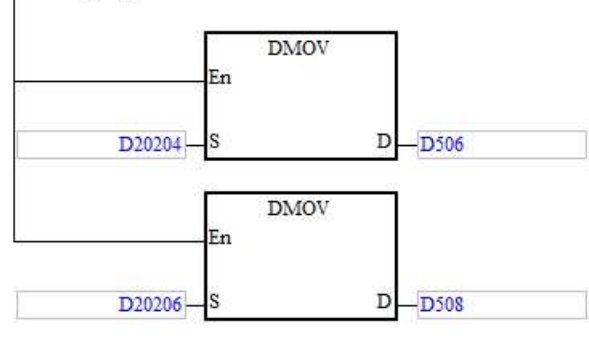
Habilitar Processo

M300



POS15

M91

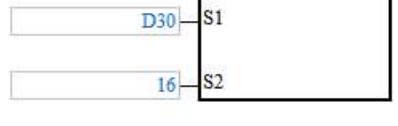


Network 25

MOVIMENTO AUTOMATICO POSIÇÃO 16

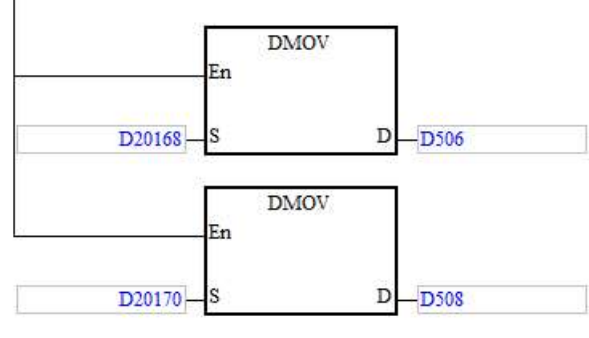
Habilitar Processo

M300



POS16

M92



Network 26

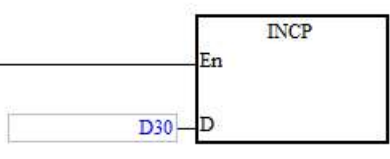
INCREMENTO DE POSIÇÃO

IV3 - OK

M287

Habilitar Processo

M300

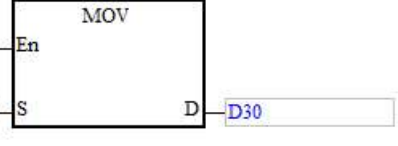
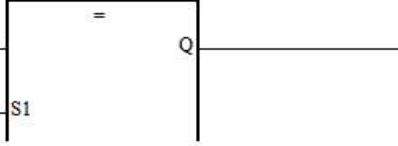


Network 27

FIM DE CICLO - FALTANDO LOGICAS

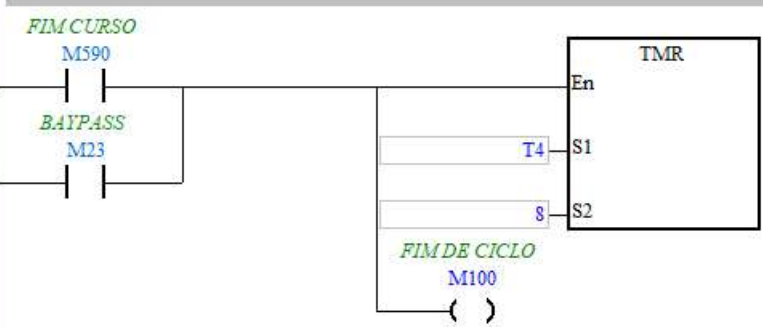
POSIÇÃO-FINAL

D270

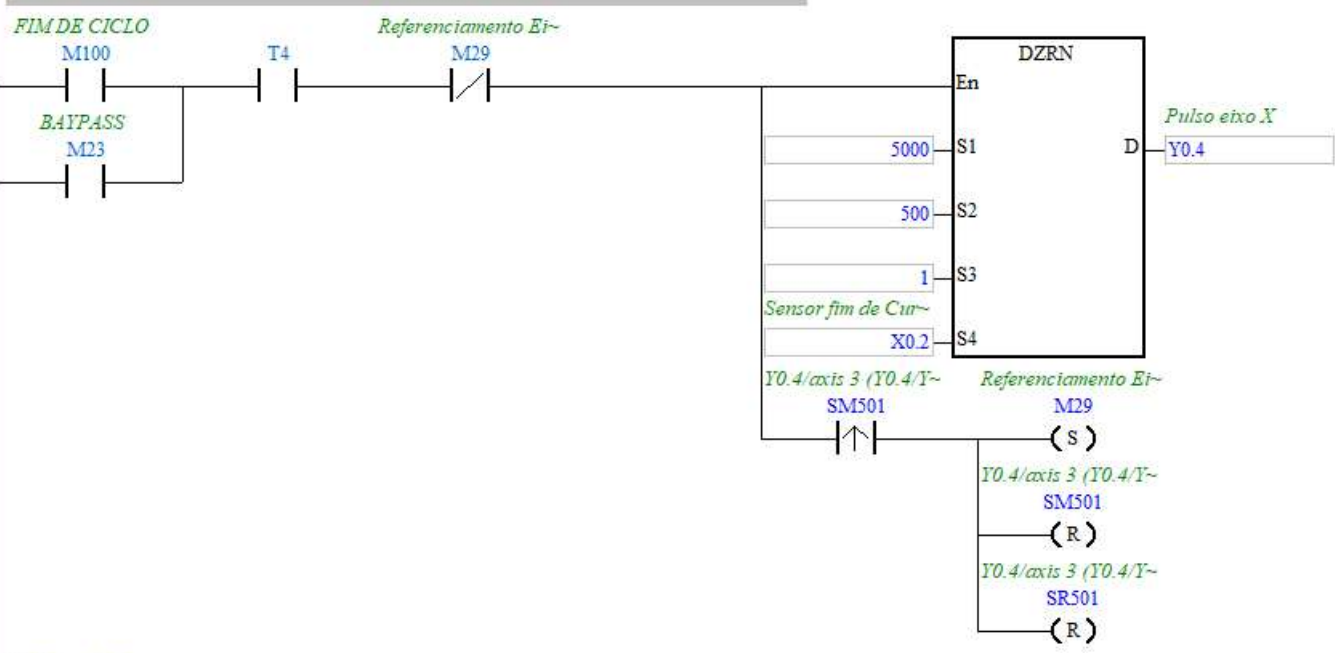


D30 S2

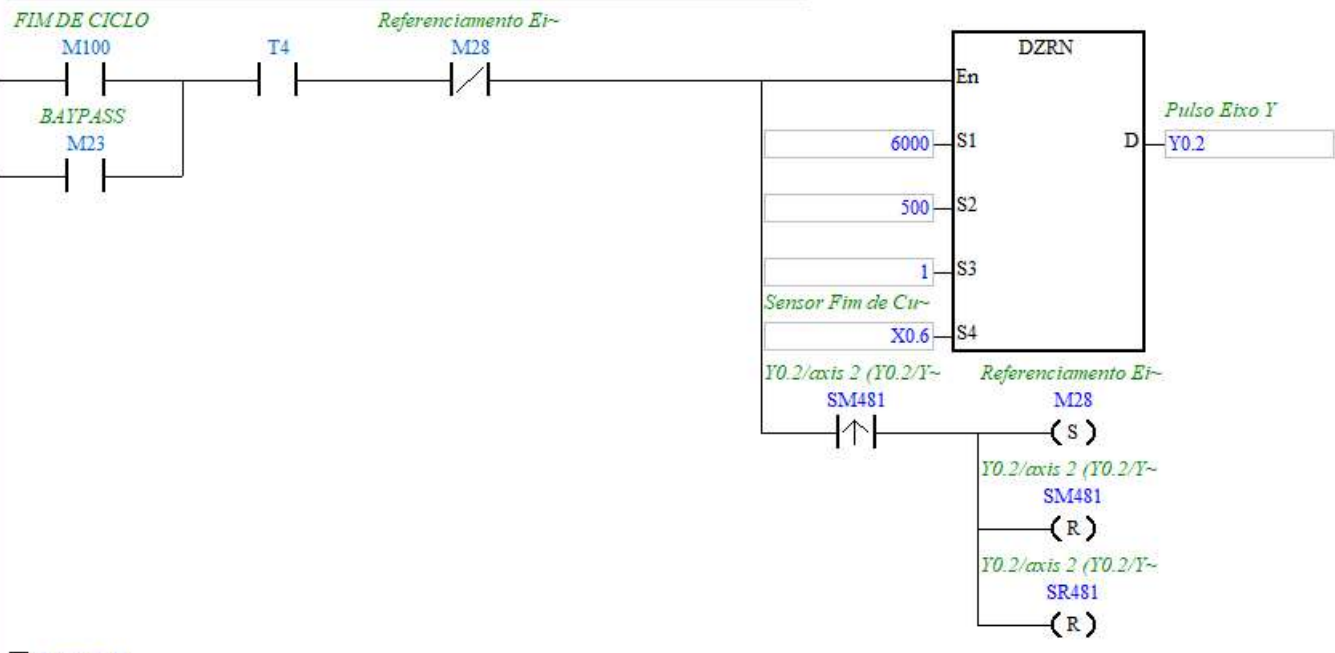
Network 28



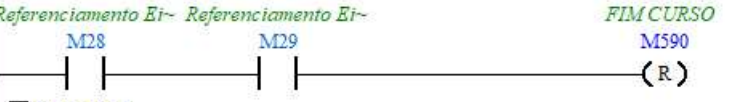
Network 29



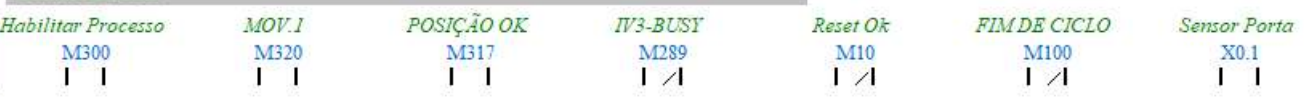
Network 30



Network 31



Network 32



MOV.2
M321

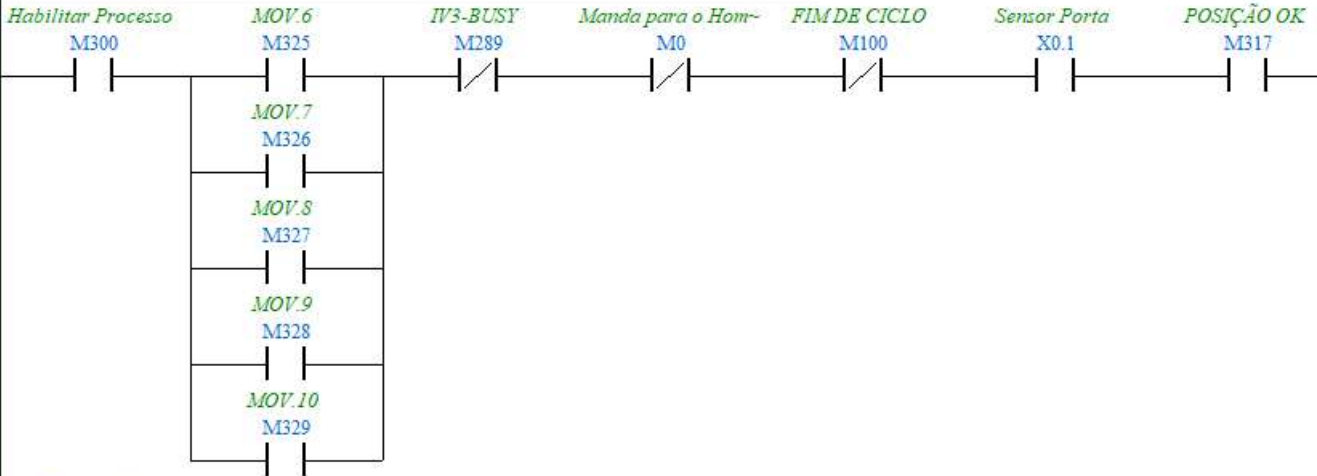
MOV.3
M322

MOV.4
M323

MOV.5
M324

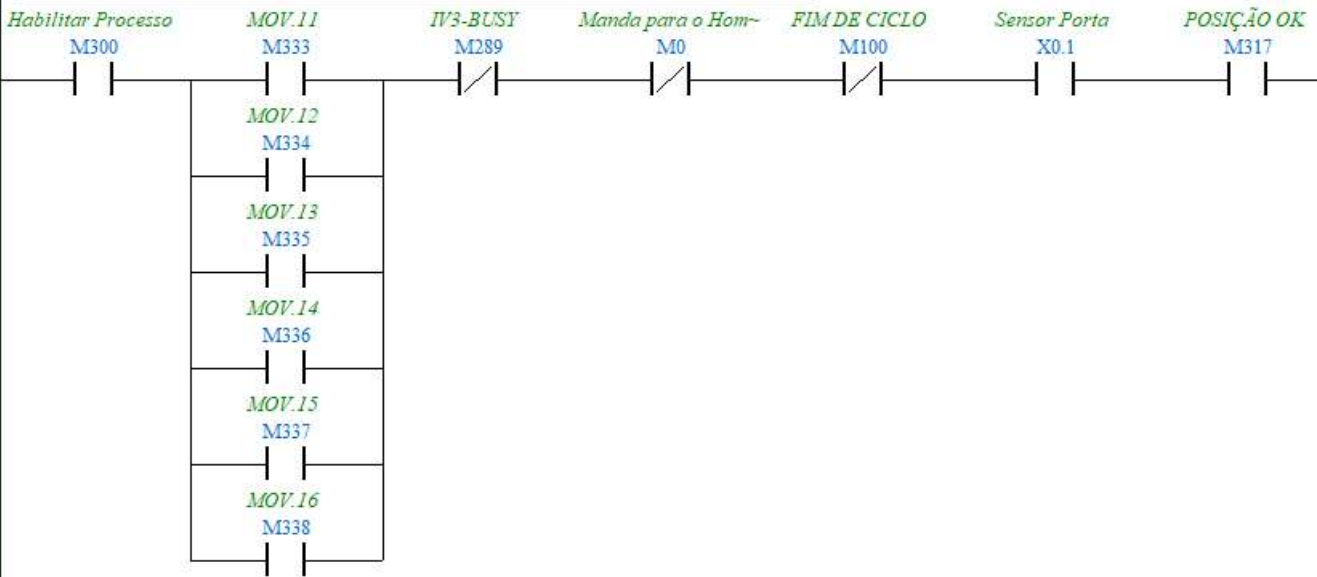
Network 33

CONTROLE AUTO



Network 34

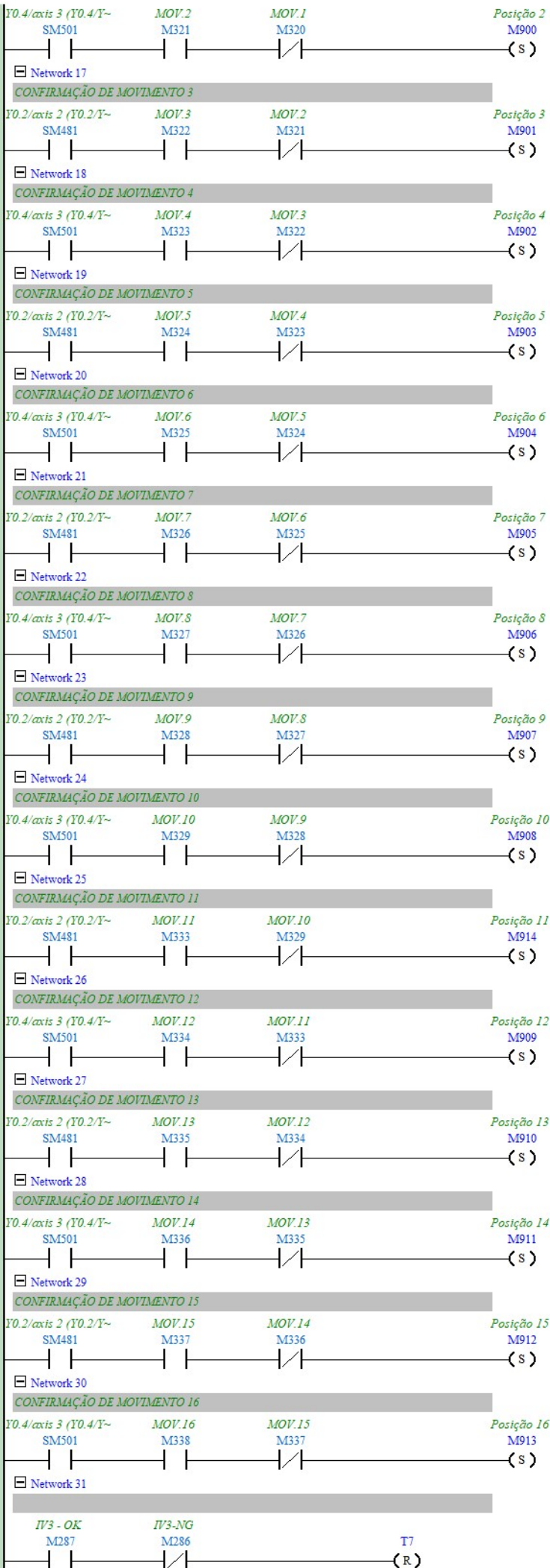
CONTROLE AUTO



MOVIMENTOS

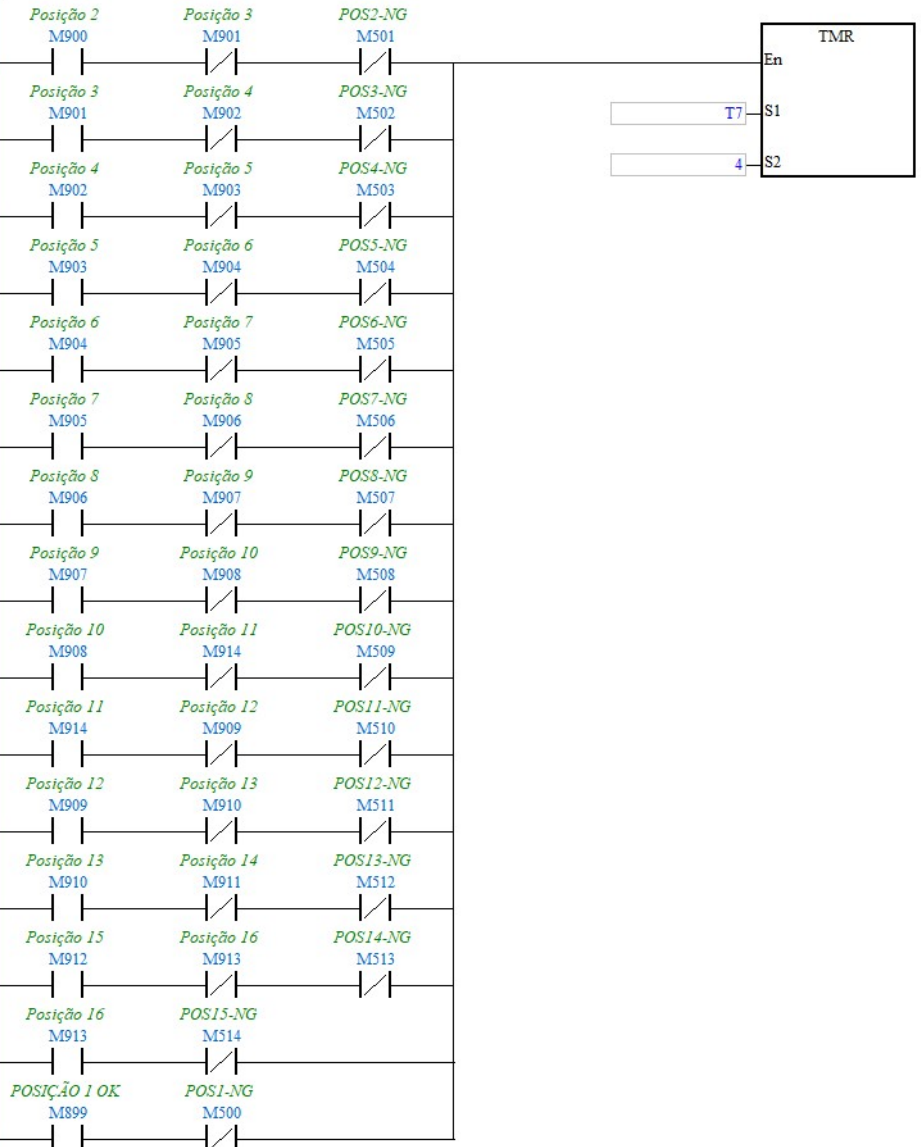
No.	Declaration Type	Identifiers	Address	Type	Initial Value	Identifier Comments
Network 1						
MOVIMENTO 2						
	MOV.1	POS2			MOV.2	
	M320	M71	T6		M321	
Network 2						
MOVIMENTO 3						
	MOV.2	POS3			MOV.3	
	M321	M72	T6		M322	
Network 3						
MOVIMENTO 4						
	MOV.3	POS4			MOV.4	
	M322	M80	T6		M323	
Network 4						
MOVIMENTO 5						
	MOV.4	POS5			MOV.5	
	M323	M81	T6		M324	
Network 5						
MOVIMENTO 6						
	MOV.5	POS6			MOV.6	
	M324	M82	T6		M325	
Network 6						
MOVIMENTO 7						
	MOV.6	POS7			MOV.7	
	M325	M83	T6		M326	
Network 7						
MOVIMENTO 8						
	MOV.7	POS8			MOV.8	
	M326	M84	T6		M327	
Network 8						
MOVIMENTO 9						
	MOV.8	POS9			MOV.9	
	M327	M85	T6		M328	
Network 9						
MOVIMENTO 10						
	MOV.9	POS10			MOV.10	
	M328	M86	T6		M329	
Network 10						
MOVIMENTO 11						
	MOV.10	POS11			MOV.11	
	M329	M87	T6		M333	
Network 11						
MOVIMENTO 12						
	MOV.11	POS12			MOV.12	
	M333	M88	T6		M334	
Network 12						
MOVIMENTO 13						
	MOV.12	POS13			MOV.13	
	M334	M89	T6		M335	
Network 13						
MOVIMENTO 14						
	MOV.13	POS14			MOV.14	
	M335	M90	T6		M336	
Network 14						
MOVIMENTO 15						
	MOV.14	POS15			MOV.15	
	M336	M91	T6		M337	
Network 15						
MOVIMENTO 16						
	MOV.15	POS16			MOV.16	
	M337	M92	T6		M338	
Network 16						
CONFIRMAÇÃO DE MOVIMENTO 2						

MOVIMENTOS

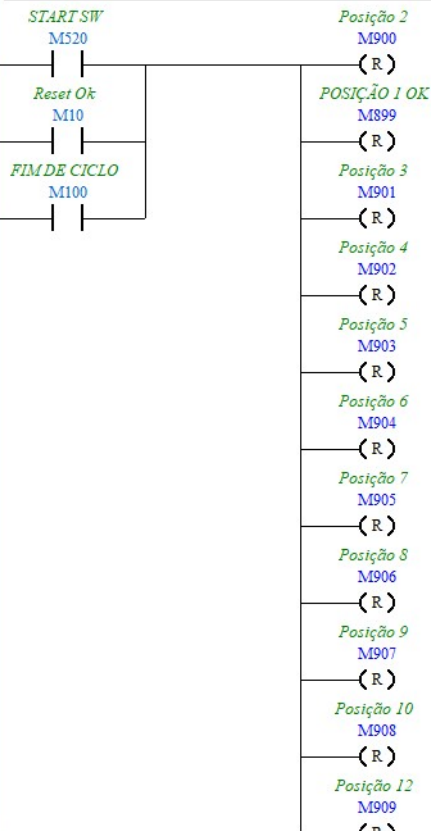


MOVIMENTOS

Network 32



Network 33

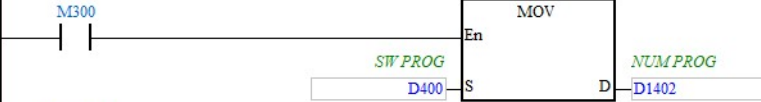




Network 34

SET DE PROGRAMA INICIAL

Habilitar Processo



Network 35



Network 36

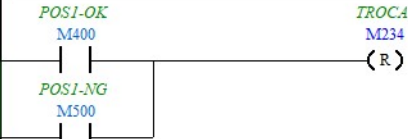
SOLICITAÇÃO DA TROCA



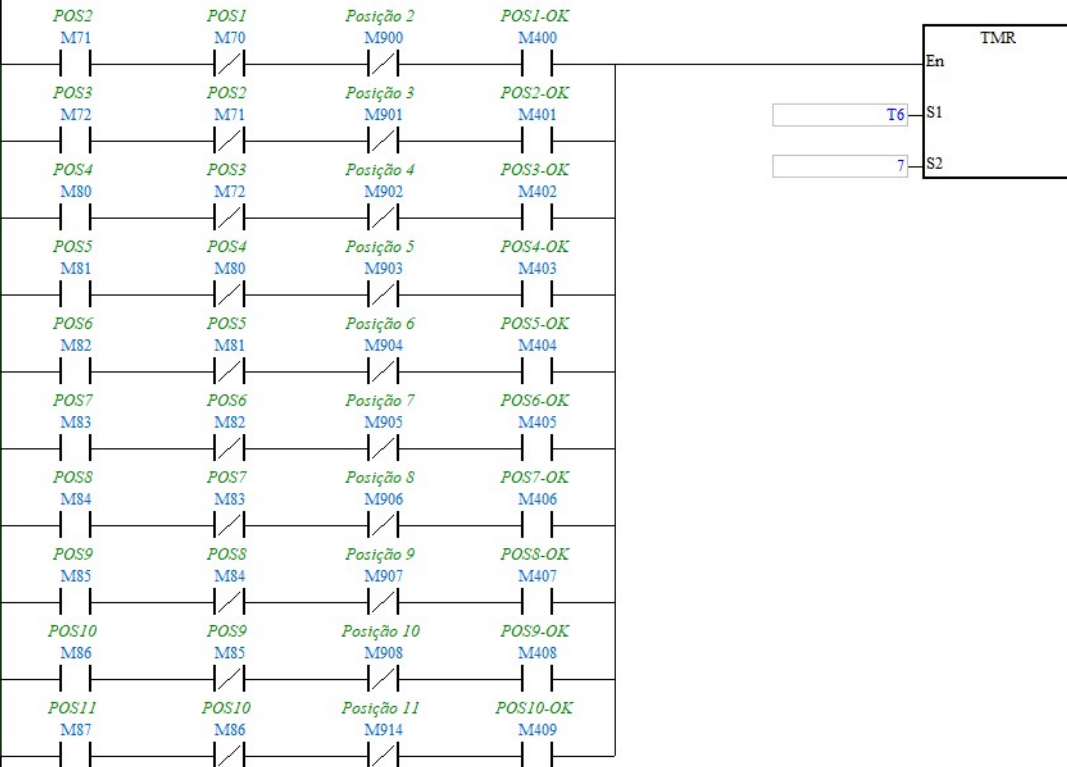
Network 37

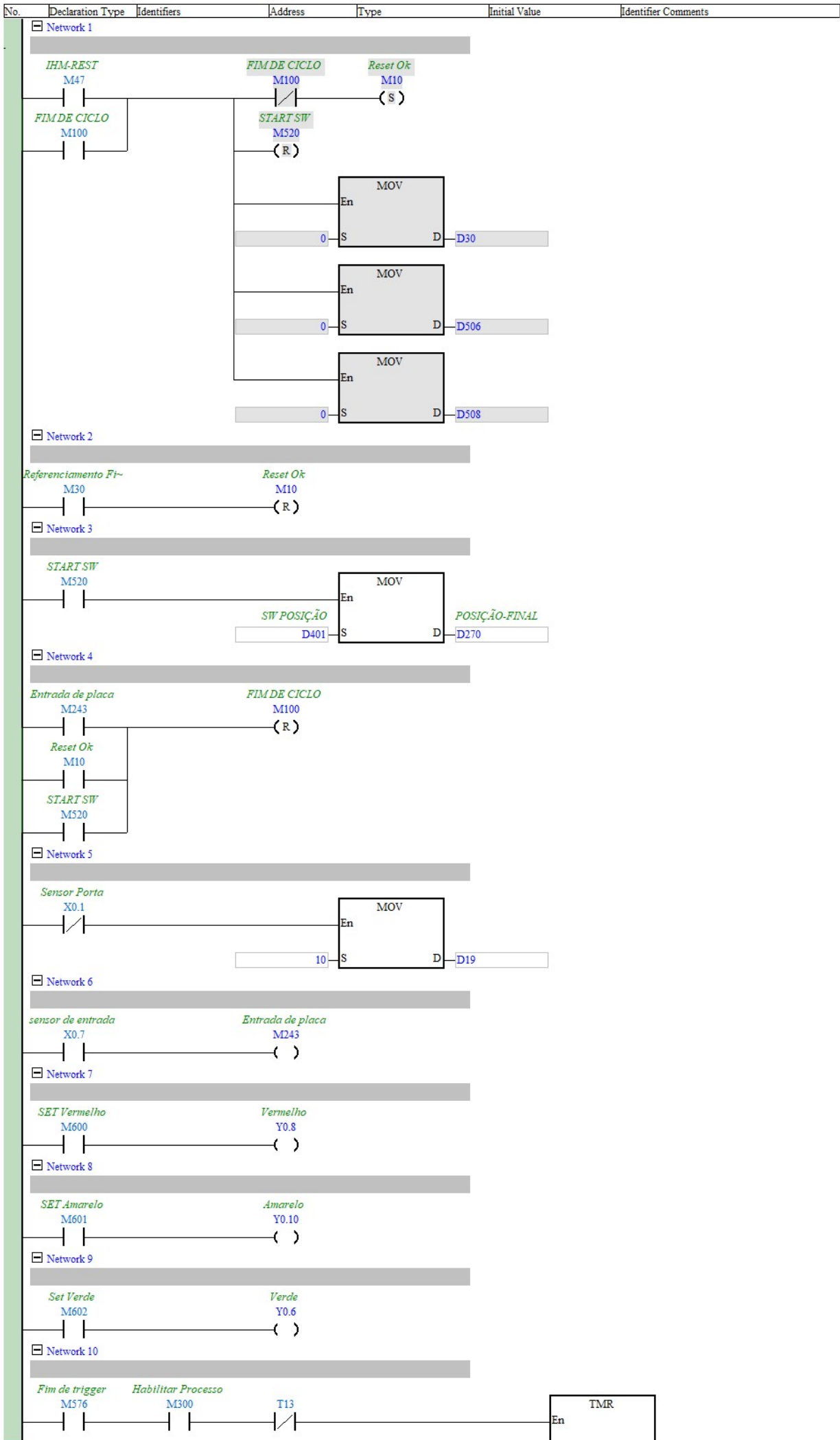


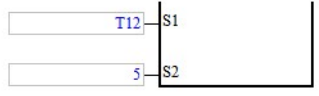
Network 38



Network 39





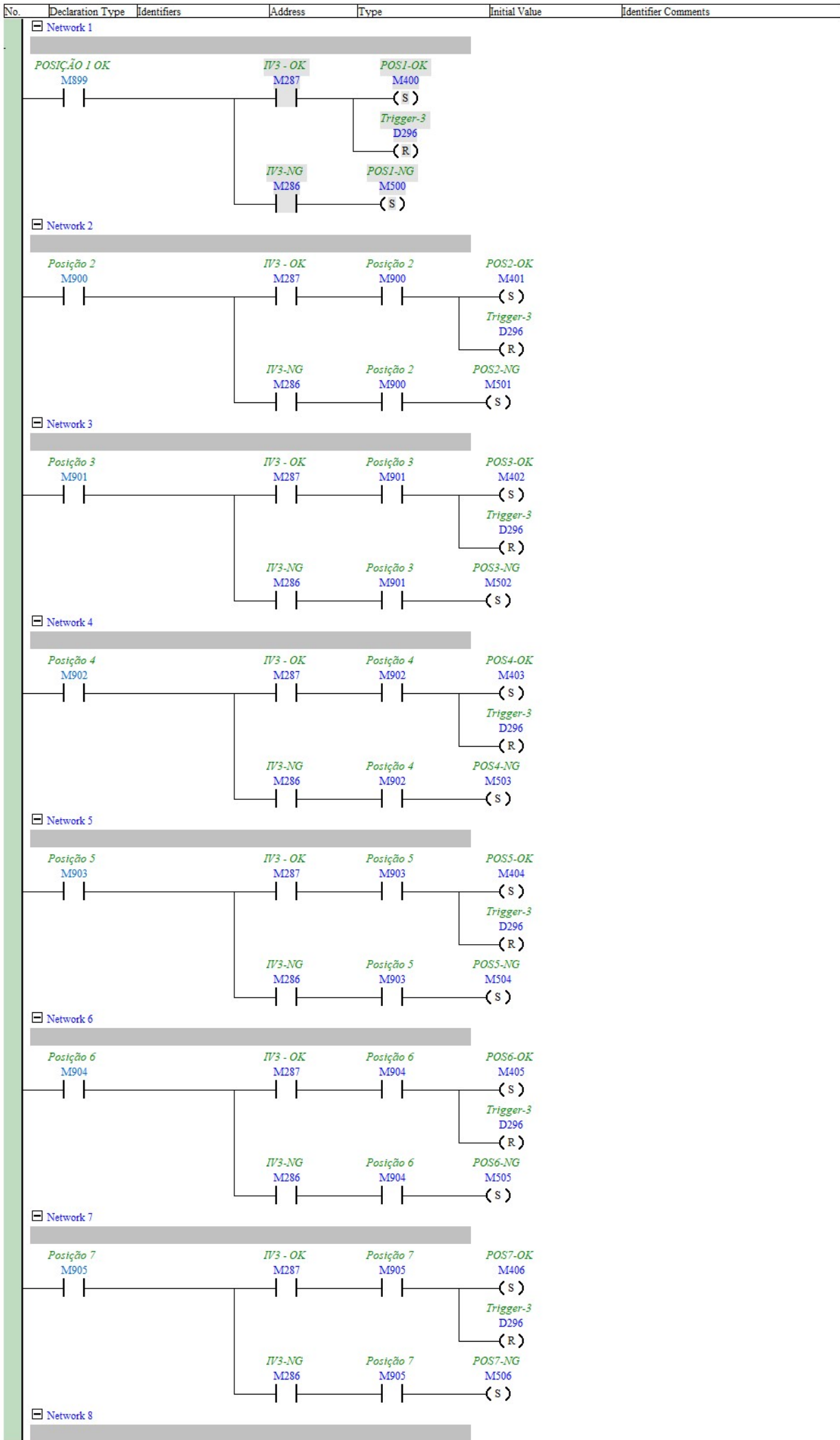


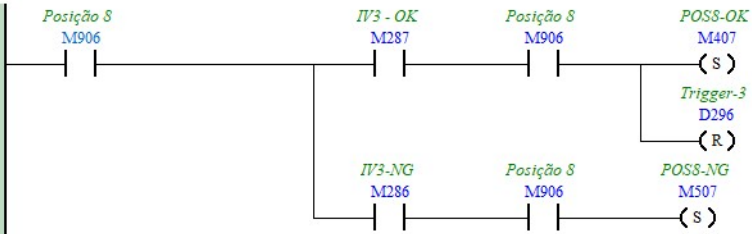
Network 11



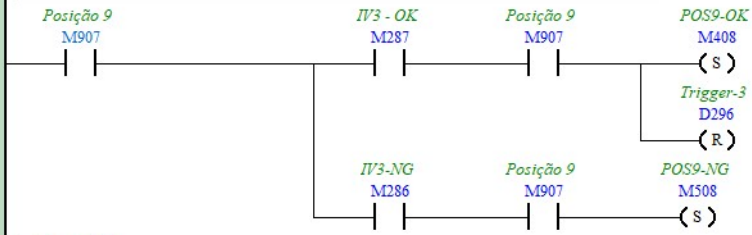
Network 12



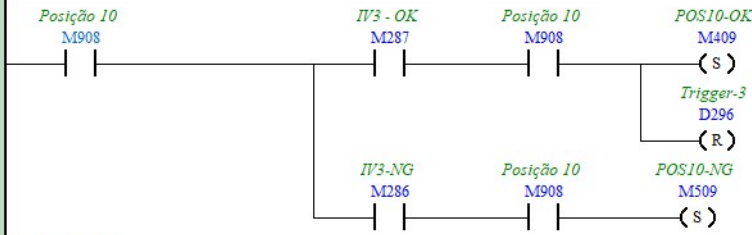




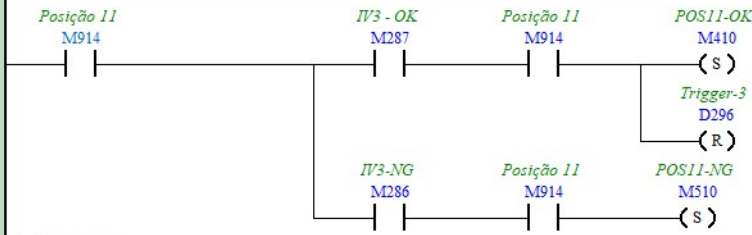
Network 9



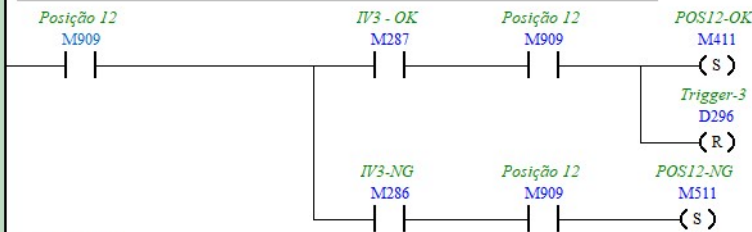
Network 10



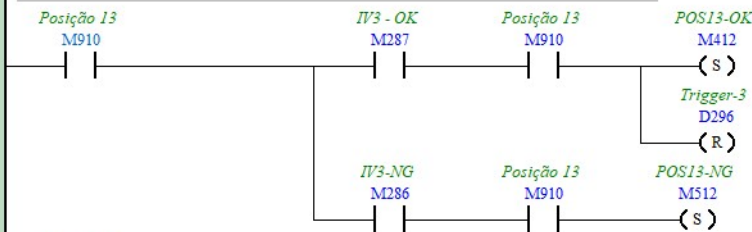
Network 11



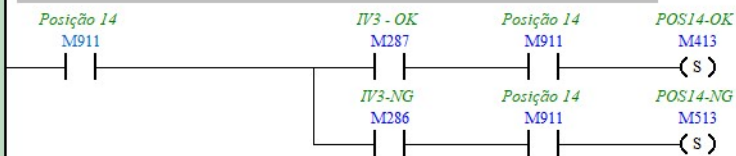
Network 12



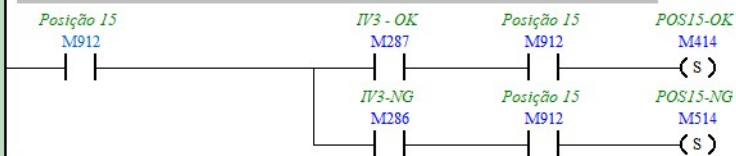
Network 13



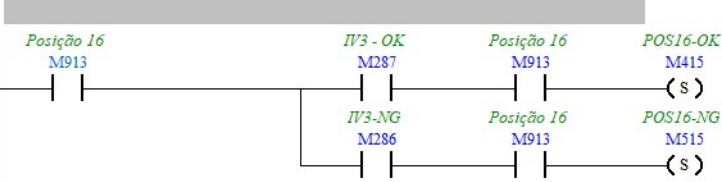
Network 14



Network 15

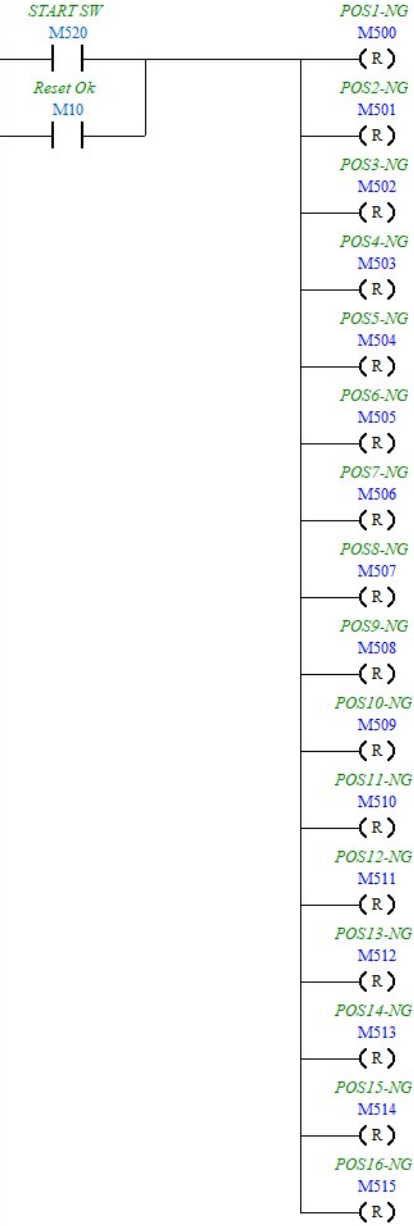


Network 16



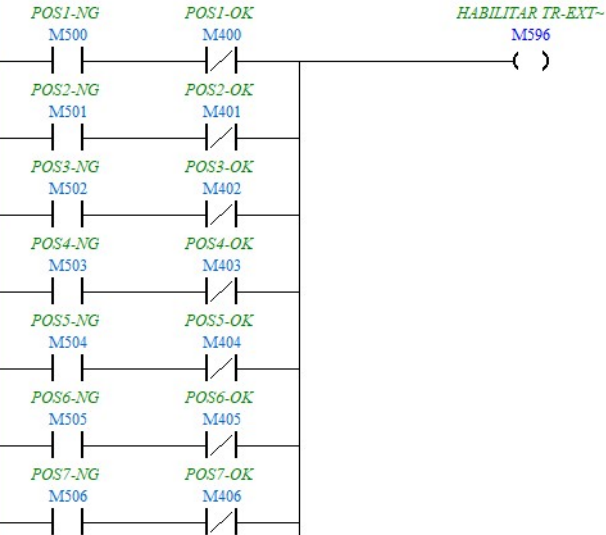
Network 17

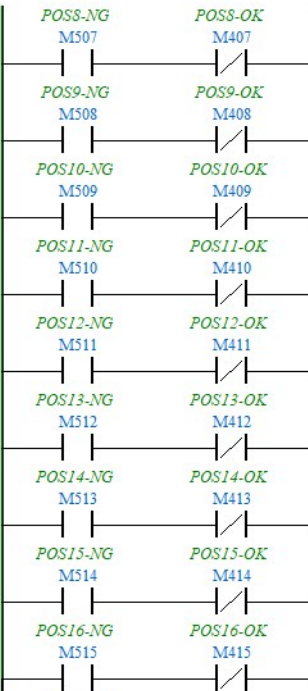
RESET NG



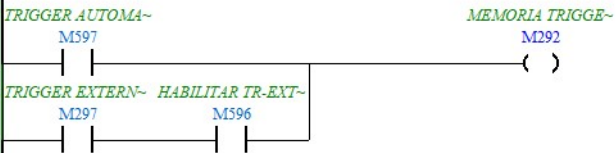
Network 18

HABILITAR TR-EXT-





Network 19



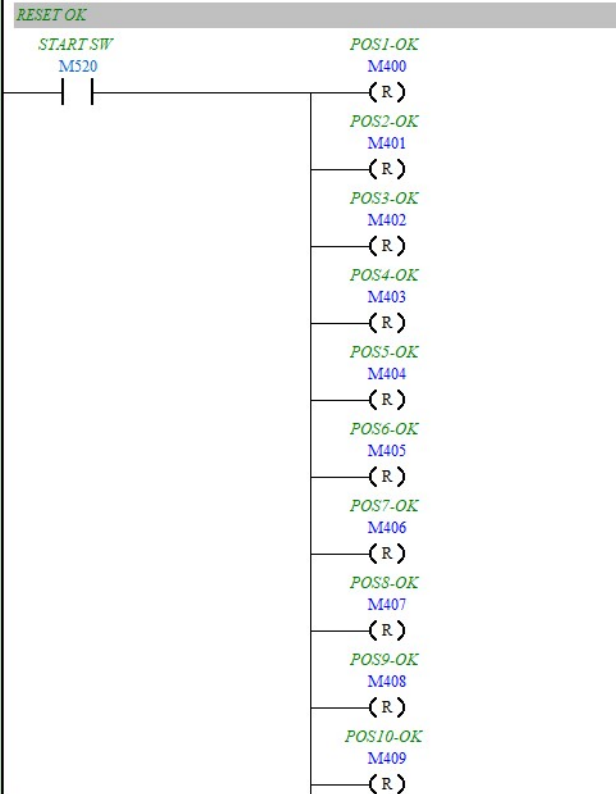
Network 20



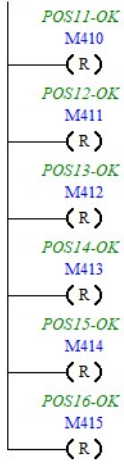
Network 21



Network 22



Network 23



Network 23



Network 24



Network 25



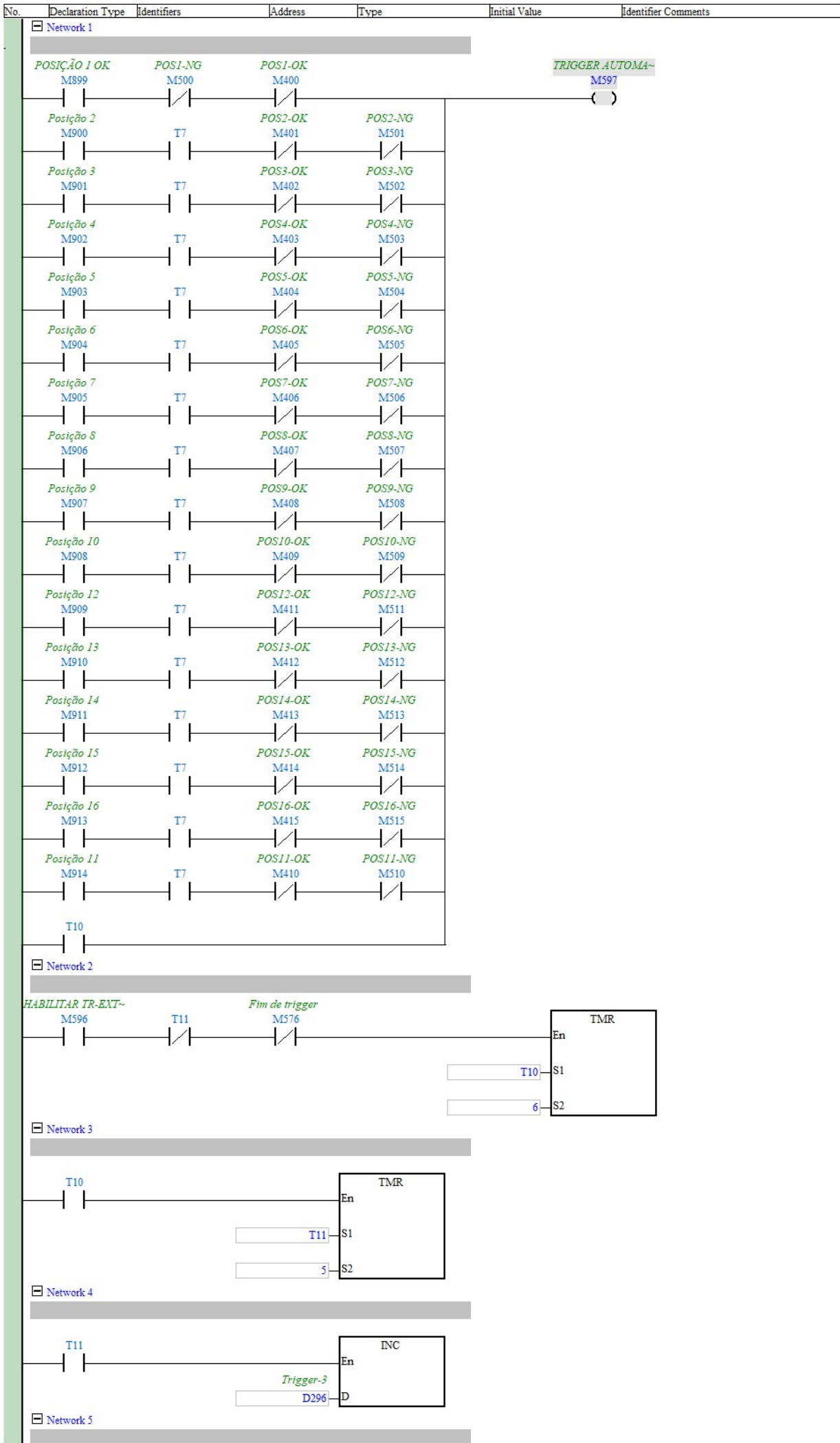
Network 26

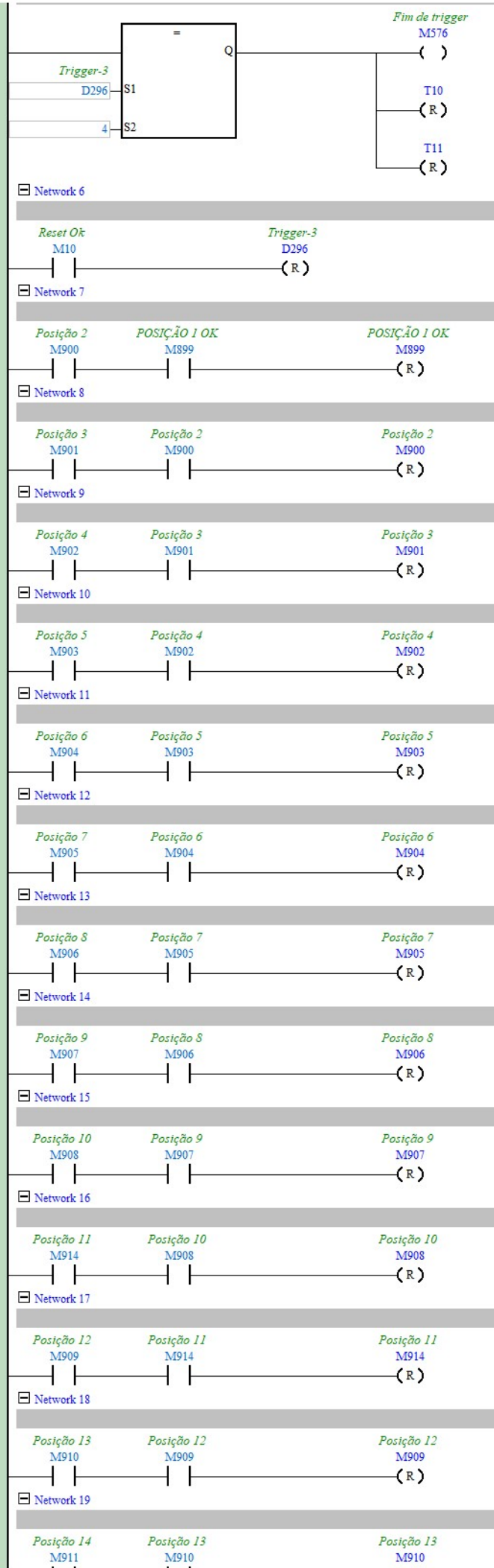


Network 27



Trigger





Trigger

