

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CARLOS ROBERTO BORGES DA COSTA JUNIOR 201611274

INDÚSTRIA 4.0 – SIMULAÇÃO SISTEMA DE TRANSPORTE

VOLTA REDONDA

2020

FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA  
CENTRO UNIVERSITÁRIO VOLTA REDONDA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

INDÚSTRIA 4.0 – SIMULAÇÃO SISTEMA DE TRANSPORTE

Trabalho sobre a aplicação de uma das tecnologias da  
Industria 4.0 projetando uma aplicação para simular um  
sistema de transporte.

Aluno:

Carlos Roberto Borges da Costa Junior 201611274

Orientador:

Prof .D.Sc. Péricles Guedes Alves

VOLTA REDONDA

2020

CARLOS ROBERTO BORGES DA COSTA JUNIOR 201611274

Indústria 4.0 – Simulação Sistema de Transporte

Simulador Sistema de Transporte.

Comissão Julgadora

---

Orientador: Prof .D.Sc. Péricles Guedes Alves

---

Examinador:

Volta Redonda, 27 de Junho de 2020

Dedico este trabalho a Deus, aos meus pais, meus familiares  
e companheiros de todas as horas.

Agradeço a Deus sobre todas as coisas, pois sem a permissão Dele nada seria possível.

Carinhosamente, também dedico este trabalho às pessoas que me acompanham desde os nossos primeiros suspiros, meus pais, eles estiveram ao meu lado durante todos os momentos e jamais deixaram de acreditar em meu potencial, me inspirando para que fosse capaz de ser como eles.

A minha esposa, familiares e amigos que acompanharam essa trajetória.

A UNIFOA e a nosso Prof<sup>o</sup> orientador Péricles Guedes Alves, obrigado pelo conhecimento passado.

*Todas as ciências estão agora sob a obrigação de preparar o terreno para a tarefa futura do filósofo, que é a de resolver o problema do valor, para determinar a verdadeira hierarquia de valores.*

*Friedrich Nietzsche*

## **RESUMO**

As primeiras três revoluções industriais são resultado da mecanização, eletricidade e tecnologia da informação, e agora a introdução da internet das coisas e serviços, como a computação em nuvem dentro do ambiente industrial, está levando o mundo para a quarta revolução industrial, chamada de Indústria 4.0. Nela, os negócios vão estabelecer redes globais incorporadas com as máquinas e equipamentos de fabricação, sistema de logística e armazenamento. As instalações produtivas vão utilizar sistemas ciber-físicos para trocar informações entre si, agir e controlar de forma autônoma e independente toda a cadeia produtiva facilitando melhorias contínuas nos processos industriais envolvidos em todo o ciclo de vida do produto e das máquinas. Dentre os pilares da Indústria 4.0 está a simulação de processos agregado a emulação de máquinas e equipamentos, que vem demonstrando muitos ganhos na sua aplicação, que vão desde o comissionamento das máquinas e equipamentos no ambiente virtual, treinamento de operação e manutenção, até teste de cenários em condições difíceis de serem analisados no mundo real.

Palavras-chave: Indústria 4.0 – Manufatura – Eficiência – Simulação

## Sumário

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>  | <b>16</b> |
| <b>2. CONCEITOS TEÓRICOS.....</b>   | <b>17</b> |
| 2.1 NASCIMENTO DA INDUSTRIA 4.0.....  | 17        |
| 2.1.1 <i>Visão</i> .....  | 18        |
| 2.1.2 <i>Produção Assíncrona</i> .....  | 18        |
| 2.1.3 <i>Analítica</i> .....  | 19        |
| 2.1.4 <i>Adoção Mundial</i> .....   | 20        |
| 2.1.5 <i>Tecnologia</i> .....   | 20        |
| 2.2 PILARES.....  | 22        |
| 2.2.1 <i>Robôs Autônomos</i> .....  | 22        |
| 2.2.2 <i>Integração de Sistemas</i> .....   | 24        |
| 2.2.3 <i>Internet das Coisas</i> .....  | 26        |
| 2.2.4 <i>Simulação</i> .....  | 27        |
| 2.2.5 <i>Impressão 3D (addictive manufacturing)</i> .....                         | 31        |
| 2.2.6 <i>Computação em Nuvem</i> .....  | 32        |
| 2.2.7 <i>Realidade Aumentada</i> .....  | 34        |
| 2.2.8 <i>Big Data</i> .....   | 35        |
| 2.2.9 <i>Segurança Cibernética</i> .....  | 37        |
| 2.3 PADRÕES (STANDARDS).....  | 38        |
| 2.3.1 <i>ISA-95 e IEC 62264: Integração Empresa com Sistema de Controle</i> ..... | 38        |
| 2.3.2 <i>RAMI 4.0</i> .....   | 39        |
| <b>3. ESTUDO DE CASO .....</b>  | <b>43</b> |
| 3.1 PROBLEMA ABORDADO E JUSTIFICATIVA .....                                       | 43        |
| 3.2 PROJETO.....  | 44        |
| 3.2.1 <i>Plataforma de Simulação</i> .....  | 44        |
| 3.2.1.1 <i>Arquitetura</i> .....  | 44        |
| 3.2.1.2 <i>Programas Utilizados</i> .....   | 45        |
| 3.2.2 <i>Processo</i> .....   | 53        |
| 3.2.3 <i>Programa de Emulação Máquina</i> .....                                   | 55        |
| 3.2.3.1 <i>Equipamentos Utilizados</i> .....                                      | 57        |
| 3.2.3.2 <i>Layout Sistema Simulado</i> .....                                      | 62        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.2.3.3   | Configuração do Emulador .....          | 64         |
| 3.2.4     | <i>Programa da Máquina</i> .....        | 66         |
| 3.2.4.1   | Estrutura de Dados .....                | 66         |
| 3.2.4.2   | Lógica .....                            | 70         |
| 3.3       | <b>SIMULAÇÃO</b> .....                  | 88         |
| 3.3.1     | <i>Coleta e Análise de dados.</i> ..... | 88         |
| 3.3.2     | <i>Cenário não otimizado.</i> .....     | 89         |
| 3.3.2.1   | Resultados Cenário não Otimizado .....  | 90         |
| 3.3.3     | <i>Cenário Otimizado</i> .....          | 93         |
| 3.3.3.1   | Resultados Cenário Otimizado.....       | 94         |
| 3.3.4     | <i>Comparação de Resultados</i> .....   | 96         |
| <b>4.</b> | <b>CONCLUSÃO</b> .....                  | <b>100</b> |
| <b>5.</b> | <b>SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....  | <b>101</b> |
| <b>6.</b> | <b>REFERENCIAS</b> .....                | <b>102</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 1: ETAPAS DAS REVOLUÇÕES INDUSTRIAIS.....                                     | 17 |
| FIGURA 2: ANALÍTICA EM PROCESSOS PRODUTIVOS.....                                     | 19 |
| FIGURA 3: MADE IN CHINA 2025 (FEITO NA CHINA 2025).....                              | 20 |
| FIGURA 4: FUNCIONAMENTO SISTEMAS CIBER-FÍSICOS.....                                  | 21 |
| FIGURA 5: EXEMPLO DE UM SISTEMA CIBER-FÍSICO.....                                    | 22 |
| FIGURA 6: ROBÔS AUTÔNOMOS AGV.....   | 23 |
| FIGURA 7: CONVERGÊNCIA IT OT.....  | 24 |
| FIGURA 8: INTERNET DAS COISAS NA INDÚSTRIA.....                                      | 26 |
| FIGURA 9: SIMULAÇÃO FABRICAÇÃO.....  | 28 |
| FIGURA 10: SIMULAÇÃO OPERAÇÃO.....   | 28 |
| FIGURA 11: DIFERENÇAS ENTRE EMULAÇÃO E SIMULAÇÃO.....                                | 29 |
| FIGURA 12: FLUXO DE PROJETO PARA DESENVOLVIMENTO DE SIMULADORES E EMULADORES.....    | 30 |
| FIGURA 13: RELAÇÃO SISTEMA REAL COM O VIRTUAL.....                                   | 31 |
| FIGURA 14: ARQUITETURA DE UM SISTEMA DE EMULAÇÃO.....                                | 31 |
| FIGURA 15: EXEMPLO MANUFATURA ADITIVA.....   | 32 |
| FIGURA 16: REALIDADE AUMENTADA.....  | 34 |
| FIGURA 17: OS TRÊS Vs DO BIG DATA.....   | 35 |
| FIGURA 18: PIRÂMIDE CLÁSSICA DA AUTOMAÇÃO (ADAPTADO ISA-95).....                     | 38 |
| FIGURA 19: RAMI 4.0, MODELO DE REFERÊNCIA DE ARQUITETURA PARA A INDÚSTRIA 4.0.....   | 40 |
| FIGURA 20: ARQUITETURA DE PROGRAMAS EMULADOR EM UM COMPUTADOR.....                   | 44 |
| FIGURA 21: TELA DE REVISÃO RSLINX CLASSIC GATEWAY.....                               | 46 |
| FIGURA 22: TELA RSLINX SELEÇÃO CONFIGURE DRIVERS.....                                | 46 |
| FIGURA 23: TELA RSLINX ADICIONAR DRIVER VIRTUAL BACKPLANE (SOFTLOGIX58XX, USB).....  | 47 |
| FIGURA 24: TELA RSLINX CONFIGURE VIRTUALBACKPLANE.....                               | 47 |
| FIGURA 25: TELA RSLINX VERIFICAÇÃO DE STATUS.....                                    | 47 |
| FIGURA 26: TELA SOFTLOGIX CREATE MODULE E SELECT MODULE.....                         | 48 |
| FIGURA 27: TELA SOFTLOGIX CONFIGURAÇÕES DA CPU.....                                  | 49 |
| FIGURA 28: TELAS SOFTLOGIX ADICIONAR CARTÃO DE COMUNICAÇÃO ETHERNET.....             | 49 |
| FIGURA 29: TELA RSLINX RSWHO -1, VISUALIZAÇÃO RACK VIRTUAL.....                      | 50 |
| FIGURA 30: ARQUITETURA DO PROGRAMA DE CLP NO LOGIX DESIGNER.....                     | 51 |
| FIGURA 31: LAYOUT DA PRODUÇÃO DE SUBPRODUTOS, ARMAZÉNS E PRODUÇÃO DE PRODUTOS.....   | 53 |
| FIGURA 32: EXEMPLOS DE CENAS DISPONÍVEIS NO FACTORY I/O.....                         | 55 |
| FIGURA 33: EXEMPLOS DA BIBLIOTECA DE SUBCONJUNTOS E DISPOSITIVOS DO FACTORY I/O..... | 55 |
| FIGURA 34: MATERIA PRIMA UTILIZADA DO EMULADOR FACTORY I/O.....                      | 57 |
| FIGURA 35: PROGRAMA FACTORY I/O, ESTEIRA TRANSPORTADORA DE 2 METROS.....             | 57 |
| FIGURA 36: PROGRAMA FACTORY I/O, ESTEIRA TRANSPORTADORA DE 4 METROS.....             | 58 |
| FIGURA 37: PROGRAMA FACTORY I/O, ESTEIRA TRANSPORTADORA DE 6 METROS.....             | 58 |

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 38: PROGRAMA FACTORY I/O, ESTEIRA TRANSPORTADORA CURVA.....                                  | 58 |
| FIGURA 39: PROGRAMA FACTORY I/O, MÁQUINA CENTRO DE USINAGEM.....                                    | 59 |
| FIGURA 40: PROGRAMA FACTORY I/O, EMISSOR DE PRODUTO.....  | 60 |
| FIGURA 41: PROGRAMA FACTORY I/O, REMOVEDOR DE PRODUTO.....  | 60 |
| FIGURA 42: PROGRAMA FACTORY I/O, ELEVADOR.....  | 61 |
| FIGURA 43: PROGRAMA FACTORY I/O, SENSOR PRESENÇA DE PEÇAS.....                                      | 61 |
| FIGURA 44: PROGRAMA FACTORY I/O, MESA CRUZADA.....  | 61 |
| FIGURA 45: LAYOUT DO SISTEMA DE PRODUÇÃO NO EMULADOR.....   | 62 |
| FIGURA 46: VISÃO DAS MÁQUINAS, EQUIPAMENTOS E ELEVADOR EM PERSPECTIVA NO SIMULADOR.....             | 62 |
| FIGURA 47: DETALHE DA LINHA 1 NO EMULADOR.....  | 63 |
| FIGURA 48: DETALHE DA LINHA 2 NO EMULADOR.....  | 63 |
| FIGURA 49: DETALHE DA LINHA 3 NO EMULADOR.....  | 63 |
| FIGURA 50: DETALHE DA LINHA FINAL NO EMULADOR.....  | 63 |
| FIGURA 51: CONFIGURAÇÕES DE COMUNICAÇÃO UTILIZADAS NO EMULADOR.....                                 | 64 |
| FIGURA 52: ALOCAÇÃO ENDEREÇOS DE MEMÓRIA DOS SENSORES E ATUADORES DO EMULADOR.....                  | 65 |
| FIGURA 53: EXEMPLO ENDEREÇOS DE MEMÓRIA DECLARADOS NO PROJETO DO CLP.....                           | 69 |
| FIGURA 54: ROTINAS DECLARADAS NO PROGRAMA DE DESENVOLVIMENTO LOGIX DESIGNER.....                    | 75 |
| FIGURA 55: DEMONSTRAÇÃO TROCA DE INFORMAÇÕES ENTRE AS ESTEIRAS.....                                 | 76 |
| FIGURA 56: PROGRAMA DE SEQUENCIAMENTO DA MESA DE ENTRADA.....                                       | 77 |
| FIGURA 57: PROGRAMA DE SEQUENCIAMENTO DA MÁQUINA DE USINAGEM.....                                   | 78 |
| FIGURA 58: CONTINUAÇÃO PROGRAMA DE SEQUENCIAMENTO DA MÁQUINA DE USINAGEM.....                       | 79 |
| FIGURA 59: PROGRAMA DE SEQUENCIAMENTO DA ESTEIRA DE SAÍDA.....                                      | 80 |
| FIGURA 60: PROGRAMA DE SEQUENCIAMENTO DA ESTEIRA CURVA.....   | 81 |
| FIGURA 61: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA ESTEIRA DE ACÚMULO.....   | 82 |
| FIGURA 62: DETALHE DA PARTE DE PROGRAMA #1 DA ESTEIRA DE ACUMULO.....                               | 83 |
| FIGURA 63: DETALHE DA PARTE DE PROGRAMA #2 DA ESTEIRA DE ACUMULO.....                               | 83 |
| FIGURA 64: DETALHE DA PARTE DE PROGRAMA #3 DA ESTEIRA DE ACUMULO.....                               | 84 |
| FIGURA 65: DIAGRAMA SIMPLIFICADO DA MESA CRUZADA.....   | 85 |
| FIGURA 66: DETALHE DA PARTE DE PROGRAMA #1 DA MESA CRUZADA.....                                     | 86 |
| FIGURA 67: DETALHE DA PARTE DE PROGRAMA #2 DA MESA CRUZADA.....                                     | 86 |
| FIGURA 68: DETALHE DA PARTE DE PROGRAMA #3 DA MESA CRUZADA. FONTE: AUTOR (2020).....                | 86 |
| FIGURA 69: PROGRAMA DE SEQUENCIAMENTO DO ELEVADOR.....  | 87 |
| FIGURA 70: DEMONSTRAÇÃO DE PRODUTOS INTERCALADOS NO EMULADOR.....                                   | 89 |
| FIGURA 71: PROGRAMA EM LADDER PARA HABILITAR/DESABILITAR MEMÓRIAS DE SEQUÊNCIA.....                 | 90 |
| FIGURA 72: GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS MÁQUINAS DE USINAGEM NO CENÁRIO NÃO OTIMIZADO..... | 91 |
| FIGURA 73: GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS NO CENÁRIO NÃO OTIMIZADO.....            | 91 |
| FIGURA 74: GRÁFICO COMPORTAMENTO DE ENCHIMENTO DOS ARMAZÉNS NO CENÁRIO NÃO OTIMIZADO.....           | 92 |

|  |    |
|--|----|
| FIGURA 75: SOBREPOSIÇÃO GRÁFICOS DE EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS E ENCHIMENTO DOS ARMAZÉNS NO CENÁRIO NÃO OTIMIZADO..... | 92 |
| FIGURA 76: GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA DAS MÁQUINAS DE USINAGEM NO CENÁRIO OTIMIZADO.....                      | 94 |
| FIGURA 77: GRÁFICO DE EVOLUÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS NO CENÁRIO OTIMIZADO. ....                                | 95 |
| FIGURA 78: GRÁFICO COMPORTAMENTO DE ENCHIMENTO DOS ARMAZÉNS NO CENÁRIO OTIMIZADO. ....                               | 95 |
| FIGURA 79: SOBREPOSIÇÃO GRÁFICOS DE EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS E ENCHIMENTO DOS ARMAZÉNS NO CENÁRIO OTIMIZADO. ....    | 96 |
| FIGURA 80: COMPARAÇÃO EFICIÊNCIA PROCESSO 1 NOS CENÁRIOS NÃO OTIMIZADO E OTIMIZADO. ....                             | 97 |
| FIGURA 81: COMPARAÇÃO EFICIÊNCIA PROCESSO 2 NOS CENÁRIOS NÃO OTIMIZADO E OTIMIZADO. ....                             | 97 |
| FIGURA 82: COMPARAÇÃO EFICIÊNCIA PROCESSO 3 NOS CENÁRIOS NÃO OTIMIZADO E OTIMIZADO. ....                             | 97 |
| FIGURA 83: COMPARAÇÃO ENCHIMENTO ARMAZÉM 1 NOS CENÁRIOS NÃO OTIMIZADO E OTIMIZADO.....                               | 98 |
| FIGURA 84: COMPARAÇÃO ENCHIMENTO ARMAZÉM 2 NOS CENÁRIOS NÃO OTIMIZADO E OTIMIZADO.....                               | 98 |
| FIGURA 85: COMPARAÇÃO ENCHIMENTO ARMAZÉM 3 NOS CENÁRIOS NÃO OTIMIZADO E OTIMIZADO.....                               | 99 |

**LISTA DE TABELAS**

|   |    |
|---|----|
| TABELA 1: CONSIDERAÇÕES PARA USO TAREFAS, PROGRAMAS E ROTINAS NO CONTROLLOGIX. .... | 52 |
| TABELA 2: DRIVERS DISPONÍVEIS PARA COMUNICAÇÃO DO FACTORY I/O. ....                 | 56 |
| TABELA 3: ESTRUTURA DE DADOS ELEVADOR. ....   | 66 |
| TABELA 4: ESTRUTURA DE DADOS ESTEIRA. ....  | 67 |
| TABELA 5: ESTRUTURA DE DADOS MÁQUINAS. ....   | 67 |
| TABELA 6: ESTRUTURA DE DADOS MESA CRUZADA. ....                                     | 68 |
| TABELA 7: ESTRUTURA DE DADOS PRODUÇÃO. ....   | 68 |
| TABELA 8: ESTRUTURA DE DADOS LINHA. ....  | 69 |
| TABELA 9: EXEMPLO ORGANIZAÇÃO COLETA DE DADOS DE PRODUÇÃO DO CLP. ....              | 88 |
| TABELA 10: RESULTADOS CENÁRIO NÃO OTIMIZADO. ....                                   | 90 |
| TABELA 11: CONDIÇÕES SELEÇÃO PRIORIDADE NA MESA CRUZADA. ....                       | 93 |
| TABELA 12: RESULTADOS CENÁRIO OTIMIZADO. ....                                       | 94 |
| TABELA 13: COMPARAÇÃO EFICIÊNCIA PERÍODO DE 12 HORAS. ....                          | 96 |
| TABELA 14: OCUPAÇÃO MÉDIA PERÍODO DE 12 HORAS. ....                                 | 98 |

**LISTA DE SIGLAS**

|      |  |
|------|--|
| 3D   | – Terceira dimensão                          |
| AGV  | – Automated Guided Vehicle                   |
| CAD  | – Computer-Aided Design                      |
| CNC  | – Computer Numeric Control                   |
| CLP  | – Controlador Lógico Programável             |
| CPPS | – Cyber Physical Production System           |
| CPS  | – Cyber-Physical Systems                     |
| CPU  | – Central Processing Unit                    |
| DA   | – Data Access                                |
| DCS  | – Distributed Control System                 |
| DDE  | – Dynamic Data Exchange                      |
| ERP  | – Enterprise Resource Planning               |
| GB   | – Giga Byte                                  |
| ICS  | – Internet Connection Sharing                |
| IEC  | – International Electrotechnical Commission  |
| IHM  | – Interface Homem Máquina                    |
| IIoT | – Industrial Internet of Things              |
| IIRA | – Industrial Internet Reference Architecture |
| IoT  | – Internet of Things                         |
| ISA  | – International Security Alliance            |
| IT   | – Information Technology                     |
| JSR  | – Jump to Subroutine                         |
| LED  | – Light-Emitting Diode                       |
| OLE  | – Object Linking and Embedding               |
| OPC  | – OLE for Process Control                    |
| OT   | – Operation Technology                       |
| OTL  | – Output Latch                               |
| OTU  | – Output Unlatch                             |
| PAC  | – Programmable Automation Controller         |
| PC   | – Personal Computer                          |
| PLC  | – Programmable Logic Controllers             |
| RAMI | – Reference Architectural Model Industry     |

|       |  |
|-------|--|
| RFID  | – Radio-Frequency IDentification                             |
| SAP   | – Systeme, Anwendungen und Produkte in der Datenverarbeitung |
| SCADA | – Supervisory Control and Data Acquisition                   |
| SFC   | – Sequencial Function Chart                                  |
| SSD   | – Solid State Drives   |
| TCC   | – Trabalho de Conclusão de Curso                             |
| UA    | – Unified Architecture                                       |
| USB   | – Universal Serial Bus                                       |
| VBA   | – Visual Basic for Applications                              |
| VSM   | – Value Stream Mapping                                       |

## 1. INTRODUÇÃO

Industria 4.0 é a automação total entre a informação do negócio e a execução da produção para melhorar a indústria com a integração de todos os aspectos de produção e comércio até os limites da empresa proporcionando uma melhor eficiência. O termo Industria 4.0 teve origem na Alemanha e está em harmonia com iniciativas ao redor do mundo incluindo as fábricas inteligentes, internet das coisas, produção inteligente e produção avançada, se refere a ideia da quarta revolução industrial, onde a primeira foi a produção mecanizada usando água e vapor, a segunda a produção em massa com as linhas em série criadas por Ford, a terceira que foi a revolução digital com o uso em larga escala de sistemas automatizados e a quarta com os Sistemas Ciber Físicos (CPS), computação embarcada e internet das coisas (KAGERMANN, H et al).

De acordo com Kagermann, H et al. (2013) em uma visão geral, a Industria 4.0 irá melhorar a produtividade, eficiência e o autogerenciamento da produção, onde pessoas, máquinas, equipamentos, sistemas logísticos e componentes do processo se comunicam e cooperam diretamente entre si. O maior objetivo é a aplicação de medidas eficientes de produção em massa de baixo custo para conseguir a produção make-to-order (sob encomenda) utilizando o processamento embarcado e comunicação em todos os níveis. Produção e logística serão integrados inteligentemente através dos limites da empresa, criando um ecossistema lean manufacturing (produção enxuta) com troca de dados e tomada decisões em tempo real. Isto irá facilitar as cadeias de criação de valor (Value Stream Mapping – VSM) que incluem todo o ciclo de vida do produto da ideia inicial, desenvolvimento, produção, uso e manutenção até a reciclagem. Desta forma, este ecossistema pode se beneficiar dos anseios do consumidor para tudo, desde a ideia do produto até sua reciclagem, sendo assim responsável e progredindo continuamente.

A quarta revolução industrial se baseia em nove pilares que são: os robôs autônomos, a integração de sistemas, internet das coisas, simulação, impressão 3D (Additive Manufacturing), computação em nuvem, realidade aumentada, Big data e a cyber segurança. Os padrões atuais da indústria como a ISA 95 e IEC 62264 que são os modelos de arquitetura de sistema amplamente difundidos e aplicados, não atendem completamente toda a interconectividade dos sistemas na Industria 4.0, então o RAMI 4.0 (Modelo de Arquitetura de Referência) e o IIRA (Arquitetura de Referência para Internet Industrial) são os padrões que garantem a comunicação e cooperação direta dos sensores, controladores, pessoas, máquinas, equipamentos, sistemas logísticos e produtos.

## 2. CONCEITOS TEÓRICOS

Nas próximas seções serão introduzidos os conceitos teóricos a Indústria 4.0 desde o nascimento até os padrões já divulgados e utilizados pela indústria.

Em relação aos termos utilizados entre Manufatura (Manufacturing) e Produção (Production), é sabido que há uma diferença entre eles, porém como o intuito deste trabalho não é a análise da cadeia produtiva e sim as tecnologias utilizadas, foi escolhido o termo Produção para se referir tanto a manufatura quanto a produção.

### 2.1 NASCIMENTO DA INDÚSTRIA 4.0

A iniciativa da Indústria 4.0 começou em 2006 com um dos dez itens do plano estratégico alemão para desenvolvimento de alta tecnologia. Continuando com este plano em julho 2010 o governo apresentou um plano estratégico 2020 de alta tecnologia para a Alemanha (the High-Tech Strategy 2020 for Germany) a qual introduz novas ênfases para o crescimento da pesquisa e inovação alemã. Com isso o conceito da Indústria 4.0 se solidificou com a visão de uma indústria integrada, implementada por tecnologias de computação, programas e Internet (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production). O termo 4.0 se refere a ideia da quarta revolução industrial (figura 1), onde:

- Primeira Revolução Industrial: Produção mecanizada usando água e vapor.
- Segunda Revolução Industrial: Produção em massa (Henry Ford frequentemente citado como o inovador)
- Terceira Revolução Industrial: Revolução digital (Exemplos: máquinas de controle numérico, programador lógico programável, controle digital e sistemas de planejamento e recursos)
- Quarta Revolução Industrial: A indústria 4.0 alavanca tecnologias como os Sistemas Ciber-Físicos (cyber-physical systems - CPS), computação embarcada e internet das coisas.



Figura 1: Etapas das revoluções industriais.

Fonte: <http://www.abgam.es/dilema-digitalizacion-empresarial/>, acesso Maio/2020.

A estratégia alemã enfatiza a cooperação entre a indústria e a ciência para criar vínculos entre o conhecimento e habilidades, também o uso de tecnologias como a internet das coisas e serviços de WEB diretamente aplicados em toda a cadeia da produção industrial. Eles tornaram isto possível criando redes de comunicação incorporando todo o processo de fabricação, convertendo fábricas em ambientes inteligentes, que incluem máquinas inteligentes, sistema de logística e instalações que formam uma integração de ponta a ponta, incluindo a logística de entrada, produção, marketing, logística de saída e serviços. A Indústria 4.0 é projetada para criar uma cooperação mútua e muito próxima entre os diferentes atores no negócio (como os fornecedores e clientes) e entre os empregados, fornecendo novas oportunidades e visando um benefício mútuo (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).

### 2.1.1 Visão

A Indústria 4.0 visa o aumento significativo da produtividade, eficiência e autogerenciamento dos processos produtivos, onde pessoas, máquinas, equipamentos e sistemas de logística se comunicam e cooperam diretamente entre si. O principal objetivo é a diminuição dos custos de produção em massa e alcançar uma produção sob demanda. Com isso a produção e a logística são integrados inteligentemente até os limites da empresa, criando um ecossistema de produção enxuto (Lean Manufacturing) em tempo real, mais eficiente e flexível. Isto irá melhorar a cadeia de valor incluindo todo o ciclo de vida do produto desde a ideia inicial, desenvolvimento, produção, uso, manutenção e reciclagem (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).

As empresas na cadeia de suprimentos se comunicam através de redes tornando possível a otimização de cada etapa do processo produtivo. Por exemplo, através da troca de dados em tempo real uma empresa pode reagir e intervir no processo produtivo utilizando dados como a disponibilidade e preço da matéria prima dentre outros fatores, podendo assim otimizar a produção economizando recursos e energia (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).

A digitalização da indústria é imprescindível para estes novos modelos de negócio e podem apresentar oportunidades para empresas de pequeno e médio porte, visto que estas empresas fornecem para as grandes companhias.

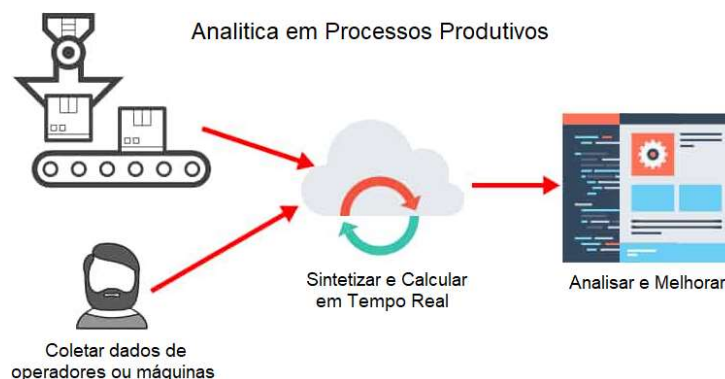
### 2.1.2 Produção Assíncrona

Geralmente as linhas de produção são síncronas, com fluxos de trabalho e planejamento de produção pré-definidos, pois são baseados em ordens de trabalhos vindos dos sistemas de

gerenciamento de negócio da empresa. As etapas de produção são centralizadas e sua comunicação está sincronizada com a sequência da linha de produção. A Indústria 4.0 é baseada na produção assíncrona, os componentes do fluxo de produção usam uma tecnologia de auto identificação para informar cada máquina e operador o que deve ser feito para produzir e customizar o produto final em cada etapa do processo produtivo, as máquinas têm que ser flexíveis para se adaptar as exigências do produto ou parte dele. Assim o processo produtivo é muito mais flexível, enxuto e ágil sendo possível a produção de diferentes produtos na mesma instalação industrial. A capacidade de produzir pequenos lotes, ou mesmo itens únicos com máquinas que se configuram rapidamente tornam o processo de produção em massa muito mais rentável e que atende as necessidades do consumidor (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).

### 2.1.3 Analítica

Nos sistemas da Indústria 4.0 uma grande e variada quantidade de dados pode ser usada para melhorar a performance e a produtividade aplicando técnicas de Analítica, que é uma ciência para analisar dados não processados (vindo de sensores por exemplo) criando informações que podem ser usadas na tomada de decisões e controle de variados processos e etapas de produção. A Analítica (figura 2) é usada de várias formas, incluindo na manutenção preditiva em tempo real, com isso problemas podem ser antecipados e paradas de produção por defeitos ou quebras são evitados, melhorando a disponibilidade dos equipamentos e por consequência a performance dos processos produtivos (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).



**Figura 2: Analítica em processos produtivos.**

Fonte: <https://www.sensrtrx.com/what-is-manufacturing-analytics/>, acesso Maio/2020.

### 2.1.4 Adoção Mundial

A iniciativa alemã sobre o conceito da Indústria 4.0 influenciou a forma de pensar no mundo, inclusive com outras iniciativas e esforços coordenados. Segue abaixo algumas delas.

A **China** em 2015 adotou o conceito da quarta revolução industrial como parte de um plano de 10 anos chamado “Made in China 2025” (Feito na China 2025) ilustrado na figura 3, uma iniciativa para revolucionar a indústria chinesa com o objetivo de alcançar o avanço alemão com grandes instalações industriais e a vantagem de ter custos de mão-de-obra menores. O plano foca em 10 setores incluindo maquinário de usinagem com alto acabamento, robôs, equipamento aeroespacial, energia renovável, carros e biomedicina (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).

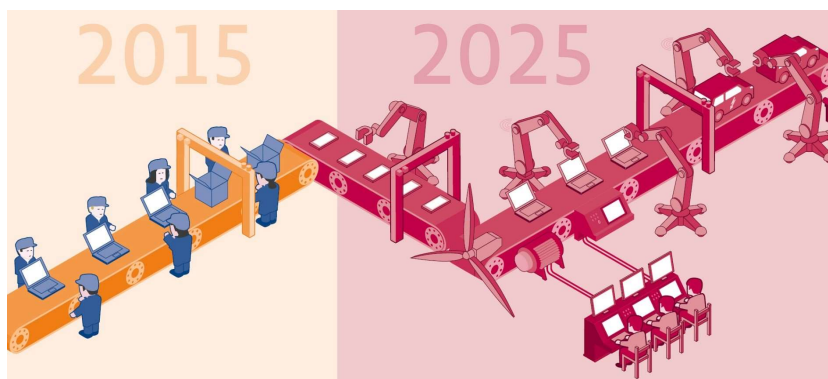


Figura 3: Made in China 2025 (Feito na China 2025)

Fonte: <https://www.faz.net/aktuell/wirtschaft/infografik-made-in-china-2025-15936600.html>, acesso Maio/2020.

Devido a produção industrial no **Japão** contar com uma grande produção doméstica, empresas japonesas e organizações, incluindo os ministérios da economia, comércio e indústria, estão se voltando para as tecnologias na Internet das Coisas e conceitos da Indústria 4.0 como parte de sua iniciativa estratégica na cadeia de valor industrial para a produção no futuro.

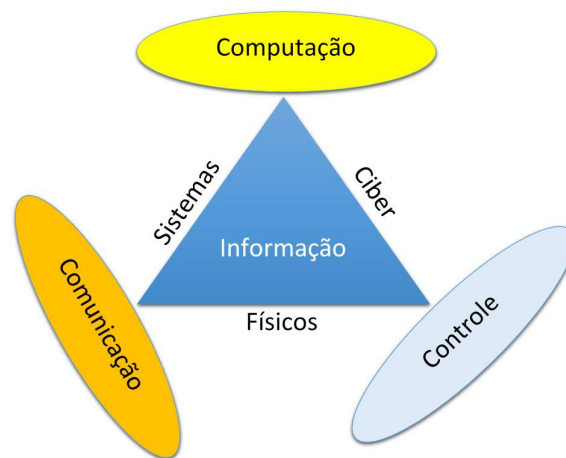
Na **Índia** o programa “Make in India” (Fazer na Índia) foi lançado pelo primeiro ministro Narendra Modi em 25 de setembro de 2014, com o objetivo de promover o crescimento da Índia na produção industrial. “Make in Índia” é uma iniciativa do governo indiano para encorajar multinacionais a produzir produtos na Índia (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).

### 2.1.5 Tecnologia

A implementação da Indústria 4.0 está se tornando possível com o uso de tecnologias como a Internet das Coisas e o uso de plataformas de softwares livres, protocolos de dados

abertos, modelos de dados livres (Open Data Model) e poderosos processadores embarcados (LYNDON, Bill, Industry 4.0: Intelligent and flexible production).

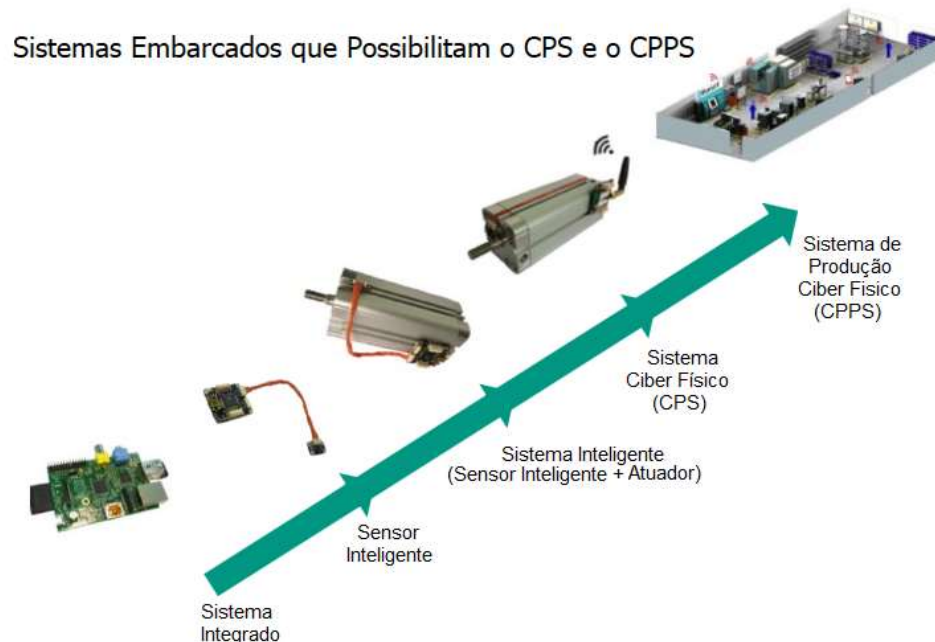
O termo *Sistemas Ciber-Físicos* (cyber-physical systems – CPS) na indústria 4.0 é usado para descrever a interação dos elementos físicos e computação, incluindo inteligência em todos os níveis como em máquinas, sensores, atuadores, subconjuntos e produtos que estão sendo produzidos (LYNDON, Bill). Os CPS são compostos de identidades físicas, com mecanismos controlados por algoritmos de computação, um exemplo seria sistemas mecatrônicos que usam processadores e comunicações embarcadas já embarcadas no motor, tais motores poderiam ser coordenados eletronicamente com outros motores dispensando assim o uso de engrenagens entre eles. Este tipo de tecnologia diminui os custos e ainda fornece uma grande flexibilidade, além de melhorar a confiabilidade (SCHOLZ, Steffen G).



**Figura 4: Funcionamento Sistemas Ciber-Físicos.**

Fonte: [https://www.2b1stconsulting.com/wp-content/uploads/2018/01/Cyber-Physical-Systems\\_CPS.png](https://www.2b1stconsulting.com/wp-content/uploads/2018/01/Cyber-Physical-Systems_CPS.png), acesso Maio/2020.

Na figura 5 um exemplo simples de um sistema ciber-físico onde o atuador passa a ser supervisionado por um sensor inteligente que envia dados para o sistema integrado, podendo assim tomar decisões sobre este atuador utilizando dados do sistema como um todo.



**Figura 5: Exemplo de um sistema ciber-físico.**

Fonte: [https://www.iaria.org/conferences2017/filesACHI17/SteffenGerhardScholz\\_Keynote\\_ACHI2017.pdf](https://www.iaria.org/conferences2017/filesACHI17/SteffenGerhardScholz_Keynote_ACHI2017.pdf), acesso Maio/2020.

## 2.2.PILARES

São nove os avanços tecnológicos que formam os pilares da Indústria 4.0 e estas tecnologias já são usadas na produção, mas com a Indústria 4.0 elas deixam de funcionar de forma isolada e irão se integrar em uma produção completamente automatizada e otimizada, tornando mais eficientes as relações entre os fornecedores, produção e consumidores, assim como a relação entre homem e máquina.

### 2.2.1 Robôs Autônomos

Os robôs autônomos interagem uns com os outros inclusive lado a lado com os operadores aprendendo com eles. Estes robôs têm menor custo e uma grande variedade de capacidades em comparação aos que são usados hoje na indústria (LYNDON, Bill. Automated guided vehicles improve production).

Entre os robôs autônomos mais utilizados atualmente estão os AGVs (Automated Guided Vehicle) ilustrado na figura 6, que são veículos guiados automaticamente por uma computação embarcada que percorrem o ambiente fabril, depósitos, armazém ou almoxarifados transportando materiais entre as etapas do processo produtivo, estes veículos são capazes de tomar decisões e podem se comunicar diretamente com sistema de gerenciamento e planejamento de recursos como o ERP (LYNDON, Bill. Automated guided vehicles improve production).



**Figura 6: Robôs Autônomos AGV**

Fonte: [https://www.researchgate.net/figure/AGV-Automated-guided-vehicle-system\\_fig3\\_300239927](https://www.researchgate.net/figure/AGV-Automated-guided-vehicle-system_fig3_300239927), acesso Maio/2020.

São muitas as tecnologias de navegação aplicadas nos AGVs,

- **Navegação Magnética:** É uma fita magnética instalada no chão como guia para o AGV percorrer. Uma das maiores vantagens de usar a fita é que ela pode ser facilmente removida e relocada mudando o percurso. A desvantagem é que as rotas são fixas e definidas pelas fitas, no caso do AGV parar por detecção de um obstáculo ele voltará a se mover após o problema ser resolvido.
- **Navegação guiada por laser:** Esta é similar a um olho eletrônico, instalando refletores posicionados nas paredes, o veículo usa triangulação de sinal para determinar sua posição exata. A vantagem desta tecnologia é que não requer nenhum trabalho no chão, como no caso da fita magnética. Também as rotas podem ser facilmente alteradas via programa, assegurando assim a máxima flexibilidade em companhias de logística.
- **Veículos guiados por visão:** estes usam sensores óticos (câmeras) em conjunto com outros sensores como de velocidade ou laser para navegar. O programa deste tipo de veículo realmente constrói um mapa em três dimensões do ambiente. Esta tecnologia permite que os veículos operem com uma grande flexibilidade tanto em manual quanto em automático.

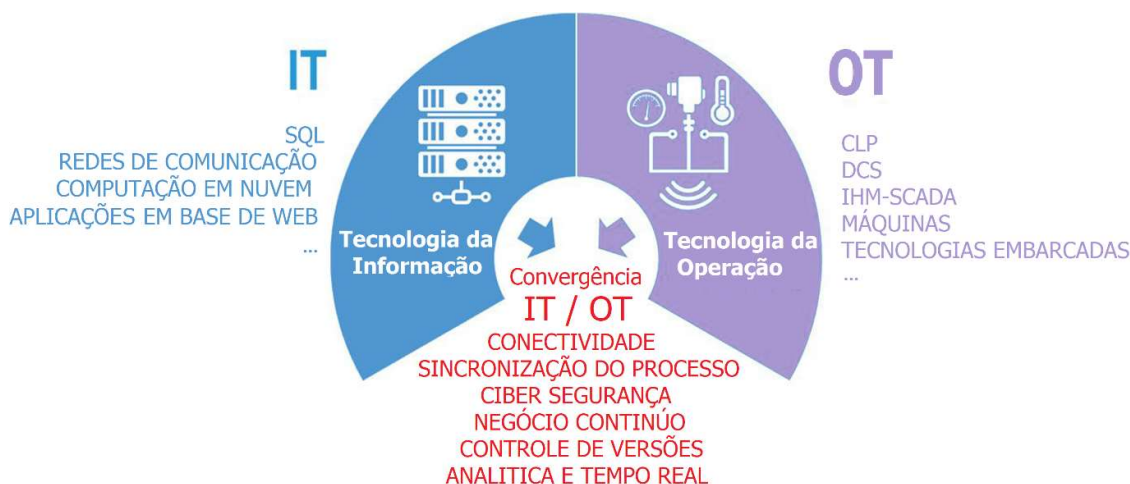
Hoje os AGVs podem ter muitas formas e tamanhos, eles têm a capacidade de carregar uma variedade de itens, desde os mais leves até cargas elevadas como um conjunto completo de motor para carros ou caminhões. Os processos também se tornaram mais seguros evitando que pessoas fiquem manuseando cargas, diminuindo até mesmo danos causados por erros operacionais com empilhadeiras por exemplo. Em processos que exigem uma grande flexibilidade onde a produção síncrona é impraticável, os AGVs conseguem entregar peças,

seguindo as ordens de produção tanto para estações de trabalho automatizadas quanto manuais, perfeitamente alinhadas com o fluxo do processo (LYNDON, Bill. Automated guided vehicles improve production).

### 2.2.2 Integração de Sistemas

Integração de Sistemas é um processo já normalmente aplicado nos campos de engenharia e tecnologia da informação. Envolve a combinação de vários sistemas de computação e pacotes de programas com o objetivo de criar um grande sistema, é um ponto crucial para a Indústria 4.0 já que esta é baseada na troca de informação e tomada de decisões entre diferentes atores da produção, entrega e venda de um produto. A integração de sistemas cria valor para o sistema, pois novas funcionalidades são inseridas através da combinação de subsistemas e programas de computador.

Tradicionalmente sistemas de produção e de tecnologia da informação funcionam de forma independente um do outro, mas para que conceito das fábricas conectadas na Indústria 4.0 seja explorado é necessário haver uma verdadeira convergência entre sistemas OT (Operation Technology – Tecnologia da Operação) e IT (Information Technology – Tecnologia da Informação), ilustrado na figura 7.



**Figura 7: Convergência IT OT**

Fonte: <https://www.servitecno.it/la-digital-transformation-nelle-utility/>, acesso Maio/2020.

Na tecnologia da operação (OT) os componentes físicos (hardwares) e programas (softwares) são dedicados a causar mudanças físicas no processo através da monitoração direta e controle de dispositivos, incluindo as máquinas, robôs, linhas de produção, válvulas, bombas, dentre outros elementos do processo produtivo. Geralmente o controle é feito por controladores lógico programável (CLP), sistemas de controle distribuído (DCS), controladores embarcados em máquinas, robôs, computadores industriais, dentre outros. Ainda em muitas fábricas há

sistemas de supervisão e controle como SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition), IHM (Interface Homem Máquina), historiadores e terminais remotos, que se comunicam diretamente com os controladores de processo, e servem tanto para supervisão dos processos como para intervenção através de ajustes de parâmetros ou comandos manuais por exemplo (LYNDON, Bill. Integrated manufacturing and production).

Na tecnologia da informação (IT) uma definição antiga, mas ainda muito precisa foi introduzida em novembro de 1958 em um artigo chamado “Management in the 1980s” por Harold J. Leavitt e Thomas L. Whisler que diz:

“A nova tecnologia ainda não possui um único nome definido. Vamos chamá-la de tecnologia da informação. É composta de várias partes relacionadas. Uma inclui técnicas para processar grandes quantidades de informação de forma muito rápida e realizadas por um computador de alta velocidade. Uma segunda parte foca na aplicação de métodos estatísticos e matemáticos aos problemas de tomada de decisão; é representado por técnicas como programação matemática e por metodologias como pesquisa operacional. Uma terceira parte está por vir, embora suas aplicações ainda não tenham surgido com muita clareza; consiste na simulação de pensamentos de ordem superior através de programas de computador.”

Há muito tempo indústrias de manufatura e processo tem perseguido este conceito de integração das diferentes partes do negócio, incluindo desenvolvimento de produto, compras, cadeia de suprimentos, produção, manutenção e logística. Nos anos 70 já se havia uma visão sobre a produção integrada por computadores, usando sistemas integrados e comunicação de dados introduzindo uma nova filosofia gerencial sobre como melhorar a eficiência organizacional e pessoal, nesta mesma década algumas indústrias automobilísticas e aeroespaciais tiveram pequenos projetos, mas a tecnologia ainda era muito cara e não muito confiável.

Até nos dias atuais o grande desafio para a integração de componentes e sistemas de diferentes fabricantes incluem os CLPs, DCSs, máquinas de controle numérico, transportadores e robôs é em relação aos protocolos de comunicação. Ainda há padrões de protocolos e troca de dados que são concorrentes principalmente entre os Estados Unidos e a Europa, isto dificulta muito a interconectividade entre os dispositivos.

Em resumo a convergência IT-OT fornece uma visão única das informações da empresa e dá a cada pessoa, máquina, sensor, CLP, controlador de processo, atuador, centro de controle de motores e outros dispositivos, as informações e dados muito precisos no momento certo para melhorar a eficiência operacional e diminuir os custos de produção (LYNDON, Bill. Integrated manufacturing and production).

### 2.2.3 Internet das Coisas

Há muitas definições para o termo Internet das Coisas (IoT – Internet of Things), a consultoria Gartner define o Iot como “uma rede de comunicações com objetos físicos que detém tecnologia embarcada para comunicar, sentir ou interagir com seus estados internos ou ambiente externo”. A International Telecommunication Union descreve o IoT como “uma infraestrutura global de informação social, habilitando serviços avançados pela interconexão de coisas físicas e virtuais”, isto indica como o termo IoT pode ser abrangente. O IoT gera uma quantidade de dados enorme, porém até 2018 apenas 3% dos dados gerados eram analisados, e apenas 15% estavam formatados e prontos para serem analisados sem manipulação. O desafio é justamente saber usar estes dados por provedores de serviços e pessoas para tomada de decisões que influenciar diretamente processos produtivos, por exemplo (DWYER, Brian. et al.).

No conceito IoT cada dispositivo pode coletar e transmitir dados, assim como a própria infraestrutura de rede pode ser considerada como parte do IoT. O potencial de desdobramento é gigantesco e se estima que até 2020 serão 50 bilhões de dispositivos conectados. O desafio enfrentado por muitos provedores de serviços e usuários finais em potencial é a melhor maneira de usar esses dados para a tomada de decisões eficientes que possam justificá-los e um retorno sobre o investimento na infraestrutura de coleta de dados (DWYER, Brian. et al.).

Para a indústria o IIoT (Industrial Internet of Things) ou Internet das Coisas na Indústria (figura 8) é o termo utilizado, já que os padrões e exigências são específicos e requerem um cuidado na aplicação deste conceito.



**Figura 8: Internet das coisas na indústria.**

**Fonte:** <https://www.novacomunications.com/2018/11/29/what-is-the-industrial-internet-of-things/>, acesso Maio/2020.

Essencialmente a IIoT envolve a aquisição de dados de centenas ou mesmo milhares de equipamentos do processo como sensores e a transmissão destes dados para uma central

(servidores de dados por exemplo) via redes físicas ou sem fio (DWYER, Brian. et al.). O objetivo é poder supervisionar qualquer coisa em qualquer lugar a um custo razoável.

Uma vez os dados chegando a central, estes são armazenados em base de dados, historiadores, na nuvem e outras localidades onde poderão ser acessados por programas de computador que analisam e interpretam as informações dos sensores usando técnicas de “Big Data” para diagnosticar condições, detectar problemas em equipamentos e alertar o pessoal de operação. Estes programas podem estar em centrais de controle nas plantas industriais, em um computador dedicado ou mesmo em um servidor do outro lado do mundo.

O “Internet” como parte do termo IIoT refere-se ao fato da Internet poder ser usada para conectar vários sistemas (DWYER, Brian. et al.). Em muitos casos, toda a rede de comunicação está apenas na planta industrial, neste caso o termo Internet é substituído pelo termo Intranet, mas os princípios básicos ainda são aplicados, onde uma quantidade enorme de dados é coletada e analisada para encontrar e resolver problemas.

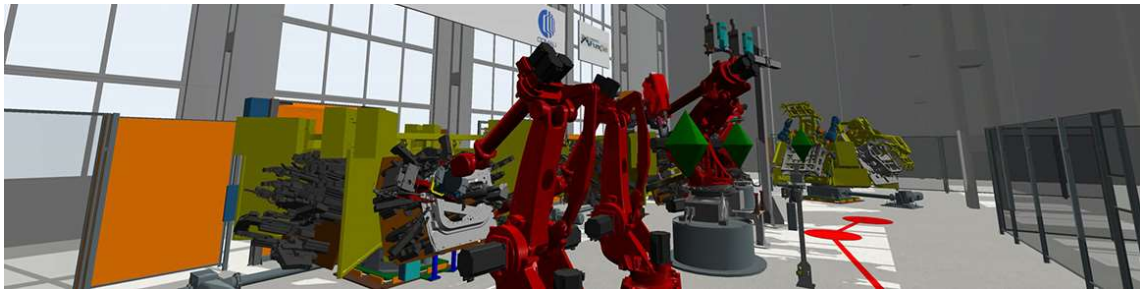
Apenas um estudo mais aprofundado e dedicado poderia demonstrar todas as aplicações onde o IIoT pode reduzir custo de energia, reduzir custo de manutenção e melhorar a eficiência do processo. No entanto, para exemplificar como é possível monitorar e analisar sistemas de vários tipos podemos mencionar bombas e compressores, trocadores de calor, válvulas de alívio de pressão, torres de resfriamento, dispositivos de segurança pessoal como estações com chuveiros e lavagem ocular, dentre muitas outras das mais variadas aplicações.

A quantidade de exemplos é inesgotável como o IIoT pode ser usado para melhorar a eficiência e encontrar problemas em plantas industriais em qualquer lugar do mundo.

#### 2.2.4 Simulação

Seres humanos são criaturas que aprendem mais vendo como as coisas funcionam do que apenas lendo sobre o assunto, assim executar as tarefas resulta em uma melhoria da aprendizagem. Por isso que muitas empresas estão adotando plataformas de treinamento através de simuladores (figura 9 e figura 10) onde os operadores podem praticar os conhecimentos sem risco de segurança. Os simuladores estão indo além das plataformas de treinamento com aplicações que podem inclusive gerar estudos e projetos para otimização, modificação ou mesmo aplicação de plantas industriais, sistemas de logística, hospitais e muitas outras aplicações. Isto é possível graças a fidelidade do simulador em relação ao processo real podendo gerar dados e simular situações adversas gerando relatórios que demonstram o comportamento em semanas, meses até mesmo anos, fazendo assim uma previsão muito precisa da capacidade de um sistema de logística, um sistema automatizado ou linha de produção por exemplo. Desde

que seja bem aplicados os ganhos são incalculáveis, pois podem viabilizar ou inviabilizar uma planta industrial inteira (LENNON, Tony).



**Figura 9: Simulação fabricação.**

Fonte: <https://www.flexsim.com/factory-simulation/>, acesso Maio/2020.



**Figura 10: Simulação operação.**

Fonte: <https://www.flexsim.com/factory-simulation/>, acesso Maio/2020.

Ainda há um outro conceito chamado emulação, que tange um equipamento físico e não necessariamente um processo como feito na simulação, assim na emulação é possível testar características físicas dos equipamentos. Com isso, simulação e emulação têm objetivos de modelos diferentes e estes definem o seu desenvolvimento e aplicação. Os modelos de simulação são para experimentação progressiva, ou seja, realizam vários experimentos no processo com intuito de verificar diferentes situações não importando a base de tempo, então eles precisam ser fáceis de construir, modificar e executar muito mais rápido que o tempo real. Já os modelos de emulação verificam o comportamento do sistema de controle quando conectados e sob várias condições de operação, assim eles precisam ser detalhados e funcionar precisamente em tempo real. A figura 11 a seguir resume a diferença entre os modelos:

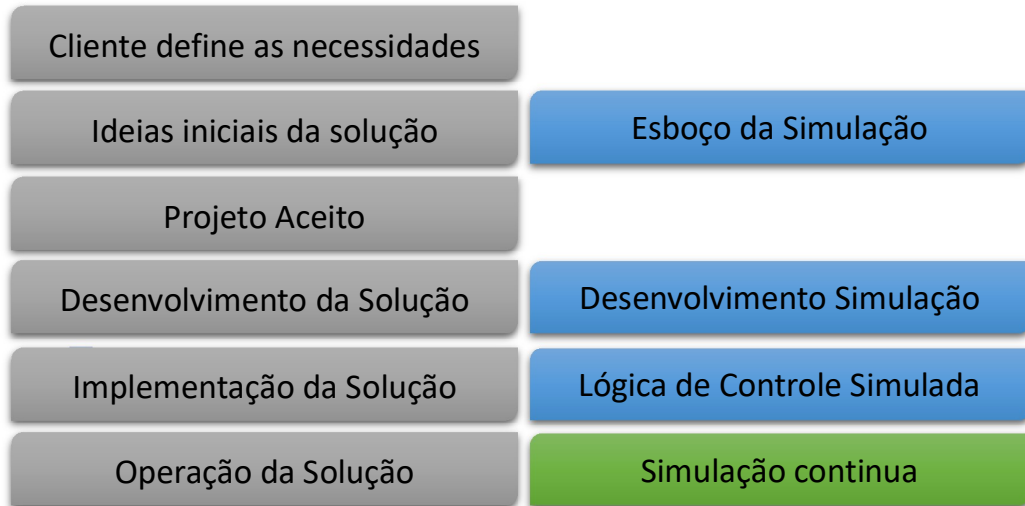
## Emulação, Simulação Qual é a Diferença?



**Figura 11: Diferenças entre emulação e simulação.**  
**Fonte: Autor (2020).**

Adicionalmente a estas informações é possível ainda mencionar que a simulação dispõe de uma experimentação a baixo custo e com repetibilidade, além de fornecer uma melhor compreensão do sistema para desenvolver e melhorar soluções, verificar e testar a operação, demonstrar como se opera, ajudar a quantificar as decisões de mudanças no processo e reduzir o risco de investimento já que é possível experimentar a solução antes de investir na compra de equipamentos. A emulação também é de baixo custo e fornece uma verificação nos sistemas de controle off-line sem risco para a instalação física, retira do caminho crítico do projeto o teste da lógica de controle pois com o pré-teste a possibilidade de ocorrer erros de lógica é muito menor, possibilita o teste mais exaustivo das lógicas tornando-as mais robustas economiza tempo e dinheiro no comissionamento já que muitos problemas podem ter sido verificados no teste emulado e antecipada a sua solução (LENNON, Tony).

As etapas típicas para desenvolvimento de um sistema de simulação ou emulação são demonstradas no fluxo ilustrado na figura 12:



**Figura 12: Fluxo de projeto para desenvolvimento de simuladores e emuladores.**  
**Fonte: Autor (2020).**

Muitas tecnologias são aplicadas no desenvolvimento dos simuladores e emuladores, inclusive comunicação com sistemas físicos, com controladores lógico programáveis, SCADA, IHM e emuladores de controladores já que algumas ferramentas de simulação já provêm deste tipo de tecnologia agregada ao software de simulação. Entre as ferramentas mais sofisticadas de desenvolvimento de simulação e emulação é possível encontrar as seguintes tecnologias:

- Editor 3D baseado no mundo real.
- Plataformas de desenvolvimento abertas
  - Microsoft .NET
  - Visual Studio
  - C#, Microsoft JScript, Ladder, drag and drop logic
- Possibilidade de importar fontes CAD de equipamentos reais na indústria.
- Protocolos e drives de comunicação com os CLPs
- Interatividade em Realidade Virtual.

Na figura 13 a relação de um sistema de controle real com o virtual, é possível inclusive observar a possibilidade de usar controladores físicos ou emuladores de controlador.



**Figura 13: Relação sistema real com o virtual.**  
**Fonte: Autor (2020).**

Em uma arquitetura típica de sistema de emulação utilizam-se CLPs e IHMs físicos, até mesmo para validar as lógicas de programação que são muito atreladas ao hardware, segue na figura um exemplo de arquitetura.



**Figura 14: Arquitetura de um sistema de emulação.**  
**Fonte: <https://www.demo3d.com/technology/>, acesso Maio/2020.**

### 2.2.5 Impressão 3D (addictive manufacturing)

As empresas começaram a adotar a fabricação aditiva, como a impressão 3D, principalmente para protótipos e produção de componentes individuais. Com a Indústria 4.0, esses métodos de fabricação aditivos serão amplamente utilizados para produzir pequenos lotes de produtos personalizados que oferecem vantagens de construção, em projetos com componentes mais leves e complexos. Sistemas de fabricação aditivos descentralizados de alto desempenho reduzirão as distâncias de transporte e o estoque disponível.

Por exemplo, empresas aeroespaciais já estão usando fabricação aditiva aplicando em novos projetos que reduzem o peso da aeronave, diminuindo seus gastos com matérias-primas de custo elevado como o titânio.



**Figura 15: Exemplo manufatura aditiva.**

**Fonte:** <https://www.ge.com/additive/webinar/metal-additive-manufacturing-aerospace>, acesso Maio/2020.

Os metais são talvez os materiais mais comuns em engenharia, assim a indústria que utiliza a fabricação aditiva busca novas soluções para criar peças metálicas que possam substituir as peças produzidas convencionalmente. Muitos materiais estão usados na fabricação aditiva como o alumínio, titânio, aço inoxidável, etc., a maioria deles são comercializados em pó, como as peças são construídas por camadas utilizando o pó de metal, elas formam microestruturas que por sua vez tem uma grande influência nas propriedades mecânicas das peças, como o comportamento à tração e à fadiga. Para lidar com os problemas relacionados a estas microestruturas novas pesquisas avançaram, principalmente no tratamento térmico das peças. Ainda há muito o que pesquisar e desenvolver nesta tecnologia, mesmo que os problemas técnicos atuais das peças sejam contornados, há também uma expectativa da indústria na fabricação destas peças, pois os processos têm um custo elevado, são lentos, é necessário um tratamento na superfície devido a qualidade e a homogeneidade das microestruturas que precisa ser melhorada. Porém o processo de fabricação aditiva provavelmente vai se tornar uma peça chave na implementação da Indústria 4.0, desde que supere essas barreiras atuais por meio de melhorias na ciência dos materiais e nos processos de fabricação das peças.

### 2.2.6 Computação em Nuvem

A computação em nuvem, que usa fornecedores externos de terceiros, está crescendo em popularidade na automação industrial. A origem do termo "computação em nuvem" não é clara. Em certo sentido, é como se algo estivesse distante e não temos certeza de onde está armazenando informações e executando a computação. Alguns afirmam que o termo foi usado em documentos internos da Compaq Computer em 1996. Outros sugerem que o termo foi usado comercialmente pela primeira vez em 2006, quando Google e Amazon começaram a usar "computação em nuvem" que seria uma forma de acessar programas, potência computacional e arquivos na rede mundial de computadores, ao invés de usar servidores locais ou

computadores de mesa. Algumas características essenciais definem a computação em nuvem e são elas:

- Serviço sob demanda; um usuário dispõe das capacidades computacionais, como o tempo de uso do servidor e os recursos de rede conforme necessitar, este gerenciamento é feito automaticamente sem interação humana para interagir no servidor de serviços
- Amplo acesso a rede de comunicações; os recursos estão disponíveis na rede e acessados por mecanismos padrões (ou seja, serviços da Web) que promovem o uso por várias plataformas (por exemplo, telefones celulares, tablets, laptops e estações de trabalho).
- Agrupamento de recursos; os recursos de computação do provedor de nuvem são agrupados para atender vários consumidores usando um modelo multitenant (vários usuários), com diferentes recursos físicos e virtuais dinamicamente atribuídos e reatribuídos de acordo com a demanda do usuário. Existe uma sensação de independência de localização, pois o cliente geralmente não tem controle ou conhecimento da localização exata dos recursos fornecidos. Exemplos de recursos incluem armazenamento, processamento, memória e largura de banda da rede.
- Rapid elasticity (Provisionamento escalonável); os recursos podem ser provisionados e dimensionados automaticamente para atender rapidamente às necessidades de computação e armazenamento com base na demanda do usuário. Para o usuário, os recursos disponíveis geralmente parecem ilimitados e podem ser apropriados em qualquer quantidade e a qualquer momento
- Medição dos serviços; os sistemas em nuvem controlam e otimizam automaticamente o uso de recursos, aproveitando o recurso de medição ao tipo de serviço (por exemplo, armazenamento, processamento, largura de banda, aplicativos e contas de usuário ativas). O uso de recursos pode ser monitorado, controlado e relatado, fornecendo transparência ao fornecedor e ao consumidor do serviço utilizado.

A aplicação da computação em nuvem tem o potencial de alterar as arquiteturas de sistemas de automação industrial que são tradicionalmente sistemas locais, porém exigem um investimento. Por outro lado, o modelo de computação em nuvem fornece armazenamento, computação e aplicativos de software significativos sob demanda, com os engenheiros pagando apenas pelo que usam. A computação em nuvem e a análise sob demanda também estão sendo desenvolvidas para uma gama muito mais ampla de aplicativos fora da automação industrial, fornecendo novos recursos poderosos e mais econômicos para os engenheiros de automação.

### 2.2.7 Realidade Aumentada

Os avanços tecnológicos imersivos (Google Glass por exemplo) vão muito além dos casos de uso comercial e do consumidor, tendo o potencial de transformar temas complexos presentes na indústria em experiências vívidas e realistas. Como parte dessa onda de tecnologia imersiva, o treinamento em realidade virtual é usado há muitos anos com excelentes resultados em vários trabalhos críticos como para treinar astronautas, pilotos e militares.

Os avanços nas capacidades de processamento gráfico e computacional tornaram a criação desses mundos virtuais mais acessíveis a muitas indústrias. Indústrias que precisam preservar seu conhecimento e sustentar a excelência operacional como as de petróleo e gás, refino e geração de energia, recorreram aos modelos de realidade virtual (figura 16) para ajudar no treinamento dos operadores e manutenção em uma variedade de funções e tarefas críticas. Os desenvolvimentos neste setor estão aumentando muito, por isso é importante se atualizar e entender como as implementações de realidade virtual vão se consolidar mais ainda nos ramos da indústria (RICHMOND, Peter).



**Figura 16: Realidade aumentada.**

**Fonte:** <https://internetofbusiness.com/ar-enabled-industrial-wearables-the-next-growth-market/>, acesso Maio/2020.

O ambiente em realidade virtual usa uma variedade de dispositivos próprios para ambientes virtuais como controles, óculos, luvas e fones, que através de imagens em três dimensões fornece ao usuário uma impressão de estar no mundo virtual, inclusive poder interagir com ele.

A realidade aumentada está se tornando cada vez mais presente no treinamento, resolução de problemas, diagnósticos, manutenção e progresso no ambiente industrial, e o resultado tem sido trabalhos mais eficientes, envolventes e seguros. No entanto, a ampla adoção de tecnologia imersiva requer colaboração das empresas e dos provedores de tecnologia de realidade virtual que devem adaptar as tecnologias de uso comercial para atender as exigências da indústria (RICHMOND, Peter).

## 2.2.8 Big Data

A expressão “Big Data” aparece como um acúmulo massivo de informação coletada da internet, em particular por sites de propaganda. Com este enorme volume de informação foi necessária uma ferramenta para processar estes dados, no entanto até esta expressão aparecer, as ferramentas que existiam não eram capazes de executar este processamento. Desde então analisar estes dados tem se tornando um ponto para chave para as empresas, afinal nós produzimos uma quantidade enorme dados todos os dias. Uma vez criada a informação, esta precisa ser gerenciada, há dois de tipos de sistemas de informação que são usados para este gerenciamento, no primeiro as tecnologias de armazenagem guardam os dados, no segundo os dados brutos são processados e reorganizados em estruturas de dados e as vezes mudando o seu formato. O modelo mais aceito atualmente para o processo Big Data tem três dimensões, os três Vs que são Volume, Variedade e Velocidade (JOSHI, Sanat), como mostrado na figura 17:



**Figura 17: Os três Vs do Big Data.**

**Fonte:** <https://solvimm.com/blog/o-que-e-big-data/>, acesso Maio/2020.

O Volume se refere ao tamanho dos dados coletados, como exemplo o Facebook produz mais que 600 Terabytes todos os dias. A Variedade é sobre os tipos de dados armazenados, que podem ser tanto textos como imagens, analisar dados é também chamado de minerar dados, com o uso de ferramentas que transformas os dados brutos em uma estrutura e formato coerente e utilizável. Já a velocidade é sobre a rapidez no processamento, pois um dos problemas no Big Data é justamente transportar os dados, armazená-los, processá-los e analisá-los próximo do tempo real, é um ponto chave principalmente para ambiente da internet que é extremamente competitivo.

Normalmente as arquiteturas para análise de dados são sobre uma abordagem de armazém de dados (Data Warehouse), onde o dado é extraído de várias fontes, transformado para um modelo definido, então carregado no armazém de dados, que tem um modelo de dados específico. O modelo de dados é criado para facilitar o acesso a informações específicas como fornecer uma previsão de vendas ou mostrar níveis de estoque. Para realizar análises estatísticas

os dados geralmente precisam ser movidos para outro servidor especializado, assim várias cópias são criadas, o que torna o processo dispendioso e trabalhoso e requer conhecimento especializado. Estas arquiteturas são muito úteis para criar relatórios e analisar estrutura de dados, mas não são eficientes ou mesmo não funcionam quando precisam lidar com os desafios de lidar com grandes volumes, complexibilidade e variedade criados pelo Big Data (JOSHI, Sanat).

Dentre as melhores práticas no Big Data está o processo em “malha-fechada” (closed-loop process), que consiste em três fases que são o gerenciamento do Big Data, descoberta da informação, modelagem analítica avançada e desdobramento do modelo do negócio.

O primeiro desafio do Big Data é conseguir armazenar com eficiência os petabytes de dados, sem a necessidade de criar modelos de dados e executar facilmente operações como agrupamento, agregação, classificação e filtragem de milhões de linhas de dados.

As tecnologias de Big Data, como o Hadoop (plataforma de software em Java de computação distribuída voltada para clusters e processamento de grandes volumes de dados), resolvem o problema de armazenar, gerenciar e analisar com eficiência quantidades quase ilimitadas de informações geradas em velocidades extremamente altas. Alguns exemplos são dados gerados por sites e dados gerados por sensores. Essas tecnologias aproveitam arquiteturas de software em paralelo e poder computacional relativamente barato (JOSHI, Sanat).

No ambiente industrial o Big Data permite a mesclagem eficiente de dados de vários sistemas na indústria quem podem por exemplo ajudar a entender o que estava acontecendo nos vários sistemas de automação quando ocorreu um determinado defeito de fabricação; ou rastrear todas as peças fabricadas que poderiam ser afetadas por uma máquina fora da tolerância ou como uma condição fora da tolerância em uma célula de fabricação específica afetaria os pedidos dos clientes. O Big Data permite responder perguntas aparentemente simples, como "conte quantas vezes uma determinada máquina ultrapassou um limite", que de outra forma não poderia ter sido respondida com rapidez ou facilidade no passado.

### 2.2.9 Segurança Cibernética

Segurança cibernética é um conjunto de tecnologias, processos e práticas de desenvolvimento para proteger redes de comunicação, dispositivos, programas e dados de ataques, danos e acessos não autorizados. Ela tem se tornado uma prioridade para a indústria e governos, porém ataques cibernéticos a plantas industriais continuam a ser uma grande preocupação, pois a demanda por troca de dados em tempo de real entre os sistemas de automação e de negócio tem aumentado significativamente, e devido a esta maior interação entre sistemas que até então eram separados, o risco de ataques cibernéticos está aumentando e apresentando serias ameaças para a indústria, até mesmo para a segurança nacional. Estes ataques têm o potencial de interromper redes elétricas, transporte, sistemas de telecomunicações, sistema financeiro, além das fábricas e do próprio governo. Para as empresas a única coisa que pode ser controlada é o desenvolvimento, fortalecimento e melhoria contínua das proteções de segurança cibernética, neste ponto contratar recursos externos por empresas especializadas é uma boa estratégia de proteção.

Um exemplo emblemático sobre um ataque cibernético a um sistema de automação é o vírus Stuxnet (descoberto em julho de 2010) foi o primeiro ataque cibernético direcionado especificamente a dispositivos ICS (Internet Connection Sharing) que é um método para conectar vários computadores em uma rede local à Internet, através de uma única conexão e um único endereço IP.). O vírus é notável não apenas por sua sofisticação técnica, mas também porque visa os ICS's projetados para operar usinas de energia, incluindo usinas nucleares, redes inteligentes, sistemas de água, plataformas de petróleo offshore, navios, outras infraestruturas críticas e até infraestruturas críticas no Irã. Depois que o Stuxnet foi criado, seus autores adicionaram um novo software, que permitiu a disseminação entre dispositivos USB sem praticamente nenhuma intervenção da vítima. E eles também conseguiram, de alguma forma, obter chaves de criptografia pertencentes às empresas de chips Realtek e JMicron e assinar digitalmente o malware, para que os scanners antivírus tivessem mais dificuldade em detectá-lo. Este é um grande exemplo de como é possível o ataque a sistemas físicos, apesar da sofisticação do vírus, ele se tornou um manual para desenvolvimento de novos ataques o que reforça ainda mais a importância no investimento tanto em infraestrutura quanto em pessoal especializado em segurança cibernética pois os danos podem ser irreversíveis.

## 2.3 PADRÕES (STANDARDS)

Está claro que os conceitos da Indústria 4.0 serão implementados na maioria das indústrias utilizando os equipamentos e tecnologias já disponíveis. Apenas quando um novo sistema produtivo é planejado que há a oportunidade de se projetar desde o início como um fábrica totalmente conectada, integrada e inteligente. O mesmo desafio será como os padrões já existentes que terão que evoluir para se integrar a este novo conceito de manufatura inteligente.

### 2.3.1 ISA-95 e IEC 62264: Integração Empresa com Sistema de Controle

O ISA-95 é um padrão que foi desenvolvido para integrar a empresa e os sistemas de controle. Ele dispõe de um modelo para a organização alocando o negócio em diferentes sistemas garantindo o fluxo de informações entre eles. Este padrão originalmente americano tem sido adotado com um padrão internacional chamado IEC 62246 e é constituído de 5 níveis estruturados de automação garantindo o fluxo de informações em três principais áreas que são produto, capacidade e produção. A figura a seguir representa a pirâmide clássica da automação em uma adaptação da ISA-95 (HE, Dazhuang):

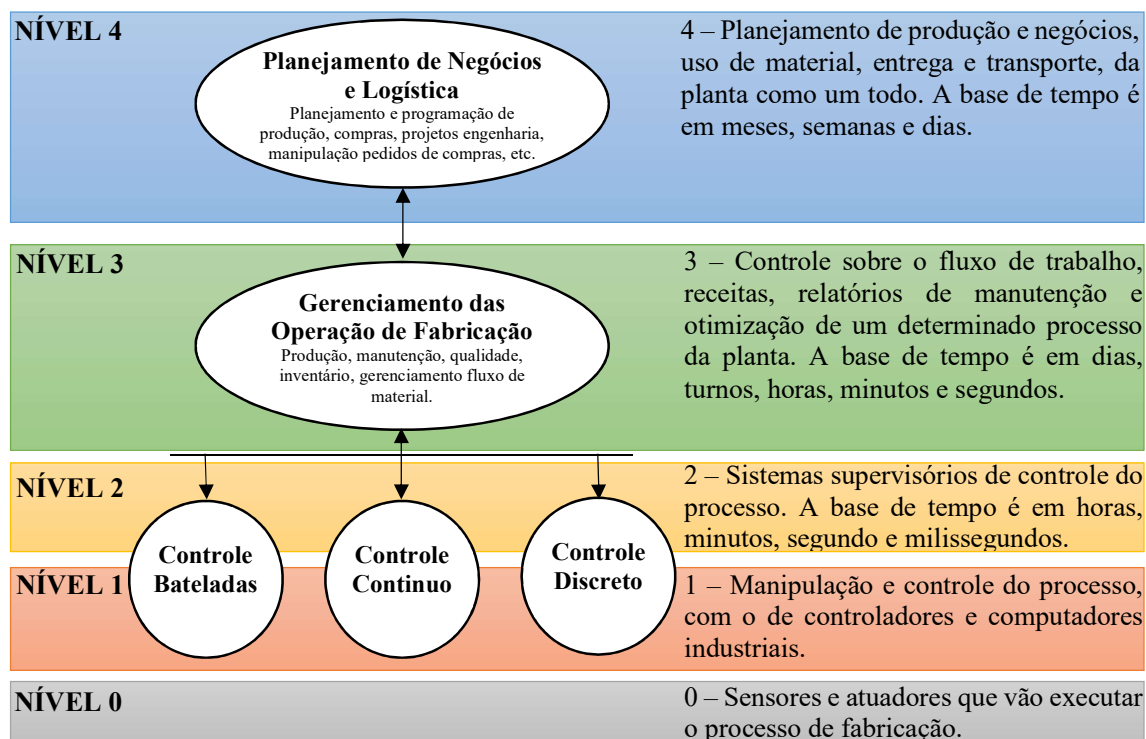


Figura 18: Pirâmide clássica da automação (adaptado ISA-95).

Fonte: <http://www.tec.abinee.org.br/2017/arquivos/a16.pdf>, acesso Maio/2020.

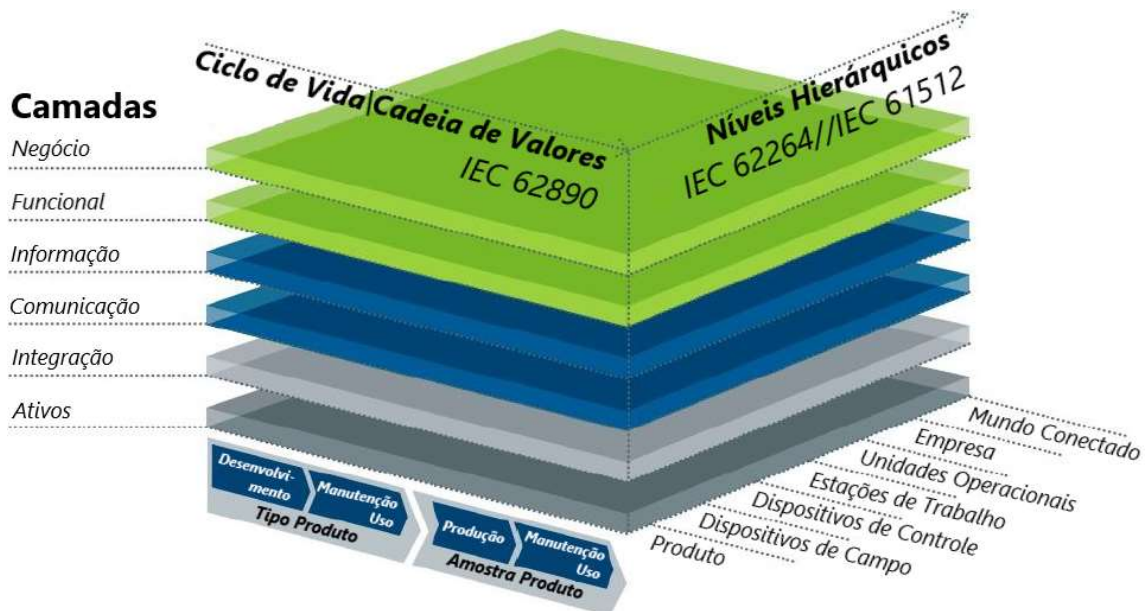
Cada nível dispõe de funções específicas e com diferentes bases de tempo como mostrado na figura. O nível 0 define o estado físico do processo através da leitura de sensores e atuação através de válvulas, motores, conversores etc. O nível 1 é o comando do processo com programas muitas vezes rodando em controladores lógico programáveis, que operam com velocidades de processamento de frações de segundo. O nível 2 é onde se promove a interação do processo com a operação, com ferramentas de monitoramento e supervisão, além de poder interferir no processo físico com envio de receitas, validações de produto e tomadas de decisão. No nível 3 as atividades como fluxo de trabalho e produto são gerenciadas, que podem incluir planejamento de produção, relatório de produção e manutenção, além da coordenação dos processos. O nível 4 é onde as atividades do negócio interagem com as de processo com o intuito de gerenciar a fabricação da uma planta inteira, neste nível estão sistemas como ERP (HE, Dazhuang).

O padrão ISA-95 foi desenvolvido com o objetivo de reduzir o custo, risco e erros associados com interação das interfaces de negócio da empresa como os sistemas de controle de produção. Muitas empresas como Honeywell, Foxboro, Yokogawa, Fisher Rosemount, Chevron, Dow Chemical, SAP e muitas outras participaram da elaboração deste padrão, agregando assim todo seu know-how e melhores práticas para definir os modelos e terminologias (HE, Dazhuang).

O uso deste padrão é muito amplo, podendo ser usado pra definir como uma empresa é estruturada em termos de departamentos e sistemas de automação, como modelo funcional para definir responsabilidades, para determinar o fluxo de informações de um departamento para outro inclusive com os sistemas de automação, como checklist e dicionário para as funções e fluxo de informações, compreender o relacionamento dos diferentes tipos de informações e até mesmo como fundamento estrutural de um banco de dados.

### 2.3.2 RAMI 4.0

O RAMI 4.0 (Reference Architectural Model Industrie 4.0) ou modelo de referência de arquitetura para a indústria 4.0, é um mapa tridimensional (figura 19) que mostra os aspectos mais importantes da indústria 4.0, ele assegura que todos participantes envolvidos compartilham a mesma perspectiva e desenvolvem uma compreensão comum (GAYKO, Jens).



**Figura 19: RAMI 4.0, modelo de referência de arquitetura para a indústria 4.0.**  
 Fonte: <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.html>, acesso Maio/2020.

Neste modelo as camadas são usadas no eixo vertical para representar várias perspectivas, tais como mapas de dados, descrições funcionais, comportamento de comunicações, processos de ativos ou negócios. Esta forma de organização vai de encontro com a maneira de pensar da tecnologia de informação, onde projetos complexos são divididos em grupos para que as partes se tornem mais gerenciáveis. A seguir uma descrição sucinta de cada camada.

A camada de negócio assegura a integridade das funções na cadeia de valores, mapeia os modelos de negócio, fornece condições legais e regulatórios, modela as regras as quais o sistema tem que seguir, orquestra os serviços da camada funcional e fornece um vínculo entre os diferentes processos do negócio (GAYKO, Jens).

A camada funcional é a descrição das funções e é onde as regras e decisões lógicas são tomadas. É a plataforma para a integração de várias funções, além ser o ambiente em tempo real e modelagem para os serviços que suportam os processos do negócio. Acessos remotos e a integração horizontal são feitas apenas através da camada funcional, isto garante a integridade das informações, as condições dos processos e a integração à nível técnico.

Na camada de informação roda o ambiente para processar, executar as regras de relacionamento, formalizar e contextualizar os eventos. Neste contexto as regras são aplicadas a um ou mais eventos para gerar um ou mais eventos que serão processados na camada funcional (GAYKO, Jens).

A camada de comunicação é a padronização da comunicação usando um formato de dados uniforme que serão utilizados pela camada de informação. Ela também fornece os serviços para controle da camada de integração.

A camada de integração que fornece as informações dos ativos (componentes físicos, documentos, programas etc.) de forma que possa ser processado por um computador. E nesta camada que há a geração dos eventos dos ativos, onde os elementos como leitores RFID, sensores e Interfaces Homem Máquina, dentre outros se conectam com a tecnologia da informação. É também neste nível que há a interação com as pessoas através de, por exemplo, Interfaces Homem Máquina (GAYKO, Jens).

A camada de ativos representa os componentes físicos como equipamentos e máquinas, documentos, diagramas de circuitos, ideias e arquivos. As pessoas também fazem parte desta camada e são conectadas ao mundo virtual pela camada de integração.

Um outro importante critério é o ciclo de vida do produto, que está contido na cadeia de valores, ele está demonstrado no lado esquerdo do eixo horizontal do modelo de referência. Neste critério a indústria 4.0 oferece um potencial para melhorar o ciclo de vida dos produtos, máquina e fábricas, através da aquisição e interpretação de dados de todo o ciclo de vida dos produtos, auxiliando na tomada de decisão mais rápida e eficaz.

O ciclo de vida do produto é composto de duas partes e duas fases cada, a primeira parte é a de desenvolvimento onde o tipo produto, máquina, etc. é criado a partir de uma ideia e passa por testes até a produção do primeiro protótipo, só após a validação de todos os testes que o tipo produto é liberado para fase de manutenção e uso deste protótipo e em seguir a produção em série que são produtos fabricados industrialmente baseados neste protótipo, cada produto fabricado em série representa aquele protótipo desenvolvido e passa a ser chamada de amostra ou cópia. As amostras que são vendidas e entregues aos clientes. Através de relatórios com informações de eficiência e defeitos que são geradas pelos clientes ou até mesmo diretamente pelas amostras, que o fabricante consegue corrigir e melhorar o produto, criando versões mais eficazes e seguras (GAYKO, Jens).

Vinculando a digitalização e a cadeia de valores na indústria 4.0 traz um potencial muito grande para melhorias, isso se faz através dos vínculos entres várias funções antes não conectadas. Os dados de logística podem ser usados na montagem e na logística interna para organização da própria cadeia produtiva baseado na lista de pedidos pendentes. O departamento de compras pode visualizar os inventários em tempo real e saber onde as peças dos fornecedores estão em cada momento, o cliente vê o status completo do produto pedido em toda a cadeia produtiva e muito mais. A conexão entre o departamento de compras, ordens de produção,

montagem, logística, manutenção, o cliente e fornecedores proporciona uma melhoria para o processo com um todo praticamente sem limite. O ciclo de vida agora tem que ser visto como algo único, adicionando valor ao processo que está contido, e não mais de forma isolada visto apenas como uma única fábrica, e sim como um coletivo de fábricas e todas as partes envolvidas, da engenharia passando pelos fornecedores de componentes até o consumidor (GAYKO, Jens).

O terceiro critério importante está representado no terceiro eixo (lado direito horizontal), que é a localização das funcionalidades e responsabilidades dentro das fabricas e plantas. Ele representa a hierarquia funcional, e não mais as classes de equipamentos e níveis hierárquicos da clássica pirâmide de automação representado na figura 18. Para classificação em uma fábrica, esse eixo da arquitetura de referência segue as normas IEC 62264 (ISA 95) e IEC 61512. Esses dois padrões IEC mencionados representam apenas os níveis dentro de uma fábrica, a Indústria 4.0, no entanto, vai um passo além e também descreve o grupo de fábricas e a colaboração com empresas de engenharia externas, fornecedores de componentes e clientes, etc. para observações acima e além do nível da Empresa, o "Mundo Conectado" foi, portanto, adicionado (GAYKO, Jens).

### 3. ESTUDO DE CASO

O estudo de caso escolhido foi o desenvolvimento de uma aplicação para demonstrar alguns dos conceitos da Indústria 4.0 e como a integração e comissionamento de equipamentos que podem ser facilitados pelos testes e validação através de um sistema desenvolvido com o auxílio da simulação, também como um ambiente virtualizado dispõem de uma plataforma de treinamento onde operadores podem visualizar e manipular o sistema como se fosse real.

#### 3.1 PROBLEMA ABORDADO E JUSTIFICATIVA

Muitos projetos têm falhado na implantação das ferramentas sob o conceito da Indústria 4.0, a experiência tem mostrado que as organizações não começam entendendo seus processos, ao invés disto elas se baseiam em relatórios e ferramentas de controle já pré-concebidos, mas as soluções selecionadas para entregar esses resultados raramente sobrevivem ao primeiro contato com a realidade. Esses projetos falham, porque eles se enquadram em um ciclo constante de modificações e reconstruções, pois cada etapa dos processos gera problemas imprevistos, causando atrasos e aumentando os custos.

Dentre os pilares da Indústria 4.0 a simulação tem um potencial muito grande no sentido de diminuir os imprevistos de instalação e comissionamento, além de mesmo durante a fase de projeto poder antever problemas antes mesmo da fabricação dos equipamentos ou da finalização do desenvolvimento dos programas das máquinas. Assim este trabalho tem por objetivo explorar este tipo de ferramenta criando um ambiente virtualizado que servirá tanto para o desenvolvimento do programa quanto para treinamento das pessoas sobre o sistema.

O problema escolhido para demonstrar a capacidade da ferramenta de simulação foi um sistema de transporte, onde há uma convergência crítica no fluxo que recebe subprodutos de quatro linhas de produção com tempo de ciclo iguais, porém que são enviados para processos com tempos de ciclo diferentes entre si, duas lógicas de prioridade são testadas para a mesa cruzada onde há a convergência das linhas, na primeira o produto que chegar primeiro terá a prioridade quanto for possível transferir, na segunda lógica a prioridade será determinada pela quantidade de subprodutos nos armazéns, onde o menos cheio terá a prioridade. Será demonstrado o resultado de produção e eficiência das máquinas em um turno de 12 horas.

Sem o simulador o programa desenvolvido teria que ser testado na linha em funcionamento o que poderia causar perdas de produção durante a verificação e validação do projeto, também o simulador se justifica pela possibilidade de se testar várias configurações e possibilidades em um ambiente virtualizado, podendo inclusive ser validado pelo cliente antes mesmo da implantação e comissionamento.

## 3.2 PROJETO

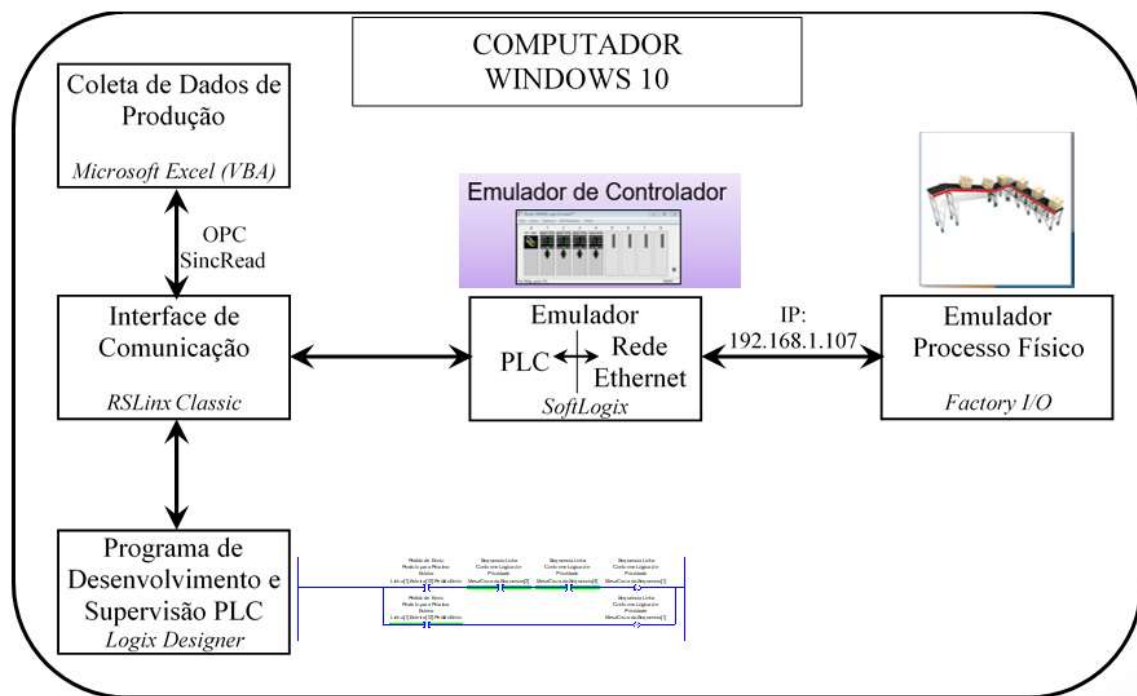
O presente projeto contempla toda estrutura de sistema transporte, máquina e automação emulada em uma plataforma virtual.

### 3.2.1 Plataforma de Simulação

A plataforma de simulação foi instalada em um computador não industrial, porém o sistema de automação poderia ter rodado em um controlador industrial (CLP) comunicando com um computador que emula os equipamentos indústrias.

#### 3.2.1.1 Arquitetura

O sistema foi arquitetado em apenas 1 computador rodando o CLP emulado, a interface de comunicação, o programa de desenvolvimento e supervisão da automação e o emulador dos equipamentos indústrias. No Figura 20 está demonstrado o relacionamento entre os programas.



**Figura 20: Arquitetura de programas emulador em um computador.**  
**Fonte: Autor (2020).**

Todos os programas rodaram com razoável performance em um computador doméstico de uso pessoal, a única modificação foi a troca do disco de armazenamento de um disco rígido de 500GB e 5400 rpm para um disco de estado sólido de 480 GB, melhorando consideravelmente a abertura de programas e estabilidade do sistema operacional. A seguir configuração final do computador onde foi feito todo o desenvolvimento e testes de toda a plataforma de simulação.

### CONFIGURAÇÃO COMPUTADOR:

#### Sistema Operacional:

Microsoft Windows 10 Home Single Language

Versão: 10.0.18363 Build 18363

#### Computador:

Fabricante: ASUSTeK COMPUTER INC.

Modelo: S550CA

Tipo: x64-based PC

Processador: Intel(R) Core(TM) i7-353U CPU @ 2.00GHz, 2501Mhz, 2

Core(s), 4 Logical Processor(s)

Memória Física Instalada: 8.00 GB

Armazenamento: 480GB SSD

#### 3.2.1.2 Programas Utilizados

Os programas foram escolhidos conforme a capacidade de processamento do computador e as possibilidades que o programa de emulação permitiu, portanto com exceção do emulador de máquina que foi utilizada a última versão, todos os outros programas foram utilizadas versões de programa antigas, porém que fornecem todas as funcionalidades para rodar a plataforma de simulação proposta.

##### 3.2.1.2.1 Programa de Comunicação

O programa que proporciona a comunicação da plataforma de desenvolvimento com a aplicação de automação (Logix Designer), a coleta de dados através do OPC (OLE for Process Control) e com o Microsoft Excel via VBA (Visual Basic for Applications) é o RSLinx Classic, Ele habilita os serviços que o rack virtual contendo o controlador PLC e a carta de comunicação Ethernet necessitam para funcionar, que neste projeto foi utilizado a versão 4.00.00 CPR 9 SR 10.0.

Conforme o manual da Rockwell Automation (LINX-GR001U-EN-E, janeiro/19) o RSLinx é uma solução abrangente de comunicação para sistemas fabris, disponibilizando aos controladores da AllenBradley acesso a uma enorme variedade de aplicações da própria AllenBradley e Rockwell Software. Esta variedade abrange programas para programação e configuração de dispositivos como o RSLogix e RSNetWorx, programas para desenvolvimento de aplicações de interface homem-máquina como o RSView 32, FactoryTalk View SE (Site Edition) e FactoryTalk View ME (Machine Edition), aplicações para aquisição de dados usando Microsoft Office, web pages, ou Visual Basic®. O RSLinx Classic também incorpora técnicas avançadas de otimização de dados e contém um conjunto de ferramentas para diagnóstico, ele

também pode ser um servidor de acesso de dados via OPC DA (Data Access) e um servidor DDE (Dynamic Data Exchange). A figura 21 mostra a versão de software utilizada.



**Figura 21: Tela de revisão RSLinx Classic Gateway.**  
**Fonte: Programa RSLinx Rockwell Automation**

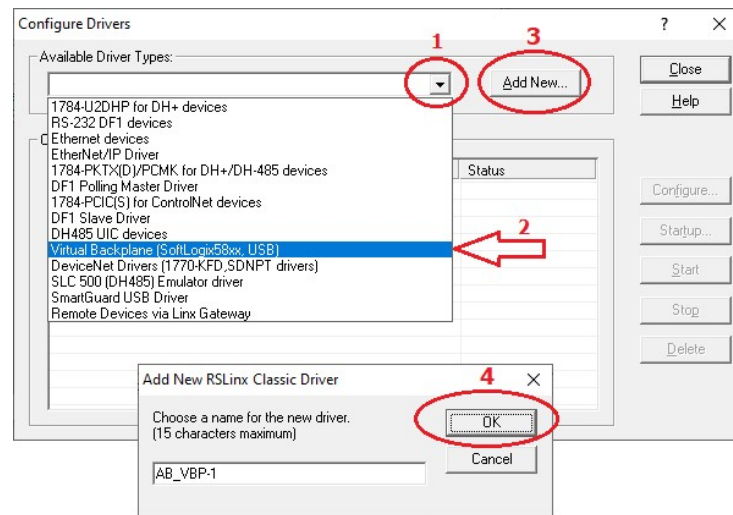
O RSLinx dispõe de vários Drivers que são utilizados para comunicação com uma variedade de dispositivos, neste projeto será utilizado apenas o driver Virtual Backplane (SoftLogix58xx, USB), nas figuras a seguir um passo a passo de como foi configurado.

Botão Configure drivers conforme indicado na figura 22:



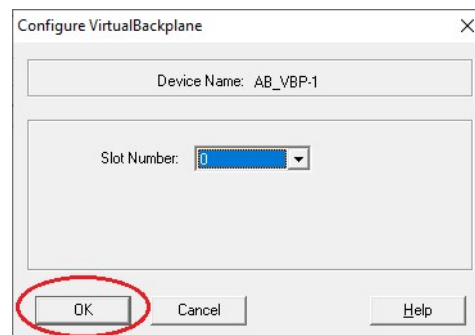
**Figura 22: Tela RSLinx seleção Configure Drivers.**  
**Fonte: Programa RSLinx Rockwell Automation**

Na figura 23, o botão de seleção ▼ (1) selecionado o driver Virtual Backplane (SoftLogix58xx, USB) (2), botão Add New (3) e OK (4) para finalizar:



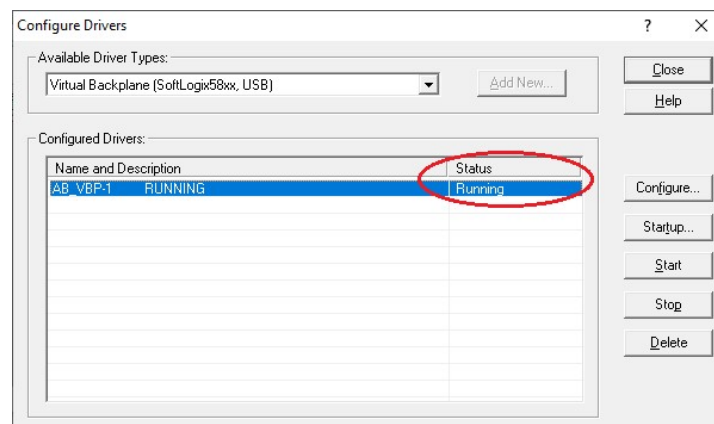
**Figura 23: Tela RSLinx adicionar Driver Virtual Backplane (SoftLogix58xx, USB).**  
**Fonte: Programa RSLinx Rockwell Automation.**

Para esta aplicação não é necessário mudar o Slot Number, bastar clicar OK, figura 24.



**Figura 24: Tela RSLinx Configure VirtualBackplane.**  
**Fonte: Programa RSLinx Rockwell Automation.**

O Status Running indica que o driver foi configurado corretamente, figura 25.



**Figura 25: Tela RSLinx verificação de status.**  
**Fonte: Programa RSLinx Rockwell Automation.**

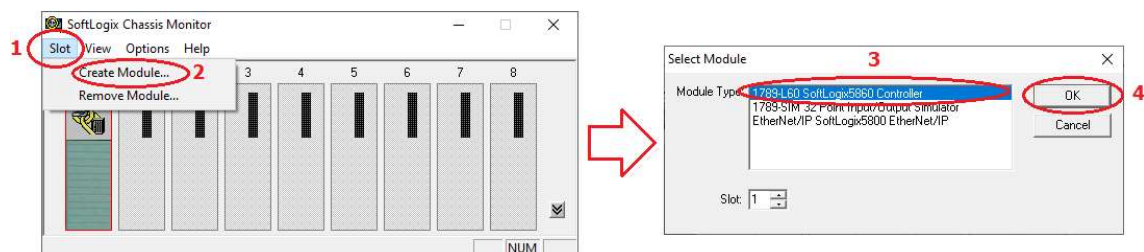
### 3.2.1.2.2 Emulador de PLC

O programa utilizado para emular o controlador lógico programável do sistema de transporte proposto foi o SoftLogix™ 5800 é que controlador virtual baseado na plataforma Logix da Rockwell Automation. A plataforma Logix disponibiliza uma única arquitetura integrada para controle discreto, inversores de frequência, servomecanismos, processos e segurança. Conforme o guia de seleção da Rockwell Automation (1789-SG001H-EN-P, maio/14) o SoftLogix usa a máquina de controle do Logix e ferramentas de desenvolvimento em comum para disponibilizar alta performance e uma ambiente fácil de usar. O SoftLogix dispõe de controles funcionais já utilizados em controladores programáveis com hardware dedicado, encapsulando essas funcionalidades em um programa, tornando possível rodar em um sistema operacional usado comercialmente.

Apesar do SoftLogix poder controlar equipamentos industriais, inclusive com entradas e saídas locais e remotas, além de redes de controle como EtherNet/IP, ControlNet DeviceNet, a aplicação neste trabalho ficará limitada em apenas um computador, onde tanto o emulador da máquina quanto o emulador do CLP estão instalados neste único computador. Porém é possível poder implementar uma arquitetura distribuída, onde o controlador emulado fica em um computador e os emuladores de máquina ficariam em outros computadores dedicados, desta forma dependendo da configuração do computador poderia haver um ganho de performance ao rodar os programas.

A seguir o passo a passo de como o SoftLogix foi configurado neste projeto.

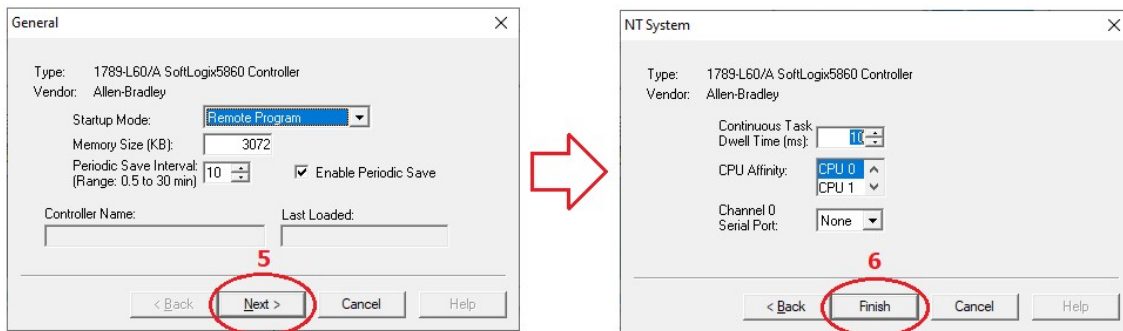
É necessário criar o controlador e a carta de comunicação EtherNet, ambos a serem inseridos no rack virtual, para instalar o controlador deve-se selecionar Slot (1), selecionar Create Module(2), garantir que o módulo 1789-L60 SoftLogix5860 Controller está selecionado(3) e pressionar OK (4), conforme mostrado na figura 26.



**Figura 26: Tela SoftLogix Create Module e Select Module.**  
**Fonte: Programa SoftLogix Rockwell Automation.**

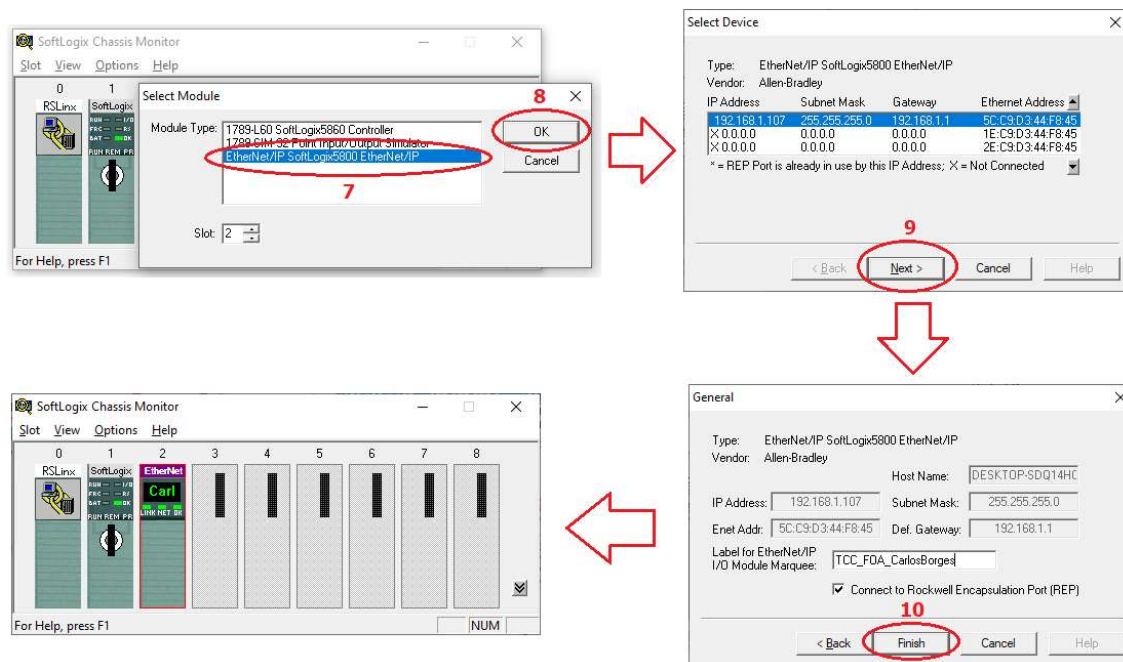
Neste projeto foram utilizadas as configurações por padrão inicial, porém dependendo do tamanho e criticidade do projeto estes parâmetros têm que ser revistos. Para concluir a

inserção do módulo no rack virtual basta clicar em Next (5) e Finish (6), como mostrador na figura 27:



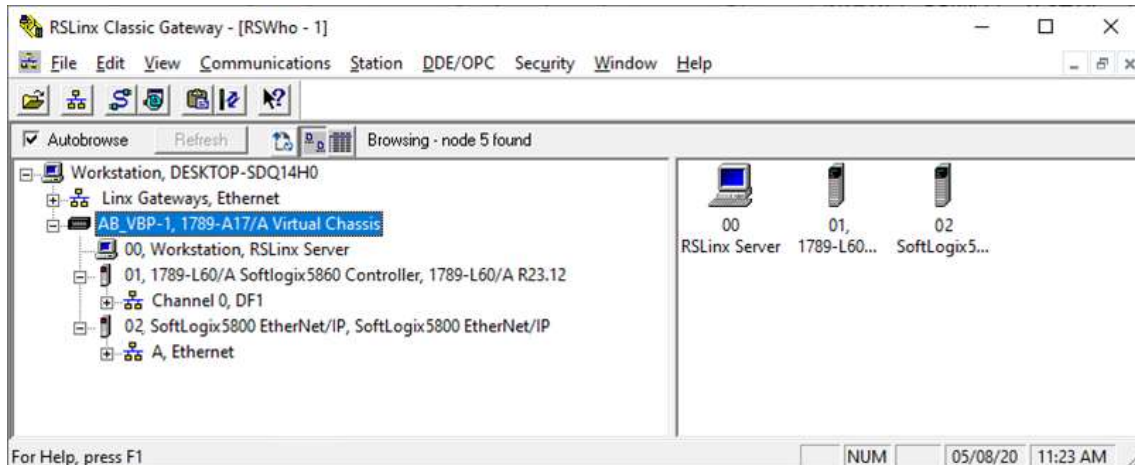
**Figura 27: Tela SoftLogix configurações da CPU.**  
**Fonte: Programa SoftLogix Rockwell Automation.**

O procedimento de inserção da carta de rede Ethernet é muito parecido ao do controlador e da mesma forma foram mantidas as configurações por padrão, a figura 28 mostra a sequência 7, 8, 9 e 10 para finalizar a configuração do emulador de CLP:



**Figura 28: Telas SoftLogix adicionar cartão de comunicação Ethernet.**  
**Fonte: Programa SoftLogix Rockwell Automation.**

Através do programa de comunicação RSLinx pode-se visualizar o rack virtual (figura 29), controlador e carta de rede EtherNet já configurados e funcionando.



**Figura 29: Tela RSLinx RSWho -1, visualização rack virtual.**

**Fonte: Programa RSLinx Rockwell Automation.**

### 3.2.1.2.3 Programa de Desenvolvimento Aplicação CLP.

O programa utilizado para desenvolver a aplicação do CLP foi Studio 5000 Logix Designer® versão 23, esta versão tem que ser compatível com a versão do SoftLogix utilizada. Com o Logix Designer é possível configurar, programar e realizar manutenção de toda a família de controladores da Allen-Bradley Logix 5000™ e dispositivos relacionados.

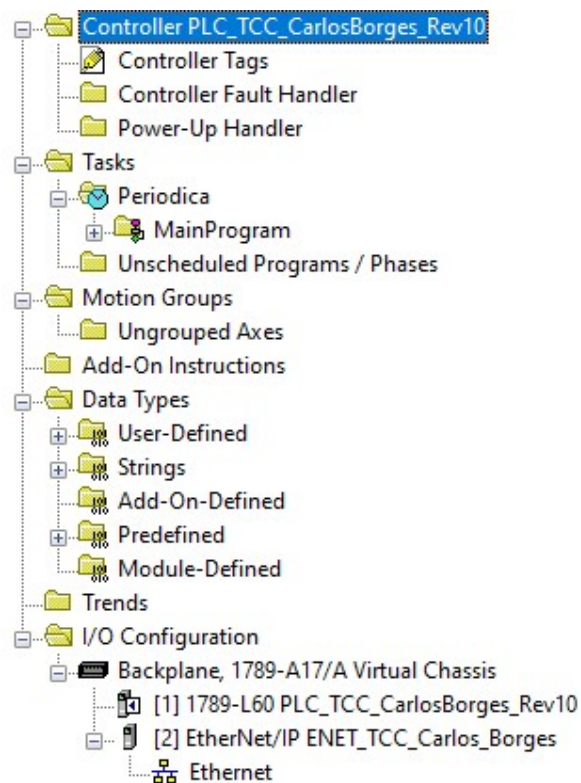
Por ser uma ferramenta vinculada aos controladores Logix, assim seu funcionamento e aplicabilidade está vinculada a forma com que estes controladores funcionam. O princípio de funcionamento do ControlLogix dá-se da seguinte forma:

- O programa é colocado na memória do ControlLogix utilizando-se o software (Logix Designer).
- O programa lógico é baseado no diagrama elétrico a relé (Ladder), bloco de funções (Function Block), SFC (Sequencial Function Chart ou texto estruturado (Structure Text)).
- O conteúdo deste programa são instruções que controlam sua aplicação quando o controlador é passado para o modo de operação (modo RUN).
- Um ciclo de operação é iniciado (ciclo de scan).

Um controlador tem a função de executar comandos programados, ler as entradas, acionar as saídas, trocar dados com outros controladores e comunicar-se com dispositivos remotos.

### 3.2.1.2.3.1 Organização de um Projeto

O sistema operacional do controlador é um sistema multitarefas que está em conformidade com a IEC 61131-3 (FONSECA, M.O. et al), um projeto de ControlLogix é organizado em estruturas de até 32 tarefas, 100 programas por tarefa, e até 32 767 rotinas por programa. Todo o sistema de tarefas trabalha de modo preemptivo, ou seja, somente 1 única tarefa pode ser executada por vez. Além das tarefas, todas as entradas e saídas utilizadas no projeto deverão ser configurados no organizador do controlador, dentro da pasta I/O Configuration, onde haverá um rack (Backplane) e já a sua CPU configurada no início de cada projeto, a arquitetura está ilustrada na figura 30.



**Figura 30: Arquitetura do programa de CLP no Logix Designer.**

**Fonte: Programa Logix Designer Rockwell Automation, aplicação TCC Carlos Borges.**

Este ambiente fornece tarefas (Tasks) para configurar a execução do controlador, onde é a tarefa que fornece o sequenciamento e informações de acordo com a prioridade para um conjunto de um ou mais programas. Se pode configurar as tarefas como contínua, periódica ou de evento. Cada tarefa contém suas próprias rotinas e endereços de memória. Uma vez ativada, todos os programas atribuídos a ela executam na ordem que estiverem listadas no organizador do controlador. Os programas são úteis para projetos desenvolvidos por vários programadores. Durante o desenvolvimento, o código em um programa, que usa os endereços de memória do programa, pode ser duplicado em um segundo programa e minimizar a possibilidade de colisão

dos nomes de endereços (variáveis do projeto). As rotinas contêm o código executável. Cada programa tem uma rotina principal que é a primeira a ser executada dentro de um programa. O uso da instrução JSR (Jump to Subroutine) é necessário para chamar outras sub-rotinas. Se pode também especificar uma rotina de falha do programa opcional. Podemos ter rotinas com linguagem Ladder, Function Block (Bloco de Funções), SFC (Sequencial Function Chart), ou Texto estruturado.

Para o uso de tarefas, programas e rotinas deve-se levar em conta algumas considerações que são mostradas na tabela 1:

|                   | <u>Tarefa</u>  | <u>Programa</u>   | <u>Rotina</u>  |
|-------------------|--|---|--|
| <u>Quantidade</u> | Até 32 tarefas, apenas 1 contínua.   | Até 100 programas por tarefa.   | Até 32767 rotinas por programa.                        |
| <u>Função</u>     | Determina quando as instruções serão executadas  | Organiza um grupo de rotinas que compartilham endereços de memória.                                     | Contém instruções que controlam a máquina ou processo. |
| <u>Use</u>        | Uma tarefa periódica para processos mais lentos ou com operação com base de tempo crítica. Tarefa de evento para operações que precisem de sincronização com um evento específico. | Use programas para isola diferentes programadores. Sequência de operação configurável dentro da tarefa. | Use a linguagem mais adequada ao seu processo.         |

**Tabela 1: Considerações para uso tarefas, programas e rotinas no ControlLogix.  
Fonte: Autor (2020).**

Em relação as tarefas existem diferentes tipos, podendo ser contínua, periódica ou por evento. Onde a tarefa contínua é executada em plano de fundo, sendo que qualquer tempo não alocado pelo controlador é utilizado para executar a tarefa contínua, que é executada o tempo todo. Na tarefa periódica a execução é realizada em um intervalo específico, sempre que o tempo de uma tarefa expira ela interrompe todas as tarefas com prioridade mais baixa, executa uma vez e retorna o comando no ponto em que a tarefa parou. A tarefa tipo evento somente quando um evento específico ocorre, e quando isto acontece a tarefa interrompe todas as outras com prioridade mais baixa, executa uma vez e retorna o comando no ponto que a tarefa parou.

### 3.2.2 Processo

Para demonstração do uso da tecnologia de emulação para desenvolvimento, comissionamento e simulação de cenários em um sistema produtivo virtual, foi desenvolvido um processo composto de três máquinas que produzem um subproduto a ser utilizado em três processos, sendo que cada máquina produz para apenas 1 processo em específico, entre eles está um armazém para garantir que os processos na melhor disponibilidade. Os sistemas de transporte deste subproduto convergem para o mesmo ponto que é uma mesa cruzada que recebe das três linhas respectivas as máquinas, antes de enviar ao elevador em seguida os armazéns. Na figura 31 está ilustrado em detalhes o layout de cada linha de produção.

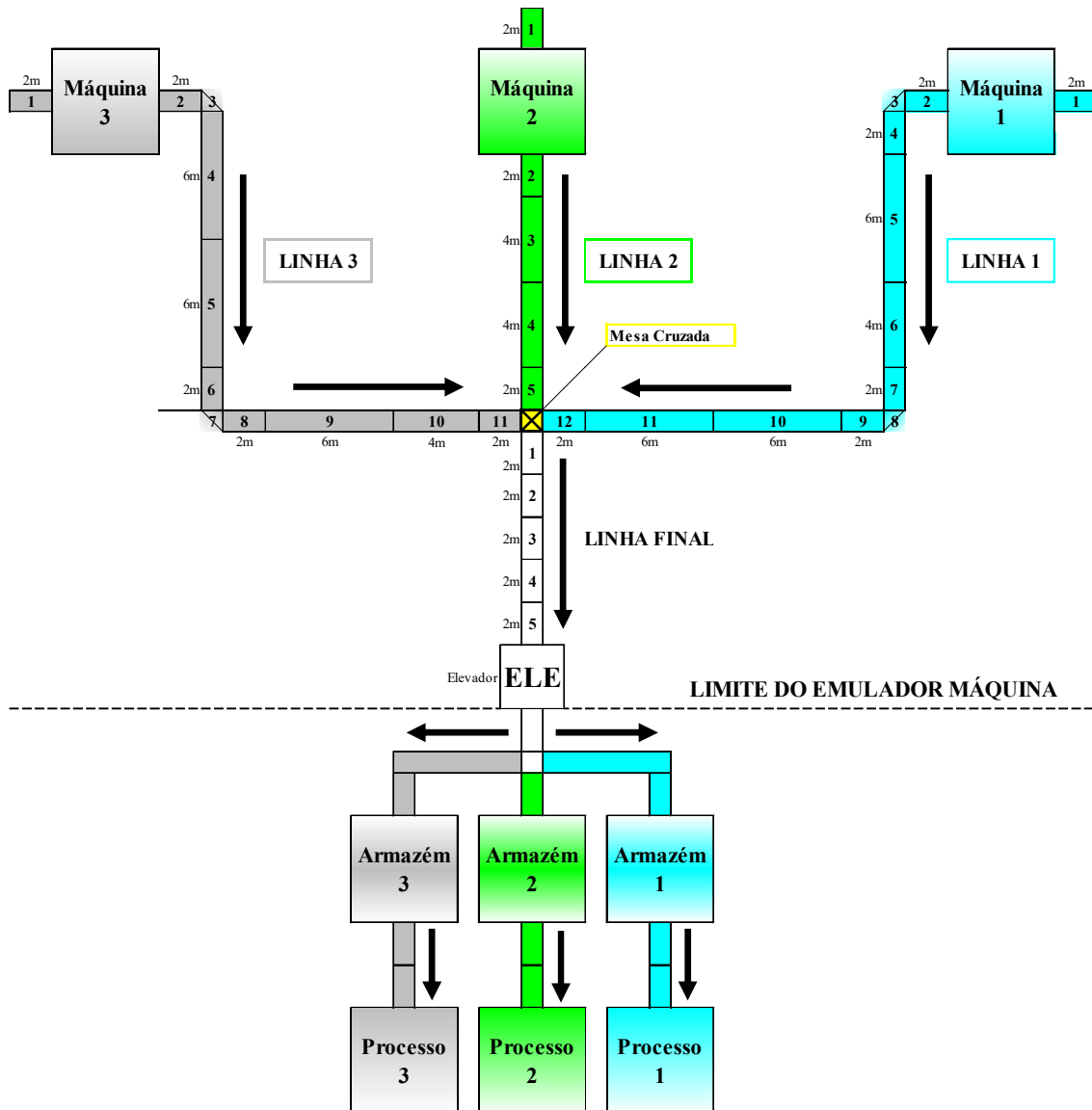


Figura 31: Layout da produção de subprodutos, armazéns e produção de produtos.  
Fonte: Autor (2020).

Como característica importante deste sistema produtivo as máquinas que fornecem o subproduto, podem funcionar de forma contínua ou intermitente, porém os processos que recebem estes subprodutos, funcionam em um regime térmico dependente da continuidade de produção e disponibilidade de peças, portanto eles terão que funcionar de forma contínua ou como batelada de no mínimo 20 peças para garantir a qualidade do produto final e a melhorar a eficiência energética, assim os armazém terão que ter este estoque mínimo para iniciar a produção.

Para as máquinas o tempo de ciclo unitário é o mesmo, visto que são as mesmas máquinas que realizam um trabalho semelhante, ficando a diferença para o tipo de matéria prima (azul, verde e cinza). Nos processos devidos às condições de condutibilidade térmica da matéria prima, o tempo de ciclo além de mais alto é também diferente entre si. Seguem abaixo descritos, os tempos de ciclo de cada máquina e processo.

Tempo de Ciclo

|                      |                       |
|----------------------|-----------------------|
| Máquina 1: 43.0 Seg. | Processo 1: 45.0 Seg. |
| Máquina 2: 43.0 Seg. | Processo 2: 70.0 Seg. |
| Máquina 3: 43.0 Seg. | Processo 3: 55.0 Seg. |

Pode ser observado que há uma sobre capacidade das máquinas em relação aos processos e em sistema produtivo real é assim que deveria ser, portanto os processos deveriam funcionar com uma eficiência muito próxima dos 100%. Para garantir esta eficiência três armazéns, um para cada produto, estão localizados entre as máquinas e o processo, cada um com uma capacidade de armazenar 100 peças.

Considerando o tempo de ciclo e um turno de 12 horas através da fórmula  $((60s/TempoDeCiclo (s)) * 60min) * 12h$ , é possível calcular a capacidade de produção em de cada máquina e processo, conforme abaixo:

Capacidade de Produção, turno de 12 horas

|                 |                 |
|-----------------|-----------------|
| Máquina 1: 1004 | Processo 1: 960 |
| Máquina 2: 1004 | Processo 2: 617 |
| Máquina 3: 1004 | Processo 3: 785 |

### 3.2.3 Programa de Emulação Máquina

O programa utilizado para desenvolver o processo produtivo proposto é o Factory I/O v2.4.2, que é uma plataforma de emulação 3D destinada principalmente a treinamentos, porém mesmo com uma biblioteca limitada há ainda muitas possibilidades para validar projetos de automação e principalmente as lógicas de programação, como consequência diminuindo muito o tempo de comissionamento dos equipamentos.

As principais características deste programa são:

Cenas pré-configuradas: O Factory I/O oferece mais de 20 cenas próximas de equipamentos aplicados na indústria. A figura 32 mostra alguns dos exemplos disponíveis.



**Figura 32: Exemplos de cenas disponíveis no Factory I/O.**

Fonte: <https://docs.factoryio.com/manual/scenes/>

Biblioteca de subconjuntos e dispositivos é limitada, porém contempla muitos subconjuntos e dispositivos como sensores, esteiras transportadoras, mesas de rolos, elevador industrial, máquina de usinagem, máquina de montagem de dois eixos, dentre outros (figura 33). Dando possibilidade para criar as próprias cenas de simulação.



**Figura 33: Exemplos da biblioteca de subconjuntos e dispositivos do Factory I/O.**

Fonte: <https://docs.factoryio.com/manual/parts/>, acesso Maio/2020.

Entradas/saídas digitais e analógicas: Mesmo para um mesmo equipamento como uma esteira transportadora é possível configurar seu comando ou retorno como digital ou analógico, fornecendo mais flexibilidade ao projeto de emulação.

Interfaces com PLC: São muitas as tecnologias que o Factory I/O pode funcionar, dentre os drivers possíveis conforme tabela 2, estão as tecnologias desenvolvidas pelo Rockwell Automation e Siemens. Para este projeto foi utilizado o driver Allen-Bradley Logix 5000 (SoftLogix PAC).

| <i><b>Driver</b></i>           | <i><b>Descrição</b></i>  |
|--------------------------------|--|
| Advantech USB 4750 & USB 4704  | Interface para Advantech USB 4750 e 4704 placas de interface.  |
| <b>Allen-Bradley Logix5000</b> | Conexão Ethernet Allen-Bradley ControlLogix, CompactLogix ou <b>SoftLogix PAC</b> .                    |
| Allen-Bradley Micro800         | Conexão Ethernet Allen-Bradley Micro800 PLC.   |
| Allen-Bradley MicroLogix       | Conexão Ethernet Allen-Bradley MicroLogix PLC.   |
| Allen-Bradley SLC 5/05         | Conexão Ethernet Allen-Bradley SLC-5/05 PLC.   |
| Automgen Server                | Interface para Automgen através de um servidor TCP/IP.   |
| Control I/O                    | Interface para Controle de Entradas e Saídas: marca independente SoftPLC projetada para o Factory I/O. |
| MHJ                            | Interface para WinPLC-Engine e programa WinSPS-S7.   |
| Modbus TCP/IP Client           | Implementa um cliente Modbus TCP/IP.   |
| Modbus TCP/IP Server           | Implementa um servidor Modbus TCP/IP.  |
| OPC Client DA/UA               | Implementa um cliente OPC DA/UA.   |
| Siemens LOGO!                  | Conexão Ethernet para Siemens LOGO! Logic Module.  |
| Siemens S7-200/300/400         | Conexão Ethernet Siemens S7-200/S7-200 SMART/300/400 PLC.  |
| Siemens S7-1200/1500           | Conexão Ethernet Siemens S7-1200/1500 PLC.   |
| Siemens S7-PLCSIM              | Interface for Siemens S7-PLCSIM.   |

**Tabela 2: Drivers disponíveis para comunicação do Factory I/O.**

Fonte: <https://docs.factoryio.com/manual/drivers/>, acesso Maio/2020.

### 3.2.3.1 Equipamentos Utilizados

Neste projeto foram utilizados muitos equipamentos da biblioteca do Factory I/O, com o objetivo de demonstrar o máximo possível a capacidade de emulação deste programa com o PLC da máquina. Seguem os equipamentos utilizados:

- Matéria prima figura 34 das linhas 1 (azul), 2 (verde) e 3 (Cinza).



Figura 34: Matéria prima utilizada do emulador Factory I/O.

Fonte: <https://docs.factoryio.com/manual/parts/items/>

- Na figura 35 a esteira transportadora de 2 metros, velocidade variável  $\pm 3\text{m/s}$ , comando tipo analógico variando  $\pm 10$ .

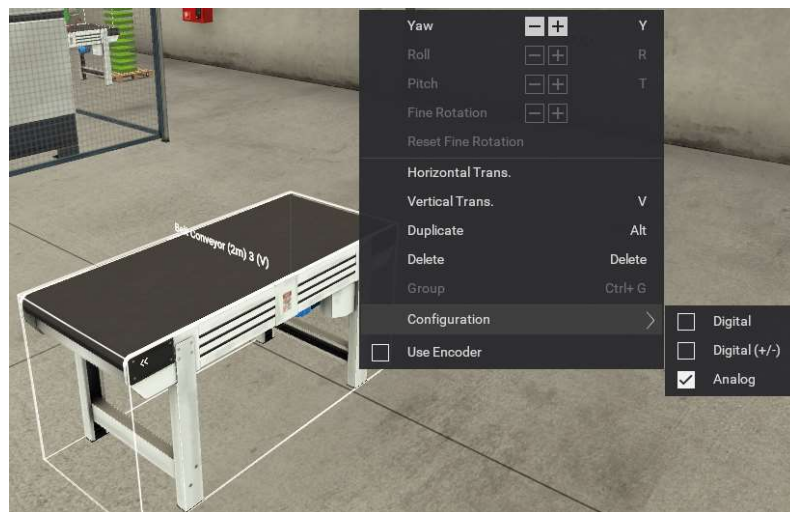
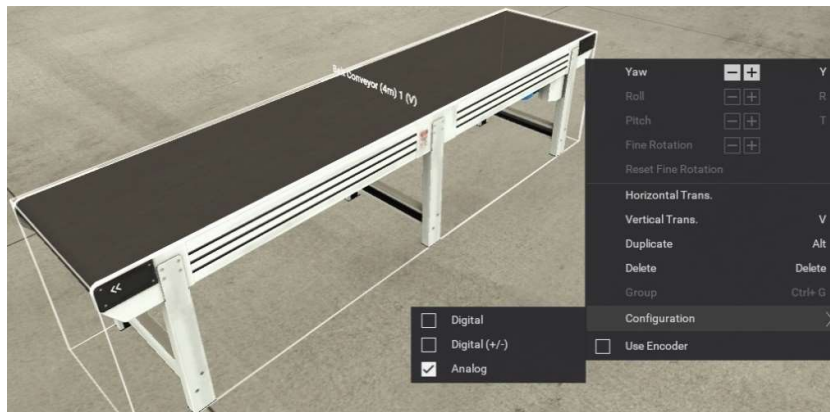


Figura 35: Programa Factory I/O, esteira transportadora de 2 metros.

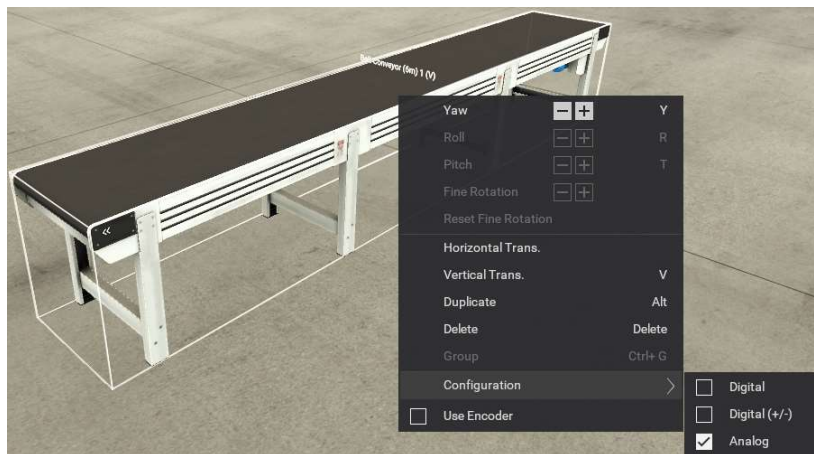
Fonte: Programa Factory I/O.

- Na figura 36 a esteira transportadora de 4 metros, velocidade variável  $\pm 3\text{m/s}$ , comando tipo analógico variando  $\pm 10$ .



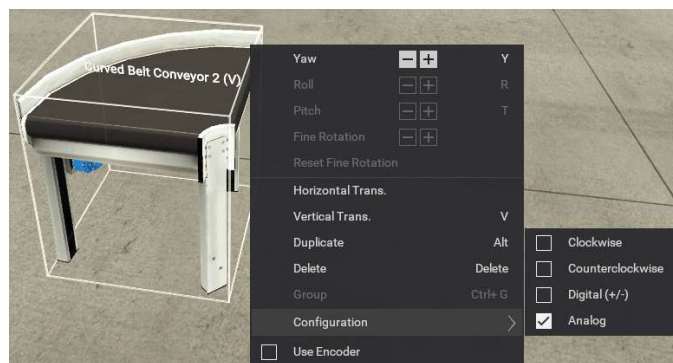
**Figura 36: Programa Factory I/O, esteira transportadora de 4 metros.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

- Na figura 37 a esteira transportadora de 6 metros, velocidade variável  $\pm 3\text{m/s}$ , comando tipo analógico variando  $\pm 10$ .



**Figura 37: Programa Factory I/O, esteira transportadora de 6 metros.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

- Na figura 38 a esteira transportadora curva, velocidade variável  $\pm 3\text{m/s}$ , comando tipo analógico variando  $\pm 10$ .



**Figura 38: Programa Factory I/O, esteira transportadora curva.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

- Máquina Centro de usinagem (figura 39), é usada para fabricar tampas e bases a partir da matéria prima. Primeiramente o robô espera pela matéria prima a ser colocada na baia de entrada. Quando um novo material é detectado, este é carregado na máquina CNC, e ela irá começar a fabricar o item. O tempo de fabricação é diferente para cada item sendo 6 segundos para as tampas e 3 segundos para a base, uma vez completo o ciclo o robô pega a peça pronta e a posiciona na baia de saída.



**Figura 39: Programa Factory I/O, máquina Centro de usinagem.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

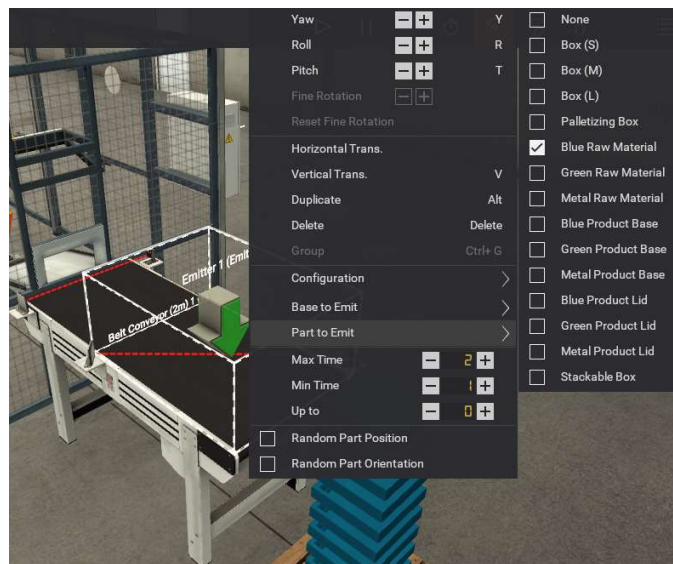
A operação de produção pode ser interrompida a qualquer momento e reiniciada, é possível interagir com a máquina de usinagem através de painel de comando ao lado da porta de segurança, os comandos disponíveis neste painel são:

- Emergência (Emergency): Se acionada, interrompe o movimento do robô e do CNC, para que a máquina volte a funcionar a emergência deve ser liberada e o botão de rearme pressionado.
- Partir (Start): Inicia ou reinicia o ciclo da máquina.
- Parar (Stop): Interrompe o movimento do braço articulado do robô.
- Rearme (Reset): Rearma ou reinicia a máquina.

Dois colunas luminosas estão alocadas no topo do cercado de segurança, elas informam o status atual da máquina que são:

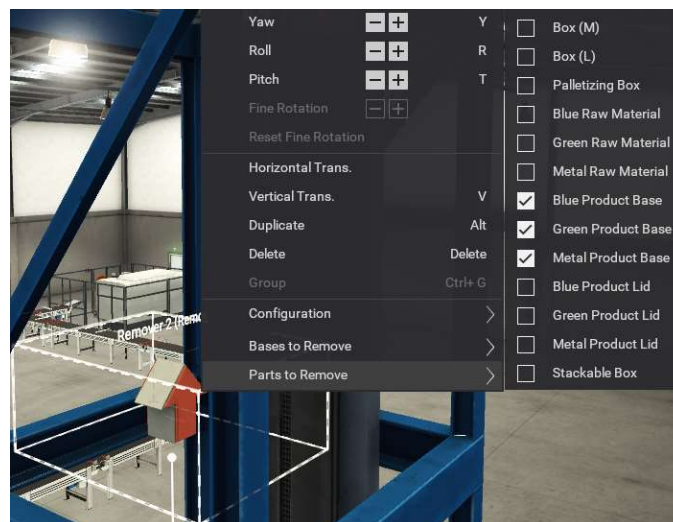
- Luz Verde: não ocupada
- Luz Amarela: ocupada
- Luz Vermelha: em falha (item incorreto na baia de entrada)

- Emissor (Emitter) ilustrado na figura 40, disponibiliza um item a ser usado na cena (ex. caixa de papelão, pallet etc.). Enquanto um item está ainda dentro do emissor, não é possível inserir mais itens. Há muitas opções de configuração como qual parte emitir, o tempo entre emissões, o número de itens a emitir e ainda se a posição/orientação será de forma aleatória. É possível habilitar e desabilitar o emissor por endereço binário vinculado ao PLC.



**Figura 40: Programa Factory I/O, emissor de produto.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

- Este componente (Remover) ilustrado na figura 41, remove um ou mais itens da cena (ex. caixa de papelão, pallet, tampa de produto etc.) quando estes itens interceptam o volume interno do componente. É possível habilitar e desabilitar o emissor por endereço binário vinculado ao CLP.



**Figura 41: Programa Factory I/O, removedor de produto.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

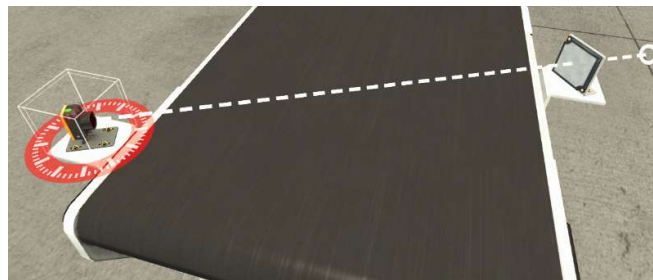


- Na figura 42 o elevador de carga, usado para transportar todos os tipos de carga entre andares. O Elevador é equipado com dois sensores fotoelétricos, localizados nos limites da mesa de rolos. O elevador pode ser controlado digitalmente ou analogamente, de acordo com a configuração seleccionada.

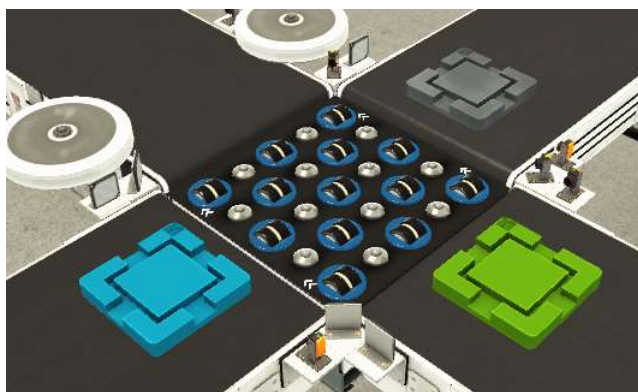
- Raio do Rolo: 45 mm
- Deslocamento vertical: 7 m
- Velocidade vertical: 0.68 m/s
- Velocidade máxima mesa de rolos: 0.45 m/s (digital); 0.8 m/s (analógico)
- Sensor Fotoelétrico LED: verde (feixe interrompido), amarelo (feixe não interrompido)

**Figura 42: Programa Factory I/O, elevador.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

- Os sensores são utilizados para detectar a presença de peças, em todos é possível ajustar o ângulo do feixe rotacionando o sensor em seu eixo. O alcance do feixe também pode ser ajustado. A figura 43 demonstra os tipos de ajuste.



**Figura 43: Programa Factory I/O, sensor presença de peças.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**



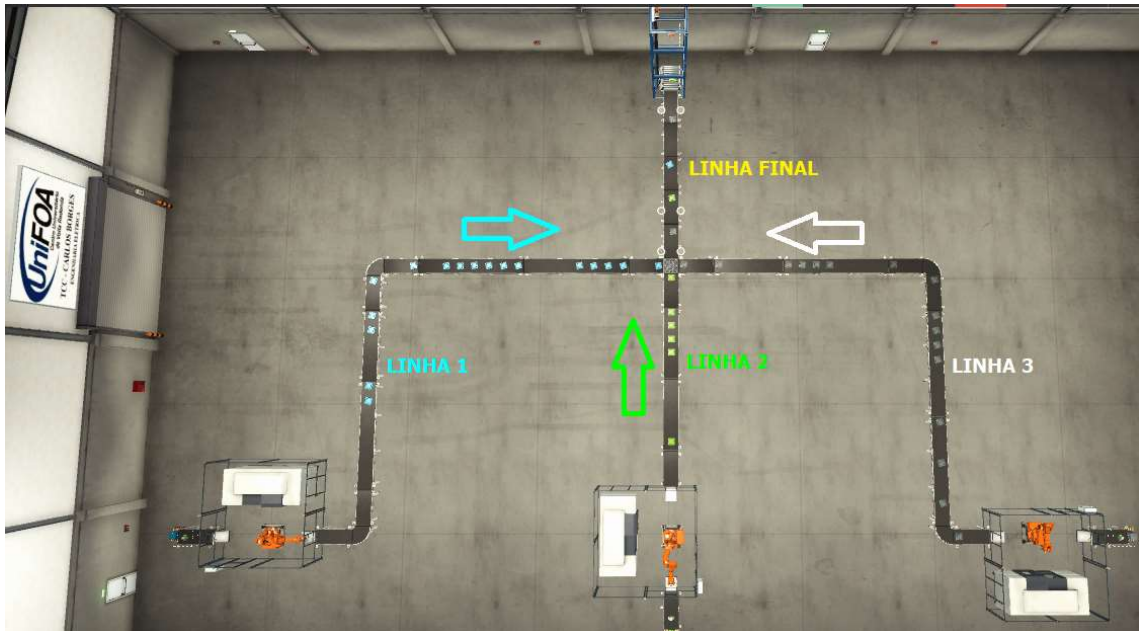
**Figura 44: Programa Factory I/O, mesa cruzada.**  
**Fonte: Programa Factory I/O.**

- Na figura 44 a mesa Cruzada (Pop-Up Wheel Sorter): Uma mesa de rolos motorizados e roletes livres, podem receber produtos de diferentes direções.

- Diâmetro da Roda: 0.05 m
- Velocidade: 1.5 m/s
- Posição inicial centrada
- Distancia rodas: 0.003 m

### 3.2.3.2 Layout Sistema Simulado

Conforme demonstrado na seção 3.2.2, o sistema ficou limitado até o elevador, assim o armazém e o processo não fazem parte da emulação. Isto se deve ao limite do próprio emulador Factory I/O, pois está limitado “fisicamente” ao prédio de cada cena. Na figura 45 está o layout do sistema de produção no emulador.



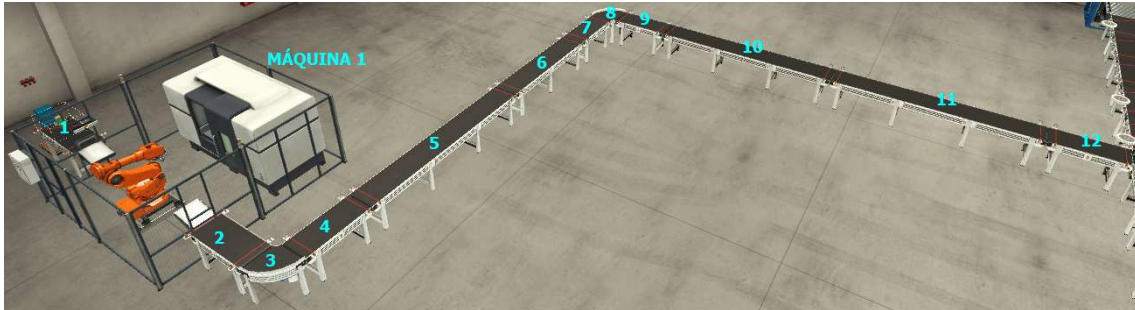
**Figura 45: Layout do sistema de produção no emulador.**  
**Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).**

Na figura 46 é possível verificar em perspectiva a visão das máquinas, equipamentos e elevador.



**Figura 46: Visão das máquinas, equipamentos e elevador em perspectiva no simulador.**  
**Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).**

Na figura 47 o detalhe da LINHA 1, as numerações indicam a ordem das esteiras.



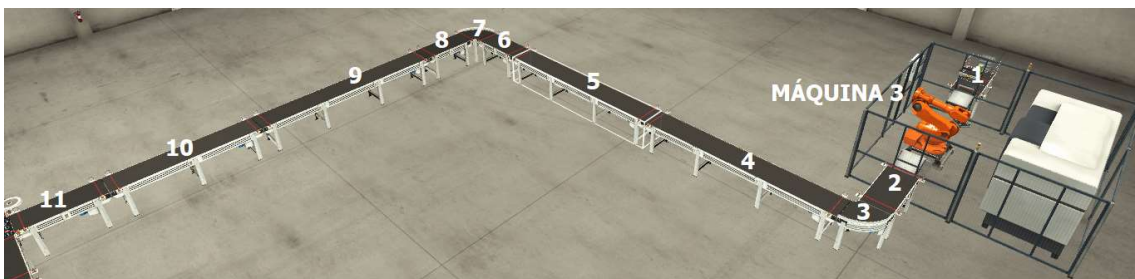
**Figura 47: Detalhe da linha 1 no emulador.**  
Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).

Na figura 48 o detalhe da LINHA 2, as numerações indicam a ordem das esteiras.

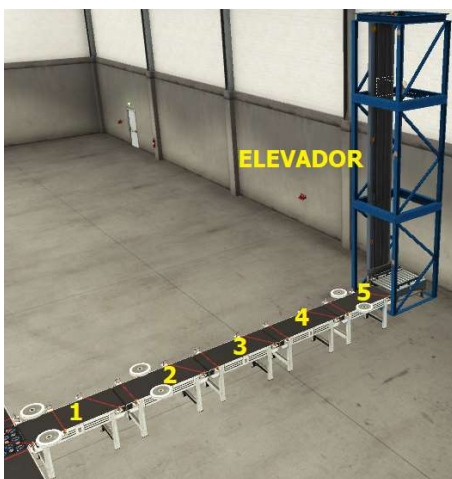


**Figura 48: Detalhe da linha 2 no emulador.**  
Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).

Na figura 49 o detalhe da LINHA 3, as numerações indicam a ordem das esteiras.



**Figura 49: Detalhe da linha 3 no emulador.**  
Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).



Na figura 50 o detalhe da LINHA FINAL, as numerações indicam a ordem das esteiras e elevador industrial que enviar os produtos semiacabados para os processos.

**Figura 50: Detalhe da linha final no emulador.**  
Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).

### 3.2.3.3 Configuração do Emulador

O driver utilizado para o emulador neste projeto foi o Allen-Bradley Logix5000, com ele é possível realizar a comunicação Ethernet com controladores da família Logix da Rockwell Automation como o ControlLogix, CompactLogix SoftLogix PAC que é o utilizado neste trabalho.

Cada ponto de entrada/saída representa um endereço de memória no CLP (ex SIMUL\_E\_B\_0). Os endereços de memória são organizados em grupos de tipo de dado que são Bool para booleano, Float para ponto flutuante e Int para inteiros, além de serem separados em entradas e saídas, para cada grupo pode-se configurar o Prefix para cada ponto criado (ex. SIMUL\_E\_F\_10), o Offset que é o deslocamento da numeração final do endereço de memória e o Count que a quantidade de pontos para cada grupo de tipo de dado. Há um limite máximo para cada grupo de endereço de memória que são 256 para booleanos de entrada, 256 para booleanos de saída, 64 para pontos flutuante de entrada, 64 para pontos flutuante de saída, 64 para inteiros de entrada e 64 para inteiros de saída.

A configuração de Host é o endereço da placa de rede Ethernet que está vinculado ao CLP (PLC), o Slot/Path no caso deste projeto é a posição física ou lógica (emulador) do controlador no rack. Na figura 51 as configurações que foram utilizadas neste projeto.

The screenshot shows the configuration interface for the emulador. On the left, a list of PLC models is shown, with 'Allen-Bradley Logix5000' selected. On the right, the 'PLC' configuration section is visible, including an 'Auto connect' checkbox, a 'Host' field with the value '192.168.1.107', and a 'Slot / Path' field with the value '1'. Below this, the 'I/O Points' section is shown, which is a table with columns for 'Prefix', 'Offset', and 'Count'.

|               | Prefix     | Offset | Count |
|---------------|------------|--------|-------|
| Bool Inputs   | Simul_E_B_ | 0      | 72    |
| Bool Outputs  | Simul_S_B_ | 0      | 27    |
| Float Inputs  | Simul_E_F_ | 0      | 1     |
| Float Outputs | Simul_S_F_ | 0      | 34    |
| Int Inputs    | Simul_E_N_ | 0      | 3     |
| Int Outputs   | Simul_S_N_ | 0      | 0     |

**Figura 51: Configurações de comunicação utilizadas no emulador.**  
**Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).**

Para este projeto os nomes por padrão dos endereços de memória foram alterados com intuito de melhorar a compreensão em português. Segue na figura 52 a configuração e o formato destes endereços.

Exemplo: SIMUL\_E\_B\_0

- SIMUL\_ – Nome inicial com menção ao simulador.

E\_ – Indica se é entrada E ou saída S.

B\_ – Indica o tipo de dado B para booleano, F para ponto flutuante e N para inteiro.

0 – Indica o número após o prefixo (ex. SIMUL\_E\_B\_).



**Figura 52: Alocação endereços de memória dos sensores e atuadores do emulador.**

**Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).**

### 3.2.4 Programa da Máquina

No desenvolvimento do programa foram criados padrões para a estrutura de dados, rotinas e lógica, assim será descrito neste trabalho como foi organizado cada um destes padrões, porém nem todas as rotinas serão descritas.

Ao final do desenvolvimento o programa continha 47 sub-rotinas, 865.248 bytes de ocupados de memória no CLP, 76 entradas (digitais e analógicas) e 61 saídas (digitais e analógicas).

#### 3.2.4.1 Estrutura de Dados

Para a estrutura de dados foram criados tipo de dados para cada equipamento, assim na replicação ou alteração das lógicas e endereços de memória foi possível garantir o padrão de nomenclatura exatamente o mesmo para todo o programa. Neste contexto foram criadas seis estruturas de dados que serão explicadas a seguir.

##### Estrutura de dados Elevador.

Na tabela 03 contempla todos os endereços de memória e suas funções.

| Nome                 | Tipo de Dado   | Descrição  |
|----------------------|----------------|--|
| Passo                | SFC_STEP[15]   | Lógica de Passo de Sequenciamento                              |
| Acao                 | SFC_ACTION[40] | Ação Lógica de Passo   |
| Transicao            | BOOL[32]       | Transição Lógica de Passo                                      |
| I_FotoEntrada        | BOOL           | Fotocélula de Entrada da Esteira                               |
| I_FotoSaida          | BOOL           | Fotocélula de Saída da Esteira                                 |
| I_Posicao            | REAL           | Entrada Posição Elevador                                       |
| TipoProduto          | INT            | Tipo do Produto Azul =1, Verde = 2 e Cinza =3                  |
| AutorRecebimento     | BOOL           | Autorização para Receber Produto da Esteira Anterior           |
| RecebimentoOK        | BOOL           | Recebimento de Produto OK da Esteira Anterior                  |
| PedidoEnvio          | BOOL           | Pedido de Envio Produto para Próxima Esteira                   |
| FinalizarRecebimento | BOOL           | Finalizar Recebimento, Autoriza Movimento até o Fim da Esteira |
| O_Ligar_Frente       | BOOL           | Saída Ligar Rolos do Elevador para Frente                      |
| O_Ligar_Tras         | BOOL           | Saída Ligar Rolos do Elevador para Frente                      |
| O_Prod_Remover       | BOOL           | Remover Produto  |
| O_Posicao            | REAL           | Saída Posição Elevador   |

**Tabela 3: Estrutura de dados elevador.**

**Fonte: Autor (2020).**

Em todo tipo de dado que é demonstrado entre colchetes (BOOL[32]), o valor interno indica o tamanho desta estrutura.

Em todas as estruturas quando o início do endereço começar com I\_ significa uma entrada física que será posteriormente copiada a ela, quando começar com O\_ significa uma saída física que será posteriormente copiada para ela.

Existem regras para criação dos endereços de memória por isso, não há acentuação nos nomes. Da mesma forma os nomes dos endereços procuram ser sugestivos com o intuito de minimizar a necessidade de comentários específicos para cada componente.

#### Estrutura de dados Esteira.

Para todas as esteiras não importando o tipo (curva, 2 metros, 4 metros ou 6 metros) a estrutura de dados é exatamente a mesma. Conforme tabela 4:

| Nome                 | Tipo de Dado   | Descrição  |
|----------------------|----------------|--|
| Passo                | SFC_STEP[15]   | Lógica de Passo de Sequenciamento Funcionalidades Esteira      |
| Acao                 | SFC_ACTION[40] | Ação Lógica de Passo   |
| Transicao            | BOOL[32]       | Transição Lógica de Passo                                      |
| I_FotoEntrada        | BOOL           | Fotocélula de Entrada da Esteira                               |
| I_FotoSaida          | BOOL           | Fotocélula de Saída da Esteira                                 |
| TipoProduto          | INT            | Tipo do Produto Azul =1, Verde = 2 e Cinza =3                  |
| AutorRecebimento     | BOOL           | Autorização para Receber Produto da Esteira Anterior           |
| RecebimentoOK        | BOOL           | Recebimento de Produto OK da Esteira Anterior                  |
| PedidoEnvio          | BOOL           | Pedido de Envio Produto para Próxima Esteira                   |
| FinalizarRecebimento | BOOL           | Finalizar Recebimento, Autoriza Movimento até o Fim da Esteira |
| PresetQtProduto      | INT            | Preset Quantidade de Produto Possível na Esteira               |
| RefVelocidade        | REAL           | Referência de Velocidade Esteira                               |
| O_Ref_Vel            | REAL           | Saída Referência de Velocidade Esteira                         |

**Tabela 4: Estrutura de dados esteira.**

**Fonte: Autor (2020).**

#### Estrutura de dados Máquinas.

Da mesma forma como nas esteiras as máquinas utilizam da mesma estrutura de dados. Conforme tabela 5:

| Nome              | Tipo de Dado   | Descrição                           |
|-------------------|----------------|-------------------------------------|
| Passo             | SFC_STEP[15]   | Lógica de Passo de Sequenciamento   |
| Acao              | SFC_ACTION[40] | Ação Lógica de Passo                |
| Transicao         | BOOL[32]       | Transição Lógica de Passo           |
| I_Aberta          | BOOL           | Máquina Aberta                      |
| I_Ocupada         | BOOL           | Máquina Ocupada                     |
| I_EmFalha         | BOOL           | Máquina em Falha                    |
| I_Progresso       | INT            | Máquina Processando                 |
| AutorRecebimento  | BOOL           | Autorização para Receber Produto    |
| O_Pedir_Produto   | BOOL           | Pedir Produto na Esteira de Entrada |
| O_Parar           | BOOL           | Parar Máquina                       |
| O_Reset           | BOOL           | Reset Falhas Máquina                |
| O_Partir          | BOOL           | Partir Máquina                      |
| O_Produzir_Tampas | BOOL           | Mudar Processo para Produzir Tampas |

**Tabela 5: Estrutura de dados máquinas.**

**Fonte: Autor (2020).**

### Estrutura de dados Mesa Cruzada.

Apesar de haver apenas uma mesa cruzada no sistema, para manter a padronização foi criada também uma estrutura de dados para ela. Conforme tabela 6:

| Nome                 | Tipo de Dado   | Descrição  |
|----------------------|----------------|--|
| Passo                | SFC_STEP[40]   | Lógica de Passo de Sequenciamento Funcionalidades Esteira      |
| Acao                 | SFC_ACTION[40] | Ação Lógica de Passo   |
| Transicao            | BOOL[64]       | Transição Lógica de Passo                                      |
| I_Fotocelula_1       | BOOL           | Fotocélula 1 de Presença na Mesa Cruzada                       |
| I_Fotocelula_2       | BOOL           | Fotocélula 1 de Presença na Mesa Cruzada                       |
| Sequencia            | BOOL[32]       | Sequencia Linha Conforme Lógica de Prioridade                  |
| TipoProduto          | INT            | Tipo do Produto Azul =1, Verde = 2 e Cinza =3                  |
| AutorRecebimento     | BOOL[32]       | Autorização para Receber Produto da Esteira Anterior           |
| RecebimentoOK        | BOOL[32]       | Recebimento de Produto OK da Esteira Anterior                  |
| PedidoEnvio          | BOOL           | Pedido de Envio Produto para Próxima Esteira                   |
| FinalizarRecebimento | BOOL           | Finalizar Recebimento, Autoriza Movimento até o Fim da Esteira |
| RefVelocidade        | REAL           | Referência de Velocidade Esteira                               |
| O_Rodar_Frente       | BOOL           | Saida Ligar Rolos Para Frente                                  |

**Tabela 6: Estrutura de dados mesa cruzada.**

**Fonte: Autor (2020).**

### Estrutura de dados Produção.

Esta estrutura de dados não faz parte do funcional da máquina, foi criada para coletar dados de produção que podem ser utilizados para compreender o comportamento do sistema.

Conforme tabela 7:

| Nome       | Tipo de Dado | Descrição                                  |
|------------|--------------|--|
| Ano        | INT          | Dados de Produção: Ano                     |
| Dia        | INT          | Dados de Produção: Dia                     |
| Mês        | INT          | Dados de Produção: Mes                     |
| Hora       | INT          | Dados de Produção Hora                     |
| Minuto     | INT          | Dados de Produção Minuto                   |
| ProducaoP1 | INT[4]       | Dados de Produção Processo Montante        |
| Armazem    | INT[4]       | Dados de Produção: Armazem Entre Processos |
| ProducaoP2 | INT[4]       | Dados de Produção Processo Jusante         |

**Tabela 7: Estrutura de dados produção.**

**Fonte: Autor (2020).**

### Estrutura de dados Linha.

Esta estrutura agrupa outras três estruturas dos equipamentos, com isso o número de endereços de memórias criados é menor e a eficiência para manter o padrão do programa é melhor. Conforme tabela 8:

| Nome     | Tipo de Dado               | Descrição                      |
|----------|----------------------------|--------------------------------|
| Maquina  | EstruturaDados_Maquina     | Estrutura de Dados da Maquina  |
| Esteira  | EstruturaDados_Esteira[20] | Estrutura de Dados da Esteira  |
| Elevador | EstruturaDados_Elevador    | Estrutura de Dados do Elevador |

**Tabela 8: Estrutura de dados linha.**

**Fonte: Autor (2020).**

Conforme já mencionado as estruturas de dados diminuem o número de endereços de memórias declarados, no caso deste projeto a maior parte dos endereços foram declarados no escopo do programa, também mantém o padrão na estrutura do programa para todos os equipamentos. Conforme mostrado na figura 53, para todas as linhas e equipamentos foi declarado apenas um endereço chamado Linha com estrutura de dados Linha e tamanho 4, assim todos os endereços utilizados no programa já estão declarados conforme os respectivos equipamentos. Para exemplificar o comando de referência de velocidade da esteira 4 na linha 2 ficaria com a declarada como Linha[2].Esteira[4].O\_Ref\_Vel, e todas as outras esteiras ficariam declarada exatamente com o mesmo formato. A figura 53 demonstra como os endereços foram declarados diretamente no programa de desenvolvimento.

| Name                           | Value     | Data Type                  | Description  |
|--------------------------------|-----------|----------------------------|--|
| [-] Linha                      | { ... }   | EstruturaDados_Linha[4]    |  |
| + Linha[0]                     | { ... }   | EstruturaDados_Linha       |  |
| [-] Linha[1]                   | { ... }   | EstruturaDados_Linha       |  |
| + Linha[1].Maquina             | { ... }   | EstruturaDados_Maquina     |  |
| + Linha[1].Esteira             | { ... }   | EstruturaDados_Esteira[20] |  |
| + Linha[1].Elevador            | { ... }   | EstruturaDados_Elevador    |  |
| [-] Linha[2]                   | { ... }   | EstruturaDados_Linha       |  |
| + Linha[2].Maquina             | { ... }   | EstruturaDados_Maquina     |  |
| + Linha[2].Esteira             | { ... }   | EstruturaDados_Esteira[20] |  |
| + Linha[2].Elevador            | { ... }   | EstruturaDados_Elevador    |  |
| [-] Linha[3]                   | { ... }   | EstruturaDados_Linha       |  |
| + Linha[3].Maquina             | { ... }   | EstruturaDados_Maquina     |  |
| + Linha[3].Esteira             | { ... }   | EstruturaDados_Esteira[20] |  |
| + Linha[3].Elevador            | { ... }   | EstruturaDados_Elevador    |  |
| [-] MesaCruzada                | { ... }   | EstruturaDados_MesaCruzada |  |
| + MesaCruzada.Passo            | { ... }   | SFC_STEP[40]               | Lógica de Passo de Sequenciamento Funcionalidades Esteira      |
| + MesaCruzada.Acao             | { ... }   | SFC_ACTION[40]             | Ação Lógica de Passo   |
| + MesaCruzada.Transicao        | { ... }   | BOOL[64]                   | Transição Lógica de Passo                                      |
| MesaCruzada_I_Fotocelula_1     | 1         | BOOL                       | Fotocélula 1 de Presença na Mesa Cruzada                       |
| MesaCruzada_I_Fotocelula_2     | 1         | BOOL                       | Fotocélula 1 de Presença na Mesa Cruzada                       |
| + MesaCruzada.Sequencia        | { ... }   | BOOL[32]                   | Sequencia Linha Conforme Lógica de Prioridade                  |
| + MesaCruzada.TipoProduto      | 0         | INT                        | Tipo do Produto Azul =1, Verde = 2 e Cinza =3                  |
| + MesaCruzada.AutorRecebimento | { ... }   | BOOL[32]                   | Autorização para Receber Produto da Esteira Anterior           |
| + MesaCruzada.RecebimentoOK    | { ... }   | BOOL[32]                   | Recebimento de Produto OK da Esteira Anterior                  |
| MesaCruzada.PedidoEnvio        | 0         | BOOL                       | Pedido de Envio Produto para Próxima Esteira                   |
| MesaCruzada.FinalizarRecebe... | 0         | BOOL                       | Finalizar Recebimento, Autoriza Movimento até o Fim da Esteira |
| MesaCruzada.RefVelocidade      | 2.5925925 | REAL                       | Referência de Velocidade Esteira                               |
| MesaCruzada.O_Rodar_Frente     | 0         | BOOL                       | Saida Ligar Rolos Para Frente                                  |
| MesaCruzada.O_Rodar_Tras       | 0         | BOOL                       | Saida Ligar Rolos Para Tras                                    |
| MesaCruzada.O_Direcionar_Esq   | 0         | BOOL                       | Saida Direcionar Rolos para Esquerda                           |
| MesaCruzada.O_Direcionar_Dir   | 0         | BOOL                       | Saida Direcionar Rolos para Direita                            |

**Figura 53: Exemplo endereços de memória declarados no projeto do CLP.**

**Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges.**

Estruturando o programa desta forma simplifica-se muito a leitura e a resolução de problemas, também a necessidade de comentários se torna dispensada, pois o próprio nome do endereço é autoexplicativo.

#### 3.2.4.2 Lógica

De acordo com a norma IEC 61131-3, para desenvolvimento deste programa foram utilizadas as linguagens Ladder, SFC e Texto Estruturado nas lógicas de animação dos equipamentos e de simulação dos armazéns e processo.

A padronização das lógicas de programa foi definida de acordo com o tipo do equipamento como Máquinas de Usinagem, Esteiras, Elevador e Mesa Cruzadas, nos capítulos a seguir será explicado a estrutura das rotinas de programa e a lógica de cada

##### 3.2.4.2.1 Organização das Rotinas do Programa

No ControlLogix a varredura do programa é feita a partir da rotina principal, assim as outras sub-rotinas são chamadas através da instrução de programa JSR (Jump to Sub-Routine), desta forma é possível organizar as chamadas de sub-rotinas através da própria lógica do programa, inclusive inserindo condições para a chamar ou não uma determinada sub-rotina. Este conceito é muito útil para definir a prioridade de varredura e até mesmo otimizar o processamento do programa chamando as sub-rotinas e as incluindo na varredura apenas quando forem necessárias.

O programa de CLP contém além da rotina principal, mais 46 sub-rotinas sendo 9 programadas em Ladder e 37 em SFC que estão descritas a seguir, a organização está conforme a ordem de varredura no programa de CLP:

##### *A00\_Principal (Ladder):*

Rotina principal que a única processada pelo controlador, a estrutura de chamada das sub-rotinas deve ser a partir desta rotina.

##### *└ A01\_ResetPassos (Ladder):*

Lógicas para reiniciar todos os dados e sequencias armazenadas na memória do controlador

##### *└ A02\_TempoDeCiclo (Ladder):*

Lógicas para medir o tempo de ciclo de alguns equipamentos como as máquinas e elevador.

##### *└ A03\_Producao (Ladder):*

Lógicas para armazenar os dados de produção como data, hora, produção, quantidade armazenada.

└ *A04\_Entradas (Ladder):*

Contém a cópia de todas as entradas (sensores, status, etc) do simulador.

└ *A11\_MesaCruzada\_LogicaPrioridade (Ladder):*

Lógica não otimizada da mesa cruzada, nesta o produto que chegar primeiro sai primeiro.

└ *A12\_MesaCruzada\_LogicaOtimizada (Ladder):*

Lógica otimizada da mesa cruzada, nesta a quantidade no armazém é utilizada para determinar a prioridade de recepção de produtos das linhas.

└ *A10\_MesaCruzada (SFC):*

Lógicas de animação mesa cruzada, esta recebe produtos das 3 linhas e envia para a linha final.

└ *Linha\_0\_Esteira\_01\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 1 da linha final

└ *Linha\_0\_Esteira\_02\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 2 da linha final.

└ *Linha\_0\_Esteira\_03\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 3 da linha final.

└ *Linha\_0\_Esteira\_04\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 4 da linha final.

└ *Linha\_0\_Esteira\_05\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 5 da linha final.

└ *Linha\_0\_Elevador (SFC):*

Lógicas de animação do elevador da linha final

└ *Linha\_1\_aMaquina\_1 (SFC):*

Lógica de seguimento das sequencias de funcionamentos da máquina 1 na linha 1, como o funcionamento desta máquina é feito pelo emulador o programa de CLP segue os status e autoriza o início do ciclo.

└ *Linha\_1\_Esteira\_01\_EntradaMaquina (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 1 da linha 1, esta é a esteira de entrada da máquina.

└ *Linha\_1\_Esteira\_02\_SaidaMaquina (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 2 da linha 1, esta é a esteira de saída da máquina.

└ *Linha\_1\_Esteira\_03\_Curva (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 3 da linha 1, esta esteira é curva e não mantém produto acumulado sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_04\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 4 da linha 1, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_05\_6m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 5 da linha 1, nesta esteira de 6 metros até 6 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_06\_4m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 6 da linha 1, nesta esteira de 4 metros até 4 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_07\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 7 da linha 1, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_08\_Curva (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 8 da linha 1, esta esteira é curva e não mantém produto acumulado sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_09\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 9 da linha 1, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_10\_6m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 10 da linha 1, nesta esteira de 6 metros até 6 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_11\_6m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 11 da linha 1, nesta esteira de 6 metros até 6 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_1\_Esteira\_12\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 12 da linha 1, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

└ *Linha\_2\_aMaquina\_2 (SFC):*

Lógica de seguimento das sequencias de funcionamentos da máquina 2 na linha 2, como o funcionamento desta máquina é feito pelo emulador o programa de CLP segue os status e autoriza o início do ciclo.

└ *Linha\_2\_Esteira\_01\_EntradaMaquina (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 1 da linha 2, esta é a esteira de entrada da máquina.

└ *Linha\_2\_Esteira\_02\_SaidaMaquina (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 2 da linha 2, esta é a esteira de saída da máquina.

└ *Linha\_2\_Esteira\_03\_4m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 3 da linha 2, nesta esteira de 4 metros até 4 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_2\_Esteira\_04\_4m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 4 da linha 2, nesta esteira de 4 metros até 4 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_2\_Esteira\_05\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 5 da linha 2, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

└ *Linha\_3\_aMaquina\_3 (SFC):*

Lógica de seguimento das sequencias de funcionamentos da máquina 3 na linha 3, como o funcionamento desta máquina é feito pelo emulador o programa de CLP segue os status e autoriza o início do ciclo.

└ *Linha\_3\_Esteira\_01\_EntradaMaquina (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 1 da linha 3, esta é a esteira de entrada da máquina.

└ *Linha\_3\_Esteira\_02\_SaidaMaquina (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 2 da linha 3, esta é a esteira de saída da máquina.

└ *Linha\_3\_Esteira\_03\_Curva (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 3 da linha 3, esta esteira é curva e não mantém produto acumulado sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_04\_6m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 4 da linha 3, nesta esteira de 6 metros até 6 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_05\_6m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 5 da linha 3, nesta esteira de 6 metros até 6 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_06\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 6 da linha 3, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_07\_Curva (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 7 da linha 3, esta esteira é curva e não mantém produto acumulado sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_08\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 8 da linha 3, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_09\_6m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 9 da linha 3, nesta esteira de 6 metros até 6 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_10\_4m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 10 da linha 3, nesta esteira de 4 metros até 4 produtos podem ficar acumulados sobre ela.

└ *Linha\_3\_Esteira\_11\_2m (SFC):*

Lógicas de animação da esteira 11 da linha 3, nesta esteira de 2 metros apenas 1 produto pode ficar acumulado sobre ela.

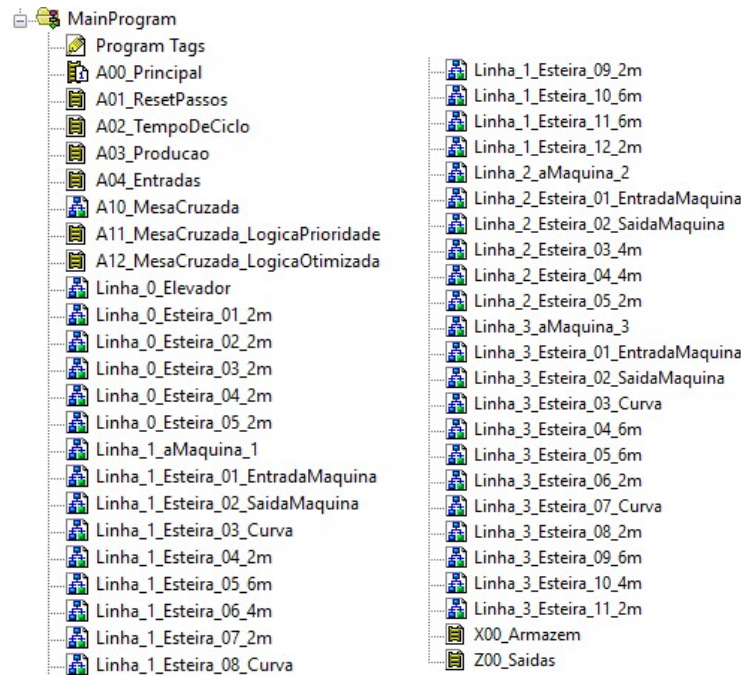
└ *X00\_Armazem (Ladder):*

Lógica de simulação do enchimento e esvaziamento do armazém.

└ *Z00\_Saidas (Ladder):*

Contém a cópia de todas as saídas (comandos, referencias, posição, etc.) para o simulador

A figura 54 ilustra como é visualizado as rotinas são declaradas no programa de desenvolvimento Logix Designer:



**Figura 54: Rotinas declaradas no programa de desenvolvimento Logix Designer.**

**Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges.**

#### 3.2.4.2.2 Lógicas de programa

Neste trabalho estão demonstrados os diagramas funcionais como em formato SFC, e as devidos cálculos serão representados em fórmulas dentro das transições ou ações. Para garantir que as lógicas têm exatamente a mesma programação em equipamentos iguais nas linhas ou entre elas, foram criados padrões como a Esteira de Entrada, Máquina, Esteira de Saída, Esteira Curva, Esteira de Acúmulo (2, 4 ou 6 metros), Mesa Cruzada e Elevador, estes estão descritos nos próximos capítulos.

Além do conceito imposto do SFC como lógica de passos, para este sistema de transporte foram determinados relacionamentos através de 3 endereços de memória que servem como intertravamentos e estão nas condições de transições de passos no SFC. Estes três intertravamentos são o pedido de envio, a autorização de envio e o envio OK, utilizando apenas estas informações para enviar produto de uma esteira para outra simplifica a compreensão das lógicas já que menos informações são necessárias da esteira anterior ou posterior, basta saber se ela está pedindo o envio de um produto para autorizar o envio e no quando finalizada a recepção informar como recebimento ok. A montagem na figura 55 demonstra como este conceito funciona, o exemplo demonstrado na figura 55 é para apenas 1 produto no caso de acúmulo, o pedido de envio seria apenas após a esteira com todos os produtos sobre os quadrados em verde indicando a presença de produto.

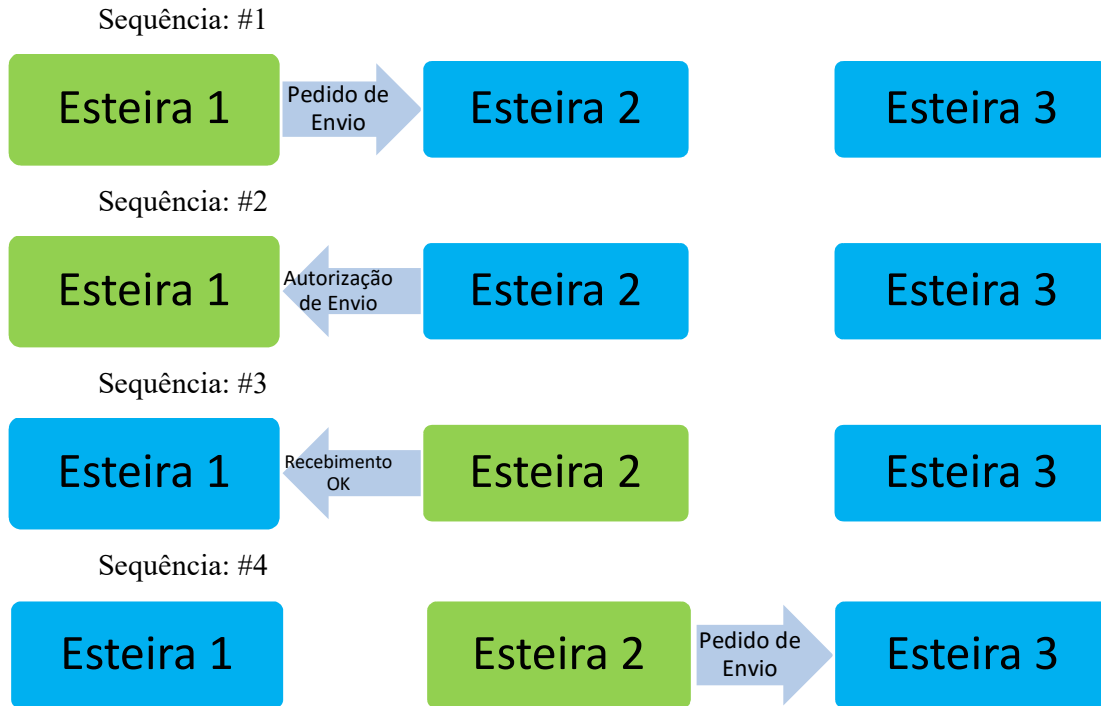


Figura 55: Demonstração troca de informações entre as esteiras.  
Fonte: Autor (2020).

### 3.2.4.2.2.1 Esteira de Entrada

O sequenciamento da mesa de entrada é simplificado, pois o produto é colocado sobre ela “manualmente”, não sendo necessárias a parte da lógica de recepção. Segue na figura 56 os detalhes dos passos.

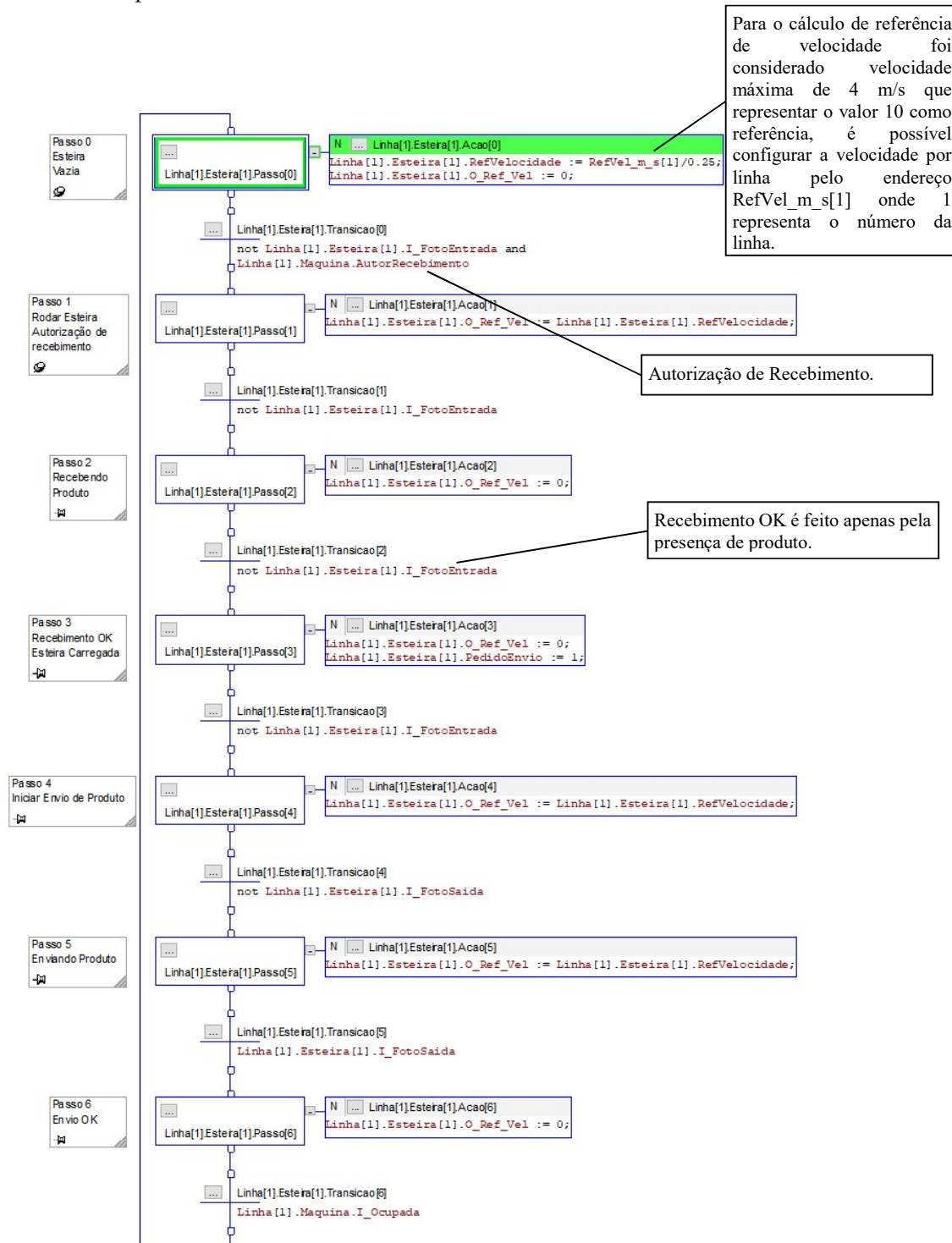
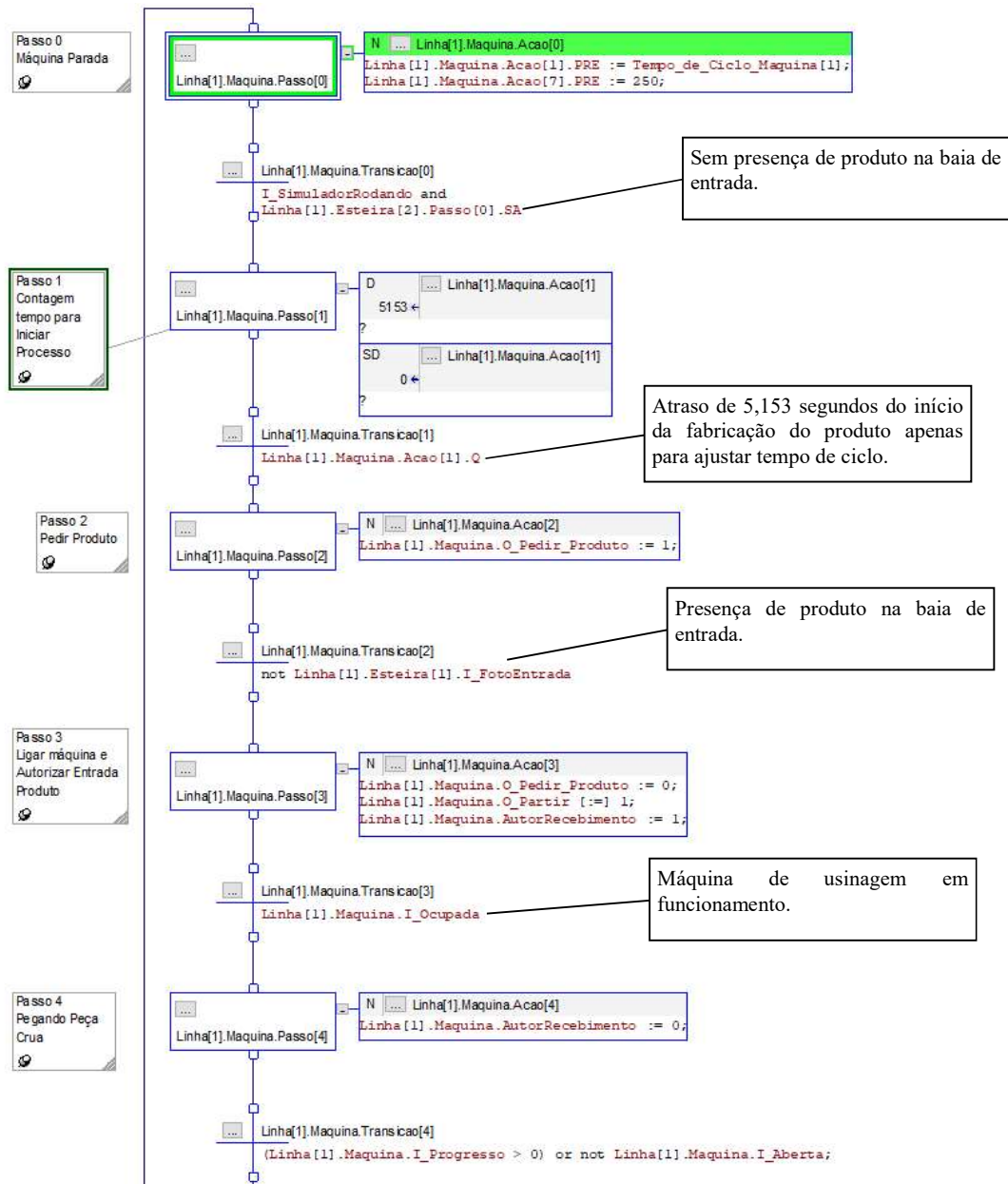


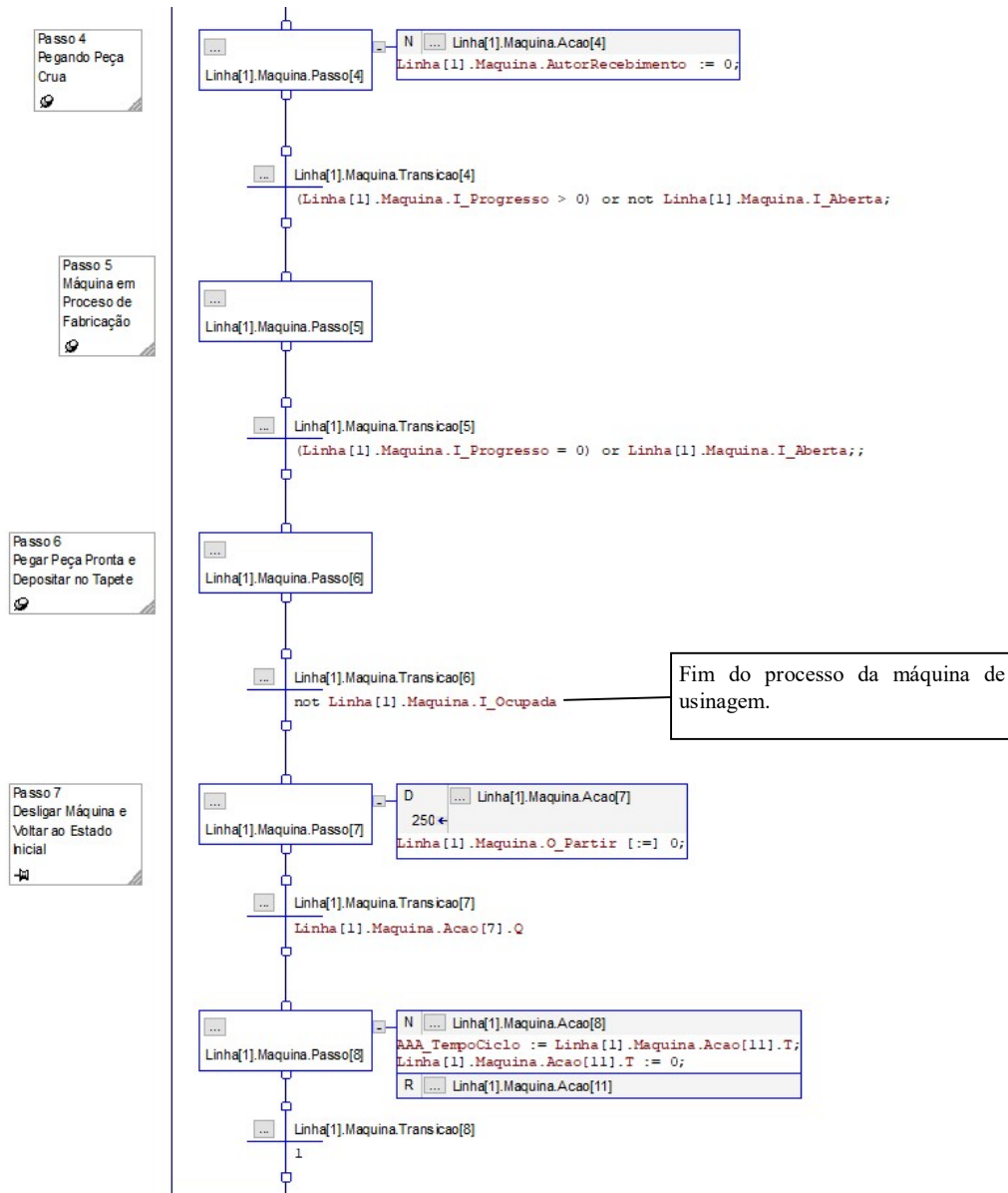
Figura 56: Programa de sequenciamento da mesa de entrada.  
Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).

### 3.2.4.2.2 Máquina de Usinagem

O programa de sequenciamento da máquina de usinagem (figura 57 e 58) não comanda seus movimentos, pois isto é feito pelo simulador, esta lógica segue o sequenciamento de funcionamento e autoriza partida para o início do processo.



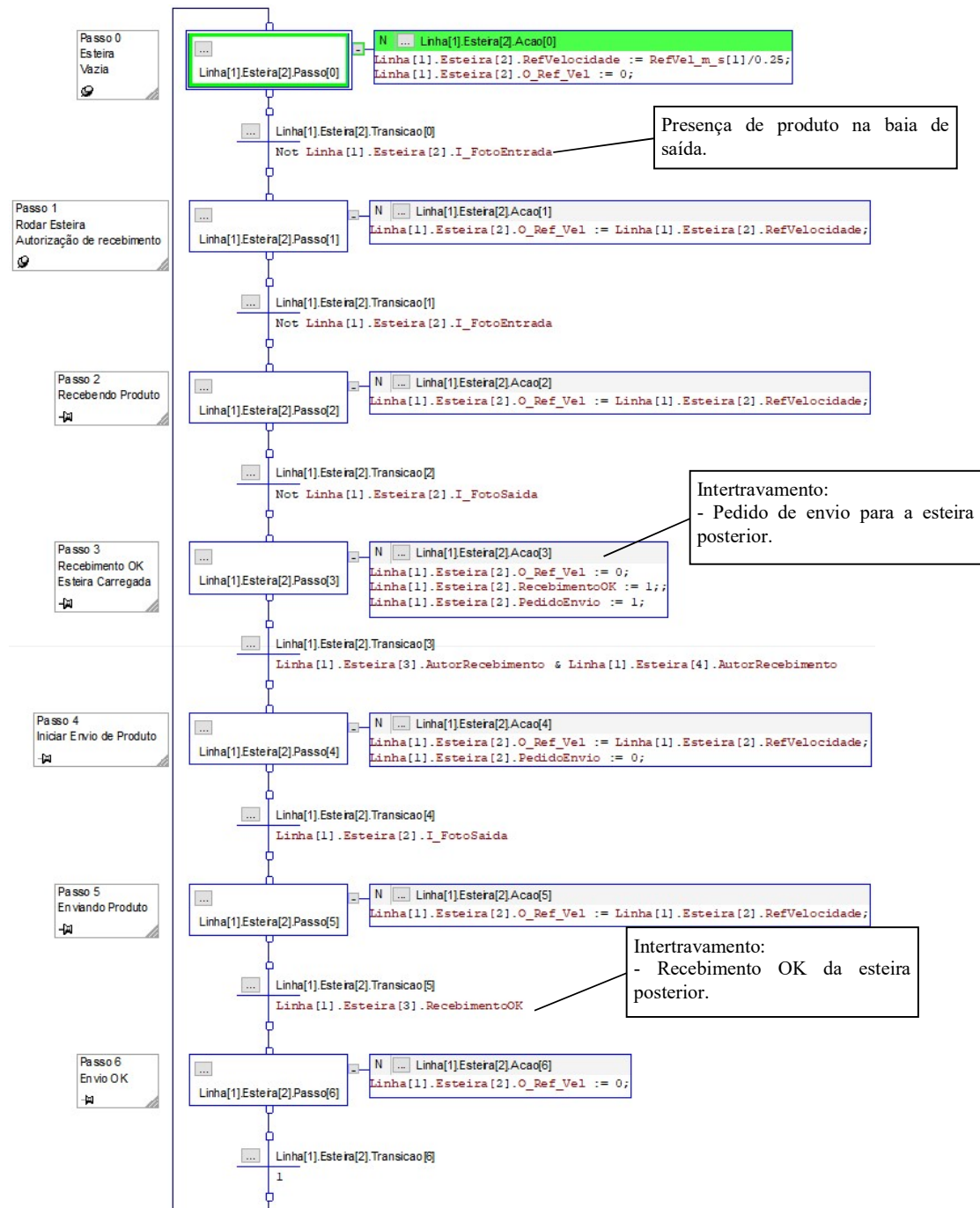
**Figura 57: Programa de sequenciamento da máquina de usinagem.**  
Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).



**Figura 58:** Continuação programa de sequenciamento da máquina de usinagem.  
**Fonte:** Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).

### 3.2.4.2.2.3 Esteira de Saída

Assim como na esteira de entrada, o sequenciamento da esteira de saída é mais simplificado (figura 59), pois o produto vem automaticamente da máquina de usinagem, **não** sendo necessárias a parte da lógica de recepção.

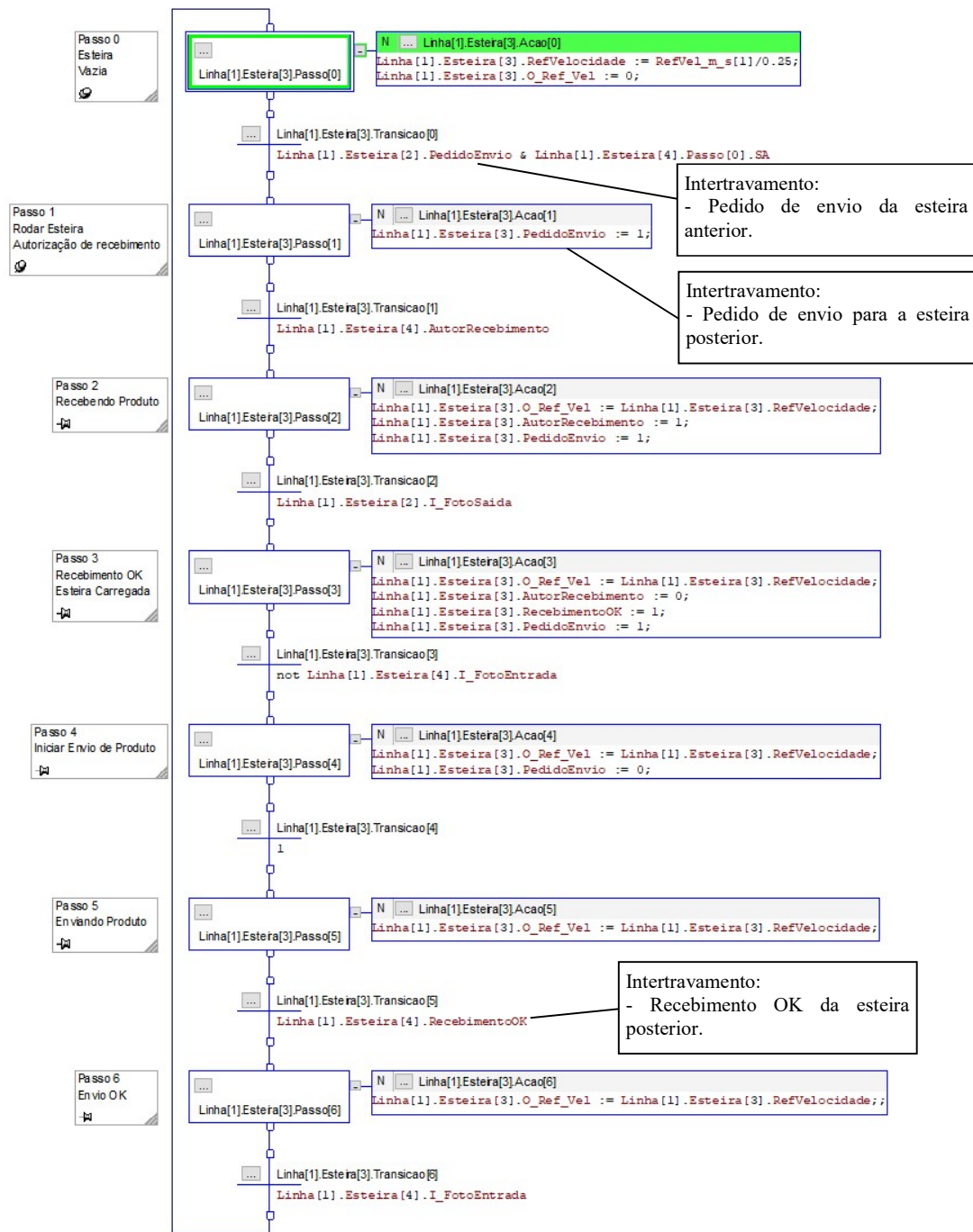


**Figura 59: Programa de sequenciamento da esteira de saída.**

Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).

### 3.2.4.2.2.4 Esteira Curva

O sequenciamento da esteira curva (figura 60) segue o mesmo conceito de funcionamento com o pedido de envio, autorização de recebimento e recebimento OK, porém não há sensores de detecção de produto nesta esteira, assim o produto não fica sobre ela. A esteira curva na realidade é uma esteira de passagem e interligação entre duas esteiras.



**Figura 60: Programa de sequenciamento da esteira curva.**  
**Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).**

### 3.2.4.2.2.5 Esteira de Acúmulo (2, 4 ou 6 metros)

As esteiras de acúmulo de produto funcionam de forma mais complexa, devido justamente a própria questão do acúmulo. Para o funcionamento destes equipamentos mais condições têm que ser observadas como a quantidade máxima atingida de produto sobre a esteira, também o envio dos produtos até o sensor de saída no fim da esteira, pois somente com a presença de produto no fim da esteira que o pedido de envio para a próxima é feito. Há também um controle de fim de envio, para garantir que todos os produtos foram enviados e ela declarada como vazia. Não importando a capacidade de produto o programa de sequenciamento é o mesmo, assim a quantidade pode ser configurada por um endereço de memória como exemplo `Linha[1].Esteira[5].PresetQtProduto = 6`, neste caso até 6 produtos podem ser carregados antes do envio à próxima.

O programa em SFC é mais extenso que os citados anteriormente, para facilitar a compreensão segue o diagrama simplificado na figura 61. As áreas demarcadas as linhas tracejadas em vermelho serão explicadas em detalhe, seguindo as numerações #1, #2 e #3.

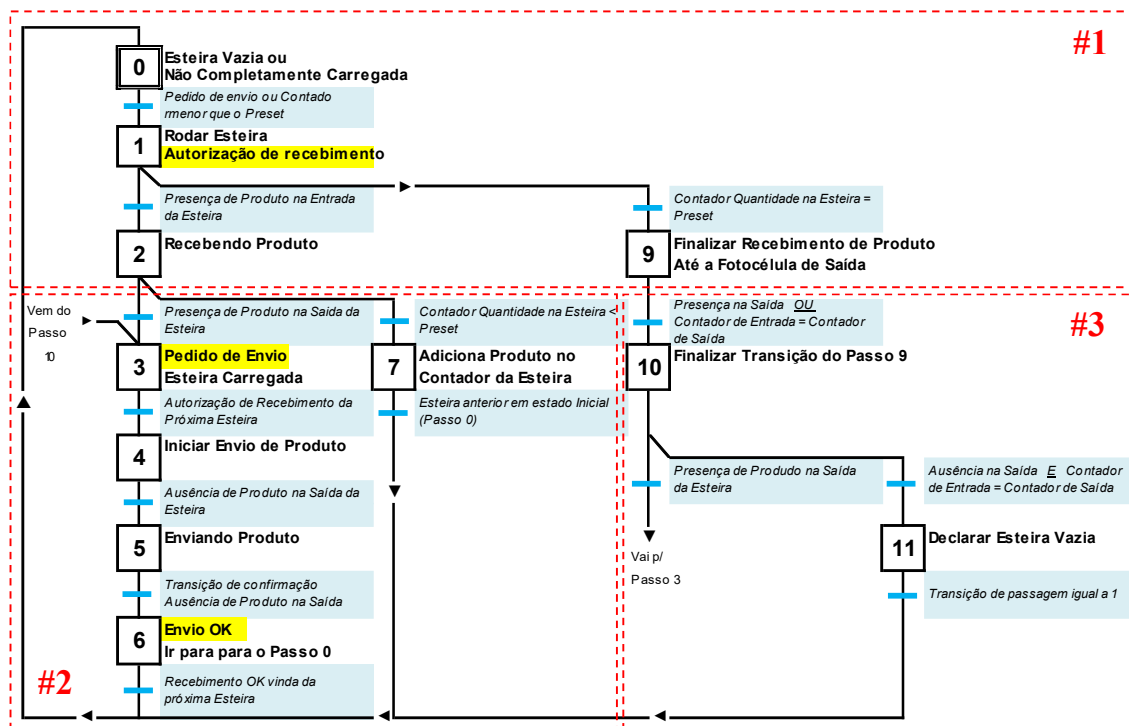
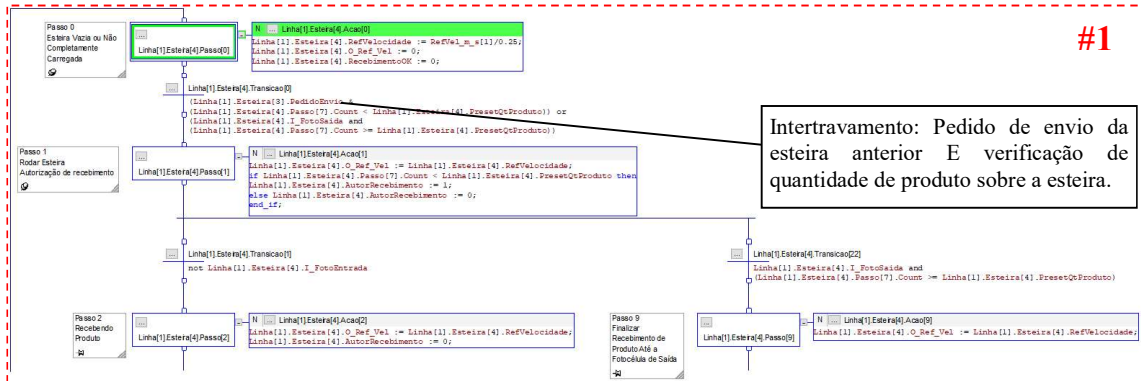


Figura 61: Diagrama simplificado da esteira de acúmulo.

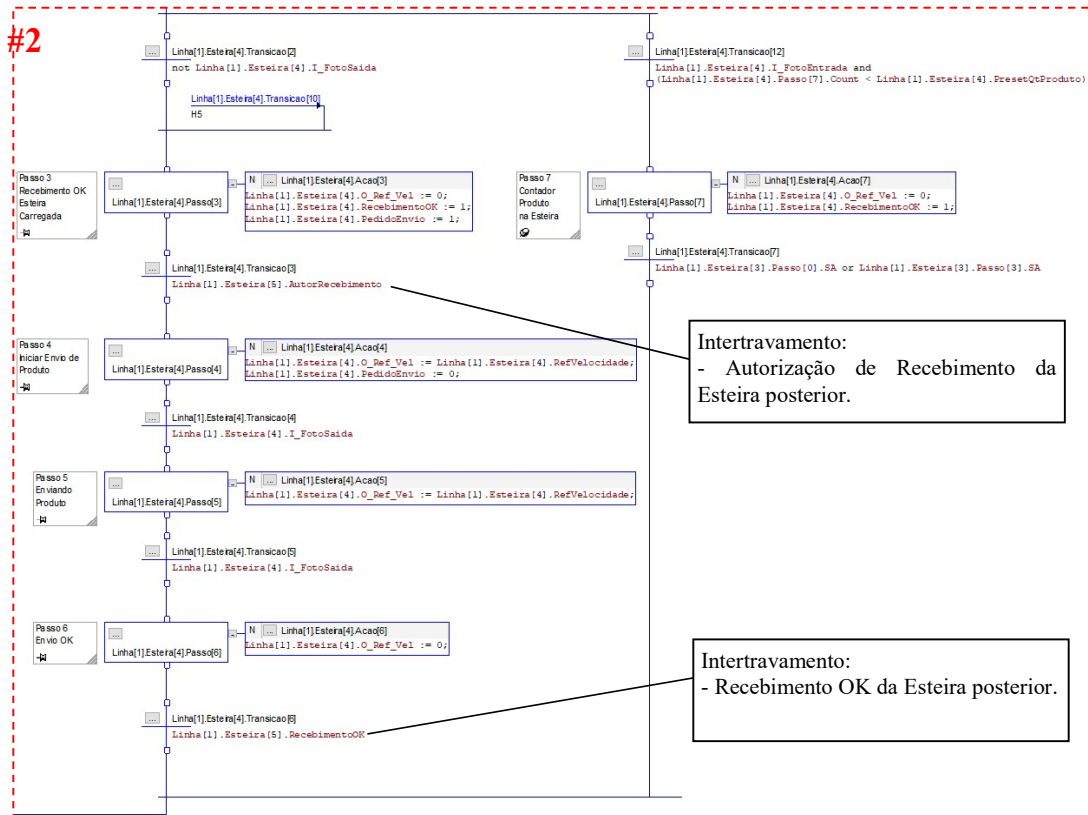
Fonte: Autor (2020).

Segue na figura 62 o detalhe da parte de programa #1, onde é feita verificação se a esteira está completa ou não com a quantidade de produtos possíveis sobre ela. Se não estiver completa ao fim do carregamento do produto o ciclo é reiniciado e fica em espera do próximo produto, se estiver completa os produtos avançam até detecção pelo sensor no fim da esteira e o pedido de envio é feito para a próxima esteira.



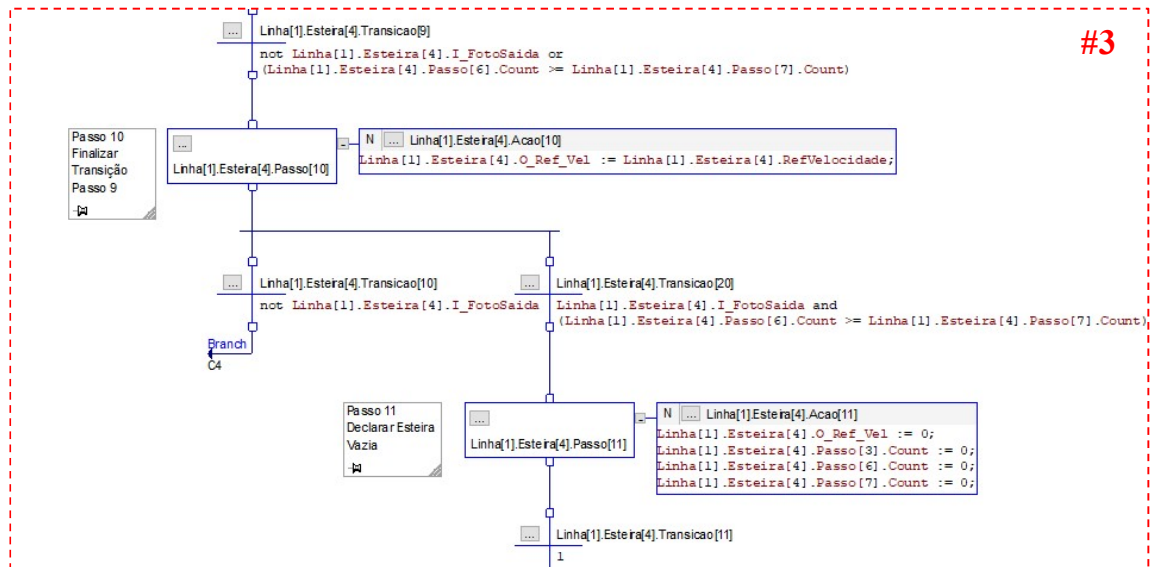
**Figura 62: Detalhe da parte de programa #1 da esteira de acúmulo.**  
 Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).

Segue na figura 63 o detalhe da parte de programa #2, neste é verificado a presença ou não da fotocélula de saída, para reiniciar o ciclo esperando o próximo produto ou finalizar o recebimento e pedir o envio para a próxima esteira.



**Figura 63: Detalhe da parte de programa #2 da esteira de acúmulo.**  
 Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).

Segue na figura 64 o detalhe da parte de programa #3, que é o ciclo de envio para próxima esteira, neste ponto do programa é crucial a verificação da quantidade de produtos restantes, para quando que todos os produtos enviados, a esteira possa ser declarada como vazia e possibilitar um novo carregamento de produtos.



**Figura 64: Detalhe da parte de programa #3 da esteira de acúmulo.**  
**Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).**

### 3.2.4.2.2.6 Mesa Cruzada

A mesa cruzada é o coração de todo sistema, apesar de sua simplicidade em relação ao funcionamento dinâmico, já que é apenas um equipamento de passagem de produto, é nela que a gestão de prioridade de produtos de envio ao armazém é feita.

Assim como na Esteira de Acúmulo, o programa em SFC é mais extenso que os citados anteriormente, para facilitar a compreensão segue o diagrama simplificado na figura 65. As áreas demarcadas as linhas tracejadas em vermelho serão explicadas em detalhe, seguindo as numerações #1, #2 e #3.

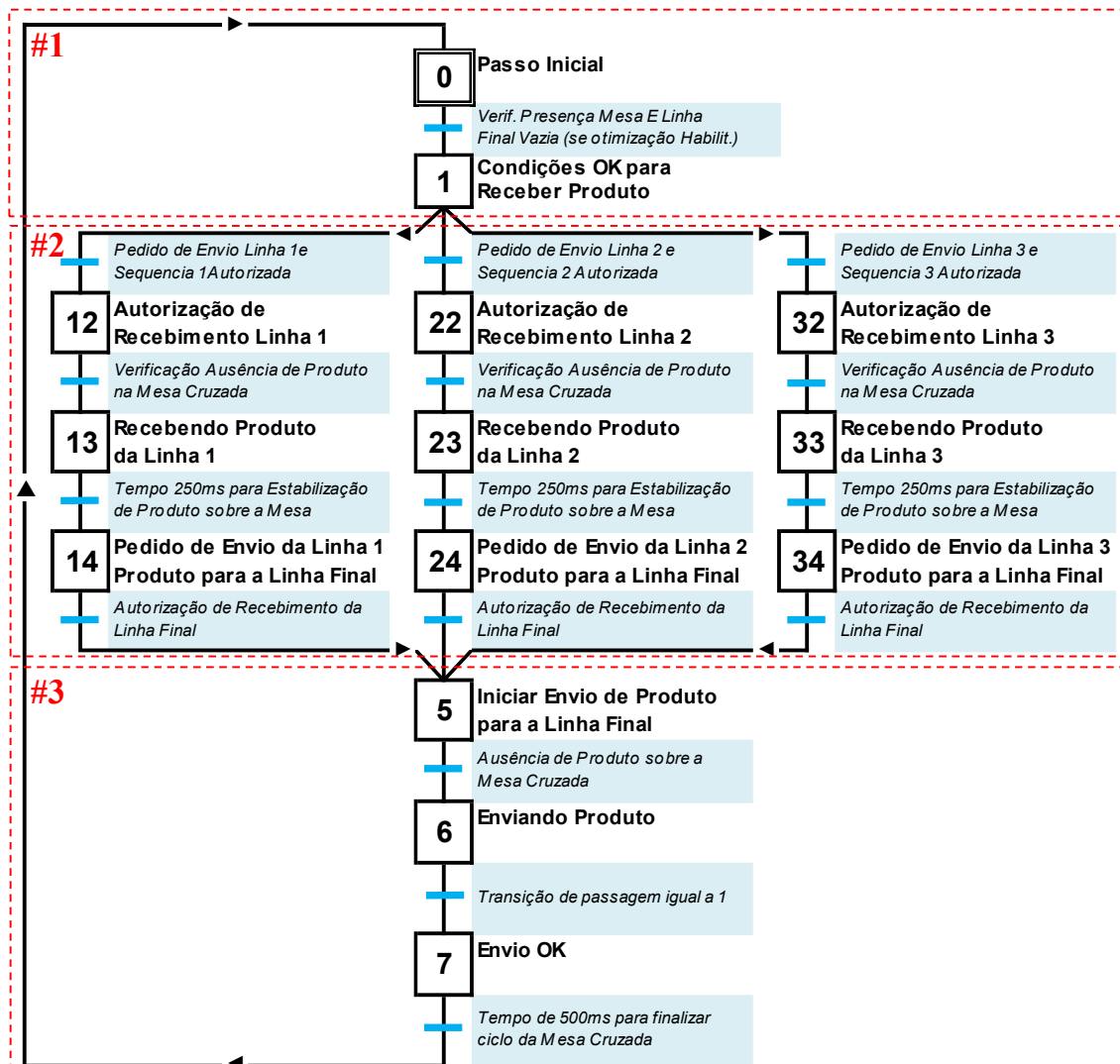
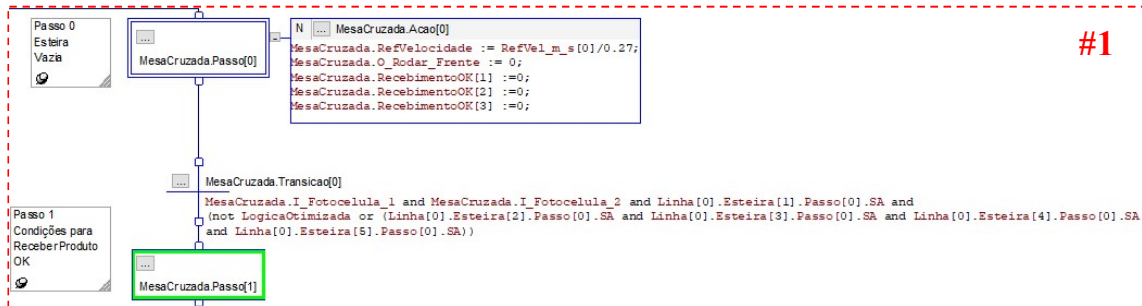


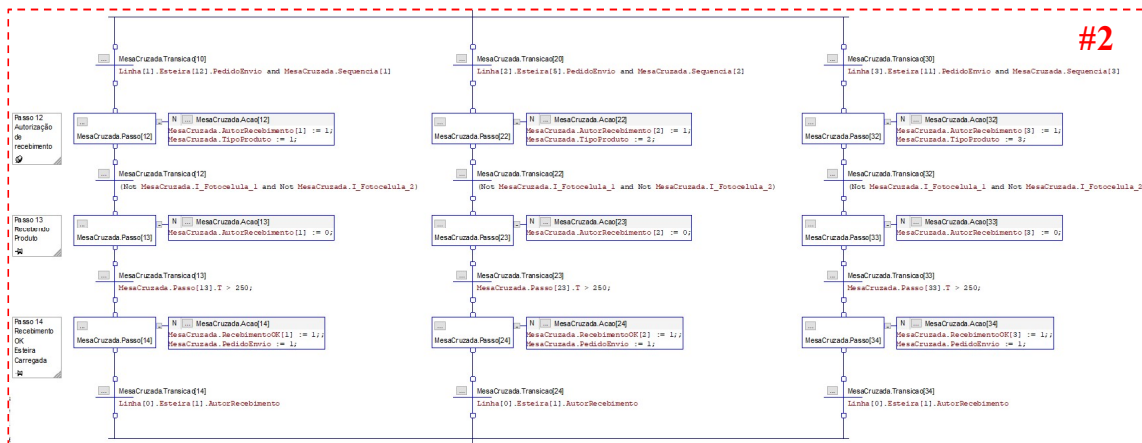
Figura 65: Diagrama simplificado da mesa cruzada.  
Fonte: Autor (2020).

Segue na figura 66 o detalhe da parte de programa #1, nesta parte de programa se faz a verificação da presença de produto na mesa cruzada e na linha final, porém é feita apenas se a lógica otimizada estiver habilita pelo endereço de memória *LogicaOtimizada* com valor igual a 1.

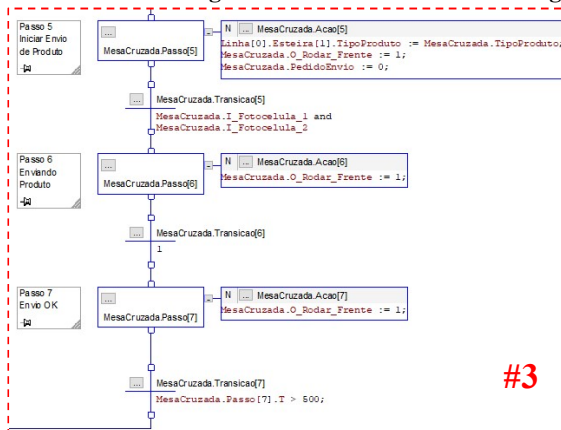


**Figura 66: Detalhe da parte de programa #1 da mesa cruzada.**  
Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).

Segue na figura 67 o detalhe da parte de programa #2, o sequenciamento de programa para recepção de produto idêntico para as três linhas, assim cada braço desta programação representa uma linha, sendo como condição inicial o pedido de envio e sequenciamento da respectiva linha.



**Figura 67: Detalhe da parte de programa #2 da mesa cruzada.**  
Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).



Segue na figura 68 o detalhe da parte do programa #3, que é a finalização do ciclo com o envio do produto para a primeira esteira da linha final, como a autorização e o recebimento se dão apenas quando a linha está vazia, o produto não fica parado sobre a mesa cruzada.

**#3** **Figura 68: Detalhe da parte de programa #3 da mesa cruzada.** Fonte: Autor (2020).

### 3.2.4.2.2.7 Elevador

O programa de sequenciamento do elevador (figura 69) é similar ao das esteiras, porém após o recebimento do produto o elevador inicia a subida até a posição de envio para os armazéns. Como o limite do emulado é o sistema de transporte, é utilizada uma função do emulador Factory I/O chamada Remove, justamente para remover o produto do elevador e autorizar a descida para a recepção do próximo produto.



**Figura 69: Programa de sequenciamento do elevador.**  
 Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).

### 3.3 SIMULAÇÃO

Os sistemas emulados trazem muitos benefícios entre eles o tempo de comissionamento reduzido e a diminuição do risco de testar o programa em equipamentos físicos reais, além disso uma outra grande vantagem é testar configurações, situações, falhas e cenários diferentes. Neste trabalho está proposto dois cenários diferentes, sendo um não otimizado e outro otimizado, porém com a mesma configuração de produção (produtos, tempo de ciclo e equipamentos), a diferença entre ele ficaria apenas para a lógica de prioridade da mesa cruzada, sendo ela um ponto de decisão para qual o produto deverá passar em cada momento.

#### 3.3.1 Coleta e Análise de dados.

A coleta de dados foi feita por uma planilha excel, que através de um servidor OPC (RSLinx OPC Server) copiou os valores de um buffer no endereço de memória *DadosProducao[0...599]* que está organizado conforme a estrutura de dados *EstruturaDados\_Producao* (capítulo 3.2.4.1) e foi desenvolvido dentro da lógica de programação de CLP, com o objetivo justamente de analisar os dados coletados para compreender como o sistema produtivo se comporta em um determinado período de tempo.

Para cada cenário proposto (otimizado e não otimizado) foram coletados os dados de um período de 12 horas, sendo que os dados foram inseridos pelo CLP a cada 2 minutos, ou seja, 360 linhas de dados com 15 informações em cada linha, totalizando 5.400 dados para serem analisados em cada cenário. Na tabela 9 é mostrado um exemplo de como os dados estão organizados na planilha.

| Seq. | Registro Dada e Hora |     |     |      |        | Produção<br>Total | Produção Máquina |   |   | Quantidade Armazém |    |    | Produção Processo |   |   |
|------|----------------------|-----|-----|------|--------|-------------------|------------------|---|---|--------------------|----|----|-------------------|---|---|
|      | Ano                  | Dia | Mes | Hora | Minuto |                   | 1                | 2 | 3 | 1                  | 2  | 3  | 1                 | 2 | 3 |
| 224  | 2020                 | 7   | 5   | 3    | 58     | 7                 | 2                | 3 | 2 | 35                 | 97 | 97 | 3                 | 2 | 3 |
| 225  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 0      | 7                 | 3                | 1 | 3 | 39                 | 96 | 95 | 3                 | 1 | 2 |
| 226  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 2      | 8                 | 3                | 1 | 3 | 39                 | 96 | 97 | 2                 | 2 | 2 |
| 227  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 4      | 7                 | 3                | 3 | 3 | 36                 | 97 | 99 | 3                 | 2 | 2 |
| 228  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 6      | 4                 | 2                | 2 | 2 | 33                 | 98 | 99 | 3                 | 1 | 2 |
| 229  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 8      | 7                 | 3                | 2 | 3 | 38                 | 96 | 96 | 2                 | 2 | 3 |
| 230  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 10     | 8                 | 3                | 0 | 1 | 40                 | 97 | 94 | 3                 | 2 | 2 |
| 231  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 12     | 7                 | 3                | 3 | 1 | 37                 | 98 | 96 | 3                 | 2 | 2 |
| 232  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 14     | 6                 | 2                | 2 | 3 | 35                 | 99 | 98 | 2                 | 1 | 2 |
| 233  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 16     | 5                 | 3                | 2 | 3 | 36                 | 97 | 97 | 3                 | 2 | 2 |
| 234  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 18     | 7                 | 3                | 1 | 2 | 40                 | 95 | 95 | 3                 | 2 | 2 |
| 235  | 2020                 | 7   | 5   | 4    | 20     | 8                 | 3                | 0 | 3 | 39                 | 98 | 95 | 2                 | 1 | 3 |

**Tabela 9: Exemplo organização coleta de dados de produção do CLP.**

**Fonte: Autor (2020).**

Os dados armazenados são quantitativos de cada instante de intervalo 2 minutos, porém para a análise e efeito de comparação faz mais sentido quando se analisadas as eficiências, ao invés do valor produzido, isto devido ao tempo de ciclo ser diferente nos processos que recebem os produtos das máquinas. Para calcular a eficiência em cada instante foi utilizada capacidade

de produto de cada máquina e processo e o valor acumulado para o determinado período. Devido ao fato de ser usado o valor acumulado, foi determinado um período de 30 minutos para se calcular a eficiência pela fórmula:

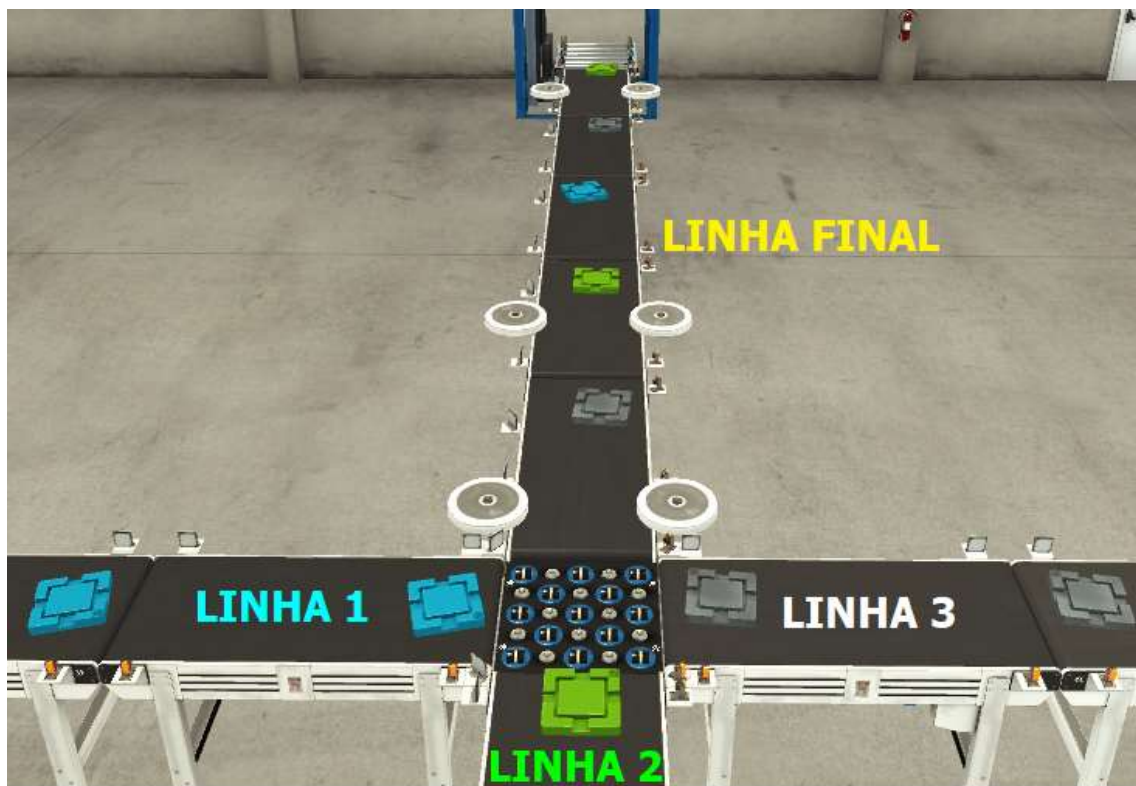
$$\text{Eficiência (\%)} = (\text{Produção Realizada} / \text{Capacidade de Produção}) \times 100\%$$

Este cálculo foi realizado para cada máquina, armazém e processo, e todos os gráficos de análise serão demonstrados em função da eficiência.

### 3.3.2 Cenário não otimizado.

Neste primeiro cenário a lógica da mesa cruzada não é otimizada em função das condições do sistema de produção, desta forma o primeiro produto que chegar terá prioridade para passar, também a ordem 1, 2 e 3 será seguida.

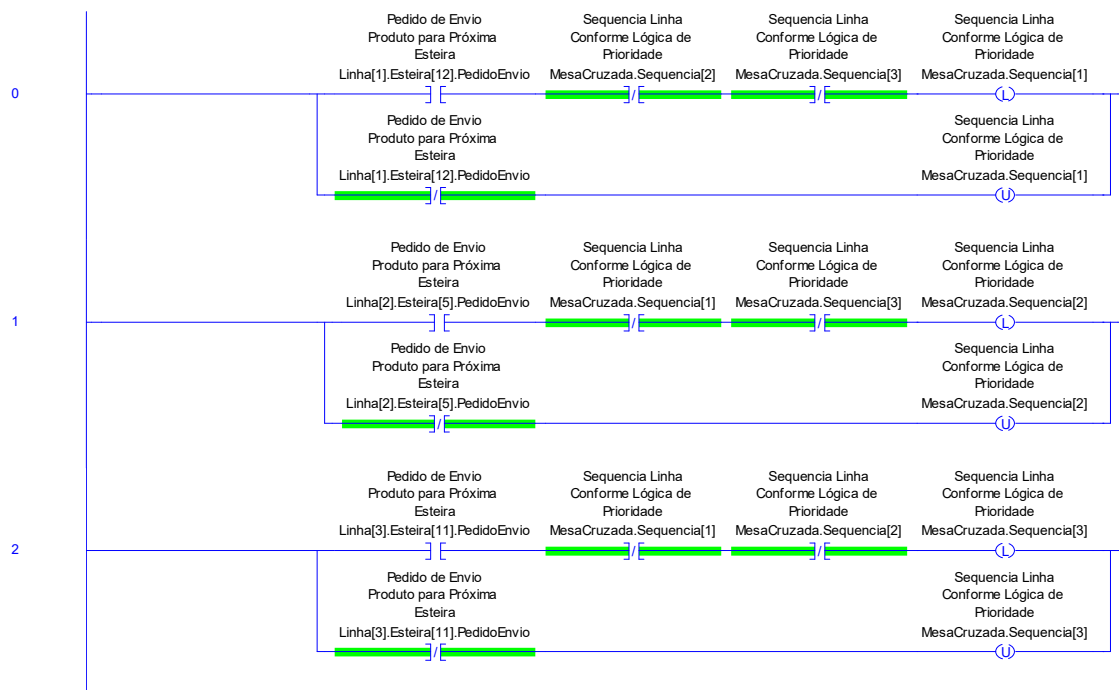
Funcionando desta forma com o tempo de ciclo é o mesmo entre as máquinas de usinagem, há uma tendência após o circuito de transporte preenchido, de os produtos ficarem intercalados como mostrado na figura 70.



**Figura 70: Demonstração de produtos intercalados no emulador.**  
**Fonte: Projeto emulador TCC Carlos Borges (2020).**

O programa foi escrito em linguagem LADDER (figura 71). Para facilitar a compreensão, neste caso, cada pedido de envio é memorizado apenas se os outros dois não estão, assim que finalizado a memória é retirada e o próximo pedido pode ser memorizado.

Estes endereços de memória Mesa.Cruzada.Sequencia[1], Mesa.Cruzada.Sequencia[2] e Mesa.Cruzada.Sequencia[3] que habilitam os braços do programa de sequenciamento (seção 3.2.4.2.2.6), autorizando assim a recepção de produto das linhas para a mesa cruzada. Nesta forma de programar, a sequência das linhas de programa é muito importante, neste caso, se alterada, vai influenciar na autorização de recepção de produto das linhas de produção. A figura 71 ilustra a programação na linguagem Ladder, onde as memórias de sequência são habilitadas pela instrução OTL e desabilitadas pela instrução OTU.



**Figura 71: Programa em Ladder para habilitar/desabilitar memórias de sequência.**  
**Fonte: Programa de CLP TCC Carlos Borges (2020).**

### 3.3.2.1 Resultados Cenário não Otimizado

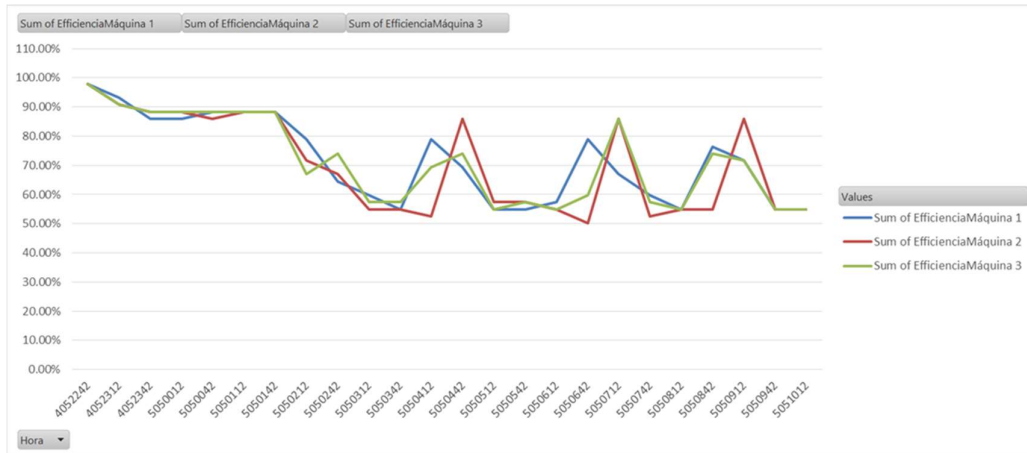
Analisando os dados resultantes em um período de 12 horas, após a computação dos dados da tabela com informação do CLP, pode ser observado na tabela 10.

| <i>Resultado Produção</i> |                |                   |                  |                    |                   |
|---------------------------|----------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|
|                           | <i>Acc 12h</i> | <i>Capacidade</i> | <i>Resultado</i> | <i>Resultado %</i> | <i>Eficiência</i> |
| <i>Máquina 1</i>          | 720            | 1004              | -284             | -28,29%            | 71,71%            |
| <i>Máquina 2</i>          | 703            | 1004              | -301             | -29,98%            | 70,02%            |
| <i>Máquina 3</i>          | 716            | 1004              | -288             | -28,69%            | 71,31%            |
| <i>Processo 1</i>         | 701            | 960               | -259             | -26,98%            | 73,02%            |
| <i>Processo 2</i>         | 601            | 617               | -16              | -2,59%             | 97,41%            |
| <i>Processo 3</i>         | 699            | 785               | -86              | -10,96%            | 89,04%            |

**Tabela 10: Resultados cenário não otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**

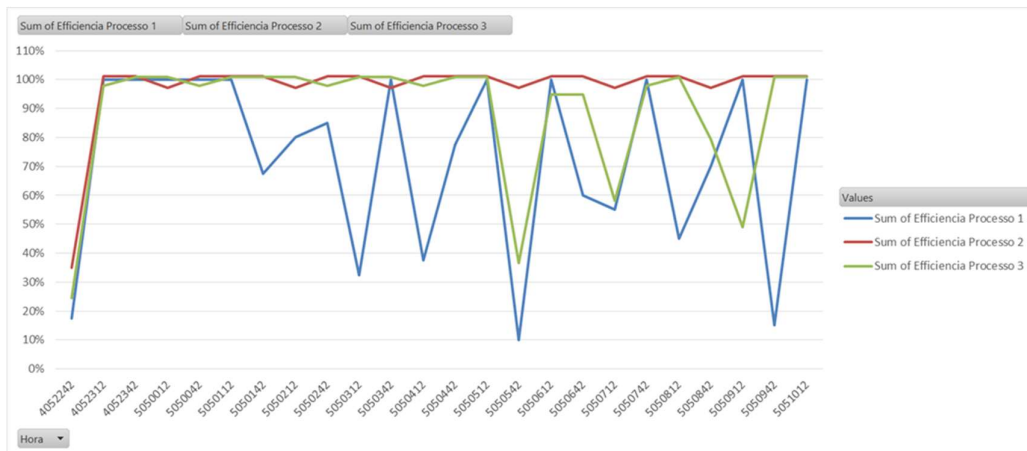
Assim como observado na Tabela 10, as eficiências das máquinas ficaram praticamente iguais entre, já nos processos houve perda de eficiência principalmente no processo 1 onde o tempo de ciclo é mais baixo.

Verificando a evolução da eficiência das máquinas de usinagem na figura 72, observa-se que tiveram um comportamento muito parecido.



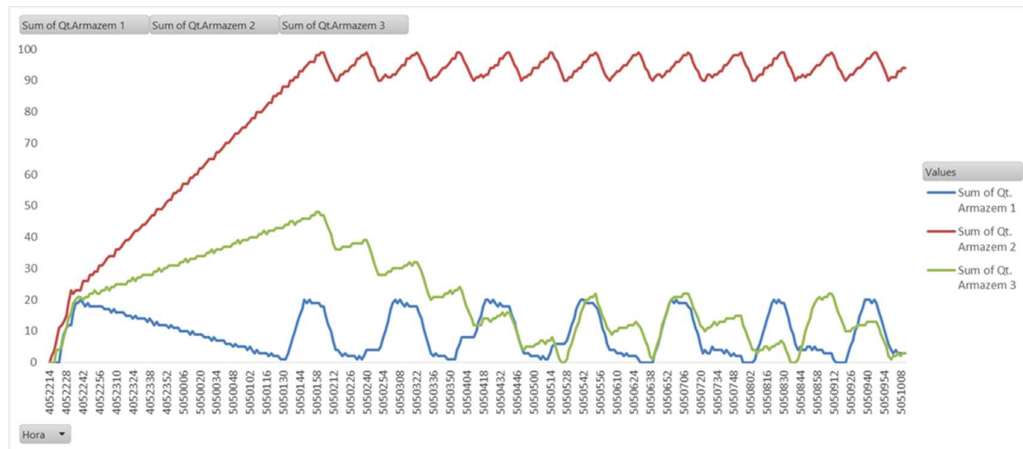
**Figura 72: Gráfico de evolução da eficiência das máquinas de usinagem no cenário não otimizado. Fonte: Autor (2020).**

Como demonstrado na figura 73 a eficiência do processo ficou muito instável, principalmente para o processo 1 que tem o menor tempo de ciclo, porém também é possível observar uma estabilidade no início do período de 12 horas.



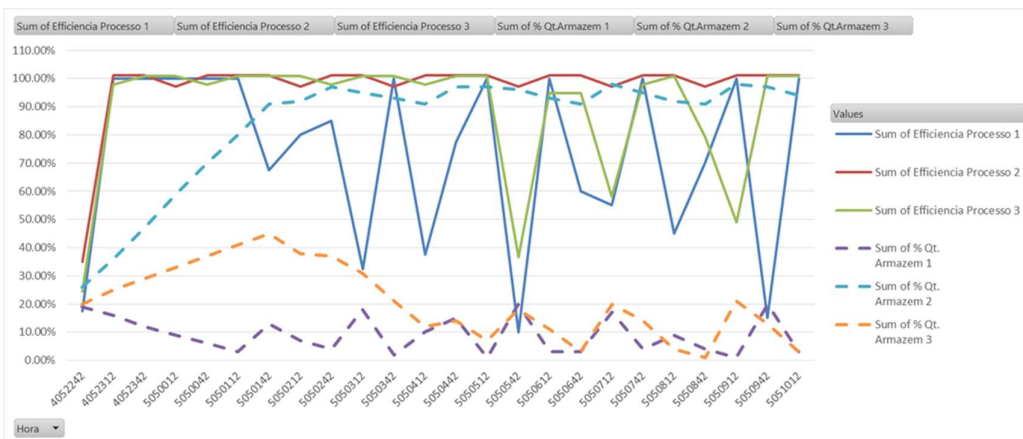
**Figura 73: Gráfico de evolução da eficiência dos processos no cenário não otimizado. Fonte: Autor (2020).**

Verificando o comportamento dos armazéns no gráfico ilustrado na figura 74, o armazém 2 chega ao máximo de sua capacidade variando entre 90 e 100, isto se deve a lógica do programa que quando o armazém atinge sua capacidade máxima ele só autoriza a entrada de mais produtos quando estiver abaixo ou igual a 90. O armazém 1 chega a zerar, o que é ruim para o processo, já que a retomada só pode ser feita após atingir uma quantidade mínima de 20 subprodutos no armazém. O armazém 3 tem um comportamento parecido com o do armazém 2, porém ligeiramente melhor, já que zera menos vezes. A enchimento médio ficou em 9,17% no armazém 1, 82,17% no armazém 2 e 20,75% no armazém 3.



**Figura 74: Gráfico comportamento de enchimento dos armazéns no cenário não otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**

Sobrepondo os gráficos dos processos com os armazéns (Figura 75) observa-se que quando o armazém 2 atinge sua capacidade máxima a eficiência do processo 1 reduz drasticamente e isto é explicado pelo bloqueio do envio de produto das linhas, já que se um ou mais armazéns estão cheios não há mais condições de enviar o produto para ser armazenado, assim os armazéns dos processos com tempo de ciclo menor tendem a se esvaziar.



**Figura 75: Sobreposição gráficos de eficiência dos processos e enchimento dos armazéns no cenário não otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**

### 3.3.3 Cenário Otimizado

A partir da análise do cenário não otimizado é possível concluir que a gestão de enchimento dos armazéns impacta o resultado de eficiência dos processos, isto se deve aos tempos de ciclos diferentes, onde o armazém no qual o processo tem o tempo de ciclo maior, tende a encher mais que os outros. Para resolver este problema uma solução seria controlar o envio de produtos antes de bloqueio da linha final, assim os produtos com maior prioridade poderiam passar na frente, a partir desta ideia cinco modificações foram propostas:

- Carregar a mesa cruzada apenas quando a linha final estiver vazia. Para isto foi verificado o tempo de ciclo do elevador que é aproximadamente de 15s, o que daria tempo para o produto ser transferido da mesa cruzada para a esteira 5 da linha final, até a chegada do elevador na posição de carga.
- Através da integração dos sistemas, disponibilizar o dado da quantidade nos armazéns ao controlador do processo das máquinas de usinagem.
- Condicionar a liberação de produto da linha para a mesa cruzada ao limite máximo de 97% no armazém de respectiva linha, assim os produtos em trânsito da mesa cruzada para o armazém podem completar os 100%.
- Criar lógica de prioridade verificando os níveis de enchimento dos armazéns. A tabela 11 indica as seis condições possíveis e a lógica de verificação de cada condição.

| <i>Condição</i> | <i>Sequência Prioridade</i> |                |                | <i>Lógica Verificação<br/>Quantidade Armazém</i> |
|-----------------|-----------------------------|----------------|----------------|--|
|                 | <i>Linha 1</i>              | <i>Linha 2</i> | <i>Linha 3</i> |  |
| 1               | 1°                          | 2°             | 3°             | $((1 \leq 2) \& (1 \leq 3)) \& (2 \leq 3)$       |
| 2               | 1°                          | 3°             | 2°             | $((1 \leq 2) \& (1 \leq 3)) \& (3 < 2)$          |
| 3               | 2°                          | 1°             | 3°             | $((2 < 1) \& (2 \leq 3)) \& (1 \leq 3)$          |
| 4               | 2°                          | 3°             | 1°             | $((2 < 1) \& (2 \leq 3)) \& (3 < 1)$             |
| 5               | 3°                          | 1°             | 2°             | $((3 < 1) \& (3 < 2)) \& (1 \leq 2)$             |
| 6               | 3°                          | 2°             | 1°             | $((3 < 1) \& (3 < 2)) \& (2 < 1)$                |

**Tabela 11: Condições seleção prioridade na mesa cruzada.**

Fonte: Autor (2020).

- Verificação do pedido de envio da esteira anterior à mesa cruzada e também da esteira anterior – 1 (ex.: Linha 1 Esteira 11, Esteira 12), com isso garante-se que a mesa cruzada irá bloquear as duas linhas não prioritárias para enviar o máximo de produto possível ao armazém da linha prioritária.

### 3.3.3.1 Resultados Cenário Otimizado

Assim como no cenário não otimizado, os dados analisados referem-se a um período de 12 horas, conforme mostrado na tabela 12.

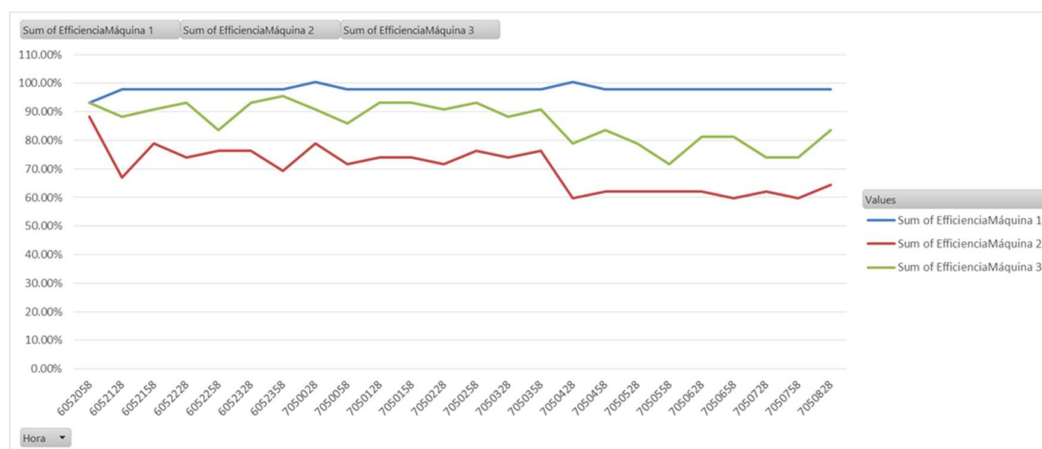
| <i>Resultado Produção</i> |                |                   |                  |                    |                   |
|---------------------------|----------------|-------------------|------------------|--------------------|-------------------|
|                           | <i>Acc 12h</i> | <i>Capacidade</i> | <i>Resultado</i> | <i>Resultado %</i> | <i>Eficiência</i> |
| <i>Máquina 1</i>          | 984            | 1004              | -20              | -1,99%             | 98,01%            |
| <i>Máquina 2</i>          | 704            | 1004              | -300             | -29,88%            | 70,12%            |
| <i>Máquina 3</i>          | 867            | 1004              | -137             | -13,65%            | 86,35%            |
| <i>Processo 1</i>         | 928            | 960               | -32              | -3,33%             | 96,67%            |
| <i>Processo 2</i>         | 599            | 617               | -18              | -2,92%             | 97,08%            |
| <i>Processo 3</i>         | 757            | 785               | -28              | -3,57%             | 96,43%            |

**Tabela 12: Resultados cenário otimizado.**

**Fonte: Autor (2020).**

Observa-se que as eficiências dos processos melhoraram com as modificações propostas. A seguir, a mesma análise gráfica que foi feita no cenário não otimizado.

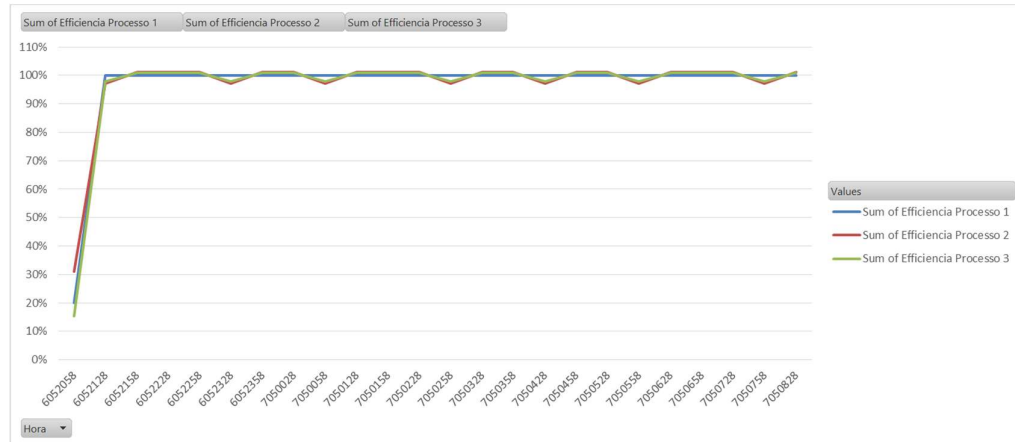
Verificando a evolução da eficiência das máquinas de usinagem ilustrada no gráfico da figura 76, observa-se que a eficiência das máquinas além de mais estável ficou aproximada da necessidade dos processos sendo para a máquina 1  $(960/1004) \times 100\% = 95,62\%$ , máquina 2  $(617/1004) \times 100\% = 61,45\%$  e máquina 3  $(785/1004) \times 100\% = 78,19\%$ .



**Figura 76: Gráfico de evolução da eficiência das máquinas de usinagem no cenário otimizado.**

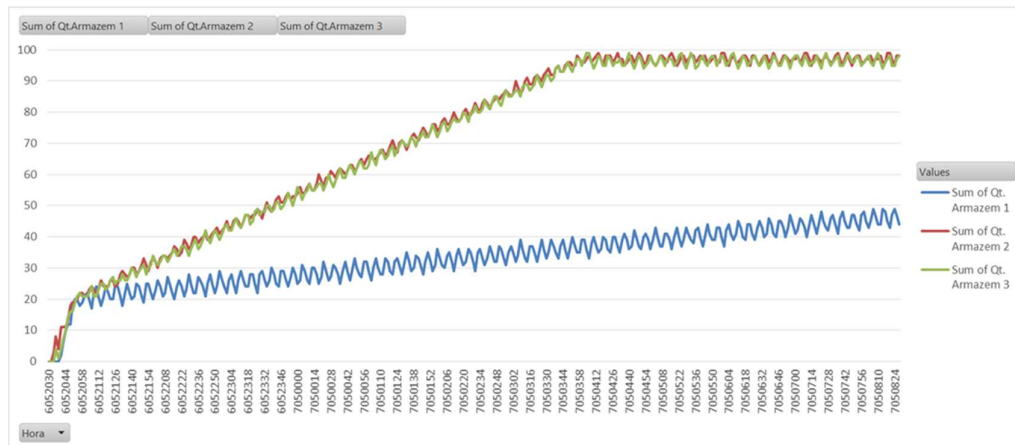
**Fonte: Autor (2020).**

O gráfico da eficiência do processo na figura 77 ilustra que todos os processos ficaram próximos dos 100%, isso após o período inicial de enchimentos dos armazéns com o valor mínimo de 20 subprodutos para início do processo.



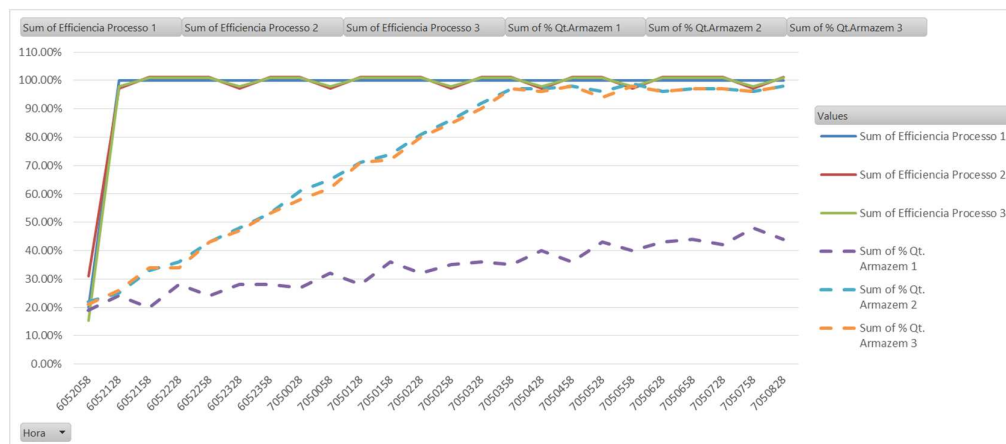
**Figura 77: Gráfico de evolução da eficiência dos processos no cenário otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**

A quantidade no armazém ficou controlada (figura 78), com uma média de 32,78% no armazém 1, 71,54% no armazém 2 e 70,79% no armazém 3.



**Figura 78: Gráfico comportamento de enchimento dos armazéns no cenário otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**

Sobrepondo os gráficos de eficiência do processo e quantidade do armazém conforme figura 79, o controle do nível dos estoques interfere positivamente na eficiência das máquinas, sendo elas mantendo a sua produção em todo o período das 12 horas.



**Figura 79: Sobreposição gráficos de eficiência dos processos e enchimento dos armazéns no cenário otimizado.**

**Fonte: Autor (2020).**

### 3.3.4 Comparação de Resultados

Avaliando a eficiência na Tabela 13, percebe-se que houve um ganho de produtividade muito elevado do processo 1, onde o tempo de ciclo é o menor. No processo 2, houve uma pequena perda, porque na versão não otimizada o armazém 2 alcançava o número mínimo de 20 subprodutos antes das outras, com a versão otimizada os armazéns tendem a ter a mesma quantidade, assim no começo do processo há uma distribuição mais homogeneia dos subprodutos para os armazéns. O armazém 3 tem um ganho significativo, isto se deve ao fato de não haver mais bloqueio de envio de subprodutos por armazém cheio. O mais relevante a ser observado é a estabilidade e que todos os processos estão próximos dos 100% de eficiência, no cenário otimizado e praticamente toda a perda de produção está no início do período, onde os processos aguardam a quantidade mínima de 20 subprodutos para os processos iniciarem a produção.

#### *Eficiência Período de 12 horas*

|                   | <i>Cenário não otimizado</i> | <i>Cenário Otimizado</i> | <i>Resultado</i> |
|-------------------|------------------------------|--------------------------|------------------|
| <i>Máquina 1</i>  | 71,71%                       | 98,01%                   | 26,29%           |
| <i>Máquina 2</i>  | 70,02%                       | 70,12%                   | 0,1%             |
| <i>Máquina 3</i>  | 71,31%                       | 86,35%                   | 15,04%           |
| <i>Processo 1</i> | 73,02%                       | 96,67%                   | 23,65%           |
| <i>Processo 2</i> | 97,41%                       | 97,08%                   | -0,32%           |
| <i>Processo 3</i> | 89,04%                       | 96,43%                   | 7,39%            |

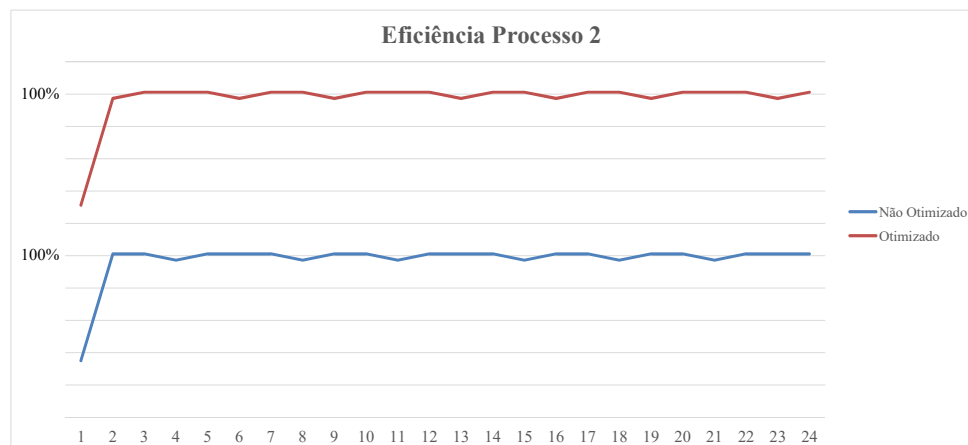
**Tabela 13: Comparação eficiência período de 12 horas.**

**Fonte: Autor (2020).**

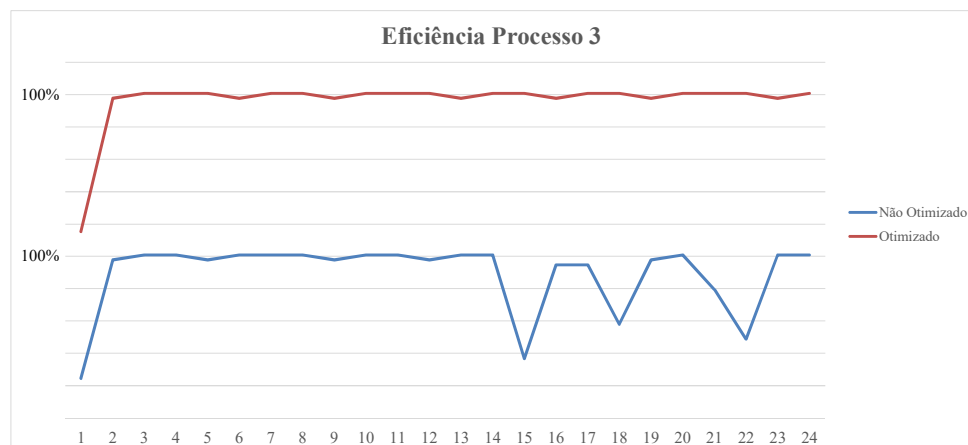
Os gráficos das figuras 80, 81 e 82 mostram a eficiência dos processos em ambos os cenários (não otimizado e otimizado). A eficiência foi calculada a cada 30 minutos em um intervalo de 12 horas, contabilizando 24 pontos no gráfico.



**Figura 80: Comparação eficiência processo 1 nos cenários não otimizado e otimizado.**  
Fonte: Autor (2020).



**Figura 81: Comparação eficiência processo 2 nos cenários não otimizado e otimizado.**  
Fonte: Autor (2020).



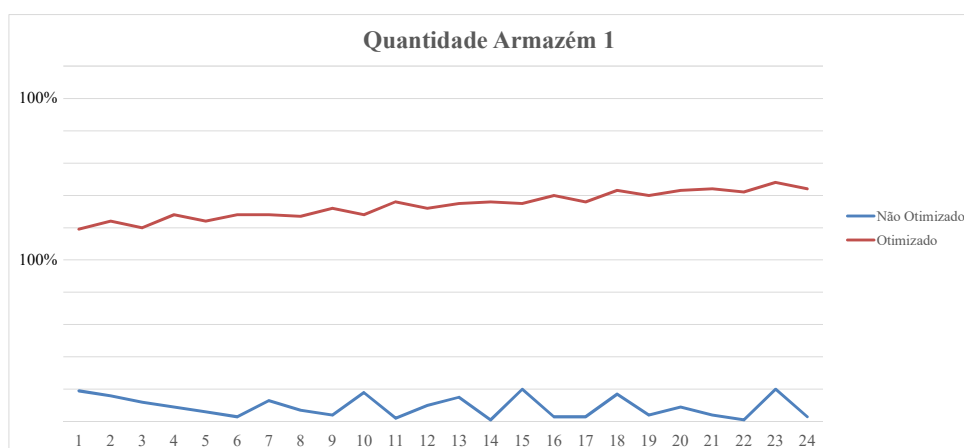
**Figura 82: Comparação eficiência processo 3 nos cenários não otimizado e otimizado.**  
Fonte: Autor (2020).

Na análise dos armazéns a ocupação média (tabela 14) esta foi mais uniforme no cenário otimizado, e conforme os gráficos nas figuras 83, 84 e 85, há a tendência de todos armazém se manter na capacidade máxima, disponibilizando assim os subprodutos para que os processos mantenham a melhor eficiência.

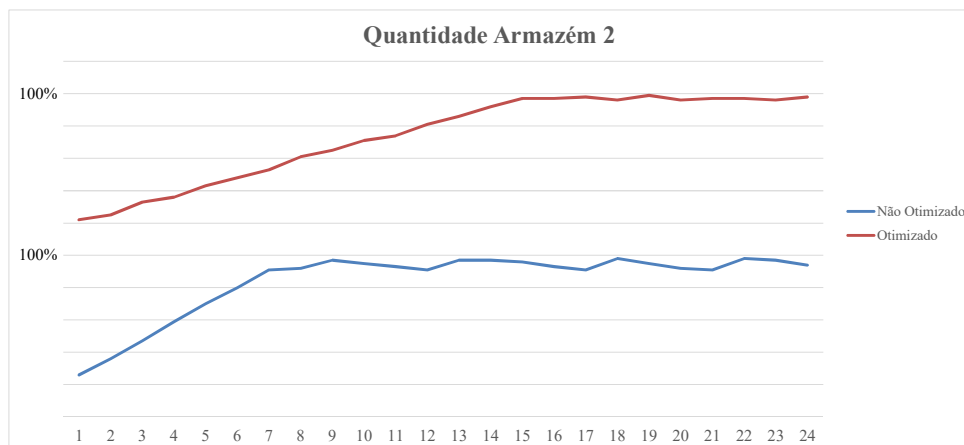
**Ocupação Média Período 12 Horas**

|                  | <i>Cenário não otimizado</i> | <i>Cenário Otimizado</i> |
|------------------|------------------------------|--------------------------|
| <i>Armazém 1</i> | 9,17%                        | 32,78%                   |
| <i>Armazém 2</i> | 82,17%                       | 71,54%                   |
| <i>Armazém 3</i> | 20,75%                       | 70,79%                   |

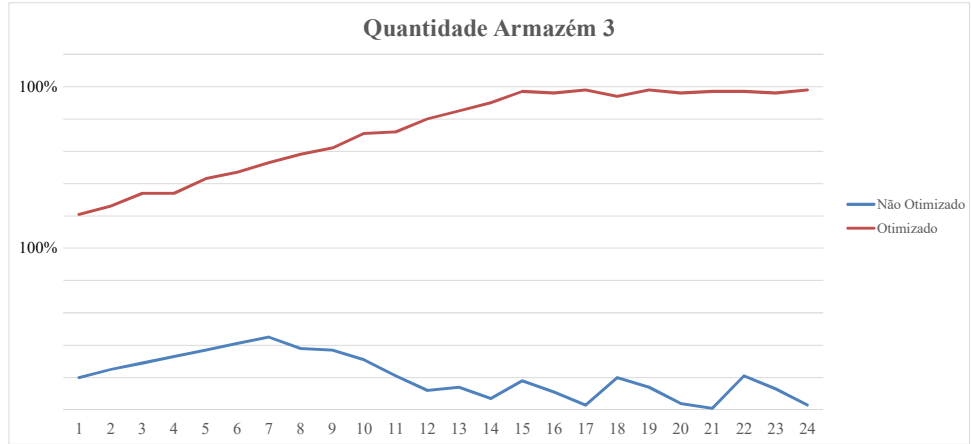
**Tabela 14: Ocupação média período de 12 horas.**  
**Fonte: Autor (2020).**



**Figura 83: Comparação enchimento armazém 1 nos cenários não otimizado e otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**



**Figura 84: Comparação enchimento armazém 2 nos cenários não otimizado e otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**



**Figura 85: Comparação enchimento armazém 3 nos cenários não otimizado e otimizado.**  
**Fonte: Autor (2020).**

#### 4. CONCLUSÃO

Durante o desenvolvimento do programa de controle das máquinas muitos testes de funcionamento foram feitos no emulador, utilizando apenas parte do equipamento, isso facilitou muito para que o programa se tornasse modular, estruturado e reutilizável, já que apenas uma parte do programa foi testada exaustivamente em várias situações até que pudesse ser replicada no restante dos equipamentos do sistema. Até modificações “físicas” na própria máquina (emulada) foram feitas para garantir o alinhamento dos produtos e evitar que falhas ocorressem durante o período de coleta de dados de produção. O funcionamento do programa em modo automático foi validado para a instalação em equipamento real, pois o equipamento emulado rodou por até 20 horas seguidas sem apresentar falhas de programa ou problemas “físicos”, como por exemplo agarramento de produto no circuito das esteiras.

A análise dos dois cenários no período de 12 horas cada, mostra o quanto seria difícil testar estas duas situações no mundo real sem que houvesse outros problemas que poderiam atrapalhar a análise, como falta de matéria prima, absenteísmo ou mesmo parada dos equipamentos por falha ou quebra. Com a simulação é possível isolar condições de processo e equipamento para validar ou não evoluções e comprovar a eficácia sem perturbações em processos físicos reais. Apenas o ganho de produtividade que poderia ser ocasionado em testes e comissionamentos de modificações, já poderia viabilizar o desenvolvimento e aplicações desta tecnologia de simulação e emulação.

Além dos ganhos relatados e verificados no desenvolvimento do trabalho, outros poderiam ser considerados com o uso desta tecnologia, que são:

- Os modelos construídos em 3D podem ser simulados durante a fase de estudo e viabilidade do projeto.
- Esses mesmos modelos podem ser reutilizados para o comissionamento virtual.
- Condições em plena carga facilmente testadas em ambientes virtual, seriam muito difíceis de serem replicadas no ambiente real.
- Validação de códigos de programa padrão.
- Treinamento, operação e manutenção poderiam ser feitos utilizando o modelo virtual, assim acelerando a partida e a entrega de equipamentos.
- Dispensa o uso de produtos reais para teste, que seriam descartados até que o equipamento atingisse o nível de qualidade de fabricação esperado.
- Teste de falhas de equipamentos e erros de operações e melhorias já poderiam ser implementadas antes mesmo do equipamento instalado.

## 5. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES

Apesar de o sistema já estar desenvolvido e testado em modo automático, há ainda muitas possibilidades para se criarem situações ou condições de processo novas. A lista a seguir sugere como evoluir e tornar esse sistema mais integrado, funcional e próximo do mundo real:

- Teste do programa de controle da máquina e emulador utilizando um CLP físico real e comparar resultados de performance.
- Criação de falhas de equipamentos e operacionais.
- Desenvolvimento do diagrama elétrico e implementação no simulador.
- Desenvolvimento de uma Interface Homem Máquina.
- Desenvolvimento de lógicas de controle manual através de botões físicos reais ou IHM.
- Mudança dos valores dos tempos de ciclo das máquinas e processos criando vários cenários e o desenvolvimento de um programa de máquina para contemplar a melhor performance em várias situações.
- Desenvolvimento do emulador e programa de máquina dos processos em um outro controlador e realizar a comunicação entre eles.
- Adicionar ao sistema produtivo, máquinas de controle de produto (medir o peso, por exemplo); e/ou processos intermediários com a montagem da base à tampa.
- Criar mais um ponto de decisão com uma outra mesa cruzada, as duas teriam que verificar a condição de uma e da outra para liberar os produtos aos armazéns.
- Criação de um sistema supervisório com os dados de produção e processo disponíveis em dispositivos móveis como o telefone celular.

## 6. REFERENCIAS

DWYER, Brian. et al. **Combining IoT, Industry 4.0, and energy management suggests exciting future**. Revista Intech, Março/Abril, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2018.

FONSECA, M.O. et al. **IEC 61131 – Parte 1: Informações Gerais**. Aplicando a norma IEC 61131 na automação de processos, São Paulo, 2008.

GAYKO, Jens et al. **Reference Architectural Model Industrie 4.0 (RAMI4.0) - An Introduction**. Disponível em <https://www.plattform-i40.de/PI40/Redaktion/EN/Downloads/Publikation/rami40-an-introduction.pdf>, Acesso em Maio de 2020.

HE, Dazhuang. **An Approach for ISA-95 Application to Industrial Systems** - Master's Thesis. Tampere University of Technology, Maio de 2012

JOSHI, Sanat. **Big Data- Putting data to productive use**. Revista Intech, Maio/Junho, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2013.

KAGERMANN, H. et al. **Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0**. Acatech, 2013.

LEE, E. A. **Cyber Physical Systems: Design Challenges**. 1th IEEE Symposium on Object Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC), 2008.

LENNON, Tony. **Using modeling, simulation to optimize plant control systems**. Revista Intech, Julho/Agosto, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2010.

LYNDON, Bill. **Industry 4.0: Intelligent and flexible production**. Revista Intech, Maio/Junho, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2016.

LYNDON, Bill. **Automated guided vehicles improve production.** Revista Intech, Julho/Agosto, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2018.

LYNDON, Bill. **Integrated manufacturing and production.** Revista Intech Plus, Setembro, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2018.

RICHMOND, Peter. **Virtual reality - Making training more immersive and meaningful.** Revista Intech, Março/Abril, North Carolina: ISA – The Instrumentation, Systems and Automation Society, 2017.

SCHOLZ, Steffen G. **Digital System Integration in the Context of Industry 4.0.** Embedded System enabling CPS and CPPS. Disponível em [https://www.iaria.org/conferences2017/filesACHI17/SteffenGerhardScholz\\_Keynote\\_ACHI2017.pdf](https://www.iaria.org/conferences2017/filesACHI17/SteffenGerhardScholz_Keynote_ACHI2017.pdf). Acesso em Maio de 2020.